

ZÁSADY NAVRHOVANIA A ZAŤAŽENIA KONŠTRUKCIÍ

Prednášajúci: Ing. Richard Hlinka, PhD.

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci OP Vzdelávanie pre projekt „Podpora kvality vzdelávania a výskumu pre oblasť dopravy ako motora ekonomiky“ (ITMS: 26110230076), ktorý je spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho sociálneho fondu.



Moderné vzdelávanie pre vedomostnú spoločnosť/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

Osnova predmetu

- Systém Eurokódov pre navrhovanie nosných konštrukcií
- Všeobecné zásady a pravidlá pre navrhovanie - metóda parciálnych súčiniteľov (medzné stavy, návrhové situácie, životnosť, spoľahlivosť,...)
- Objemové tiaže, vlastná tiaž a užitné zaťaženia
- Zaťaženie konštrukcií požiarom
- Klimatické zaťaženia - sneh, vietor
- Zaťaženie teplotou
- Zaťaženia počas výstavby
- Mimoriadne zaťaženia - výbuch, náraz, seizmicita
- Zaťaženia vyvolané žeriavmi a strojmi
- Zaťaženie síl a nádrží

- Zaťaženie mostov

System Eurokódov pre navrhovanie konštrukcií

Vývoj Eurokódov

V roku 1975 sa Európska komisia rozhodla na základe článku 95 Rímskej zmluvy na vytvorení sústavy technických pravidiel pre navrhovanie pozemných a inžinierskych stavieb.

„Zmyslom Eurokódov je vytvoriť sústavu bežných technických pravidiel pre navrhovanie pozemných a inžinierskych stavieb, ktorá nahradí odlišné pravidlá jednotlivých členských krajín“

- ČSN (pôvodné normy ešte z doby spoločnej republiky)
- STN (väčšinou pôvodné normy ČSN)
- STN P-ENV (predbežné európske normy)
- STN EN (finálne Eurokódy vrátane národných príloh)

Výhody Eurokódov

- fungovanie jednotného trhu s výrobkami a inžinierskymi službami
- konkurencieschopnosť európskeho stavebného priemyslu, odborníkov v krajinách mimo Európskej Únie

Úžitok Eurokódov

- rovnaké pravidlá umožňujú všetkým odborníkom účasť na projektoch a expertízach, prispievajú k priehľadnosti trhu
- zaviedli pravidlá pre navrhovanie a overovanie konštrukcií z hľadiska mechanickej odolnosti, stability a požiarnej bezpečnosti
- sprístupnili a zjednodušili výrobu a používanie prefabrikovaných dielcov a obchodovanie s nimi
- zjednotili výskum a vývoj
- umožnili vývoj jednotného softvéru a pomôcok pre navrhovanie
- zvýšili konkurencieschopnosť európskych stavebných firiem

Zoznam stavebných Eurokódov

STN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhovania konštrukcií

STN EN 1991 Eurokód 1: Zaťaženie konštrukcií

STN EN 1992 Eurokód 2: Navrhovanie betónových konštrukcií

STN EN 1993 Eurokód 3: Navrhovanie ocelových konštrukcií

STN EN 1994 Eurokód 4: Navrhovanie spriahnutých ocelobetónových konštrukcií

STN EN 1995 Eurokód 5: Navrhovanie drevených konštrukcií

STN EN 1996 Eurokód 6: Navrhovanie murovaných konštrukcií

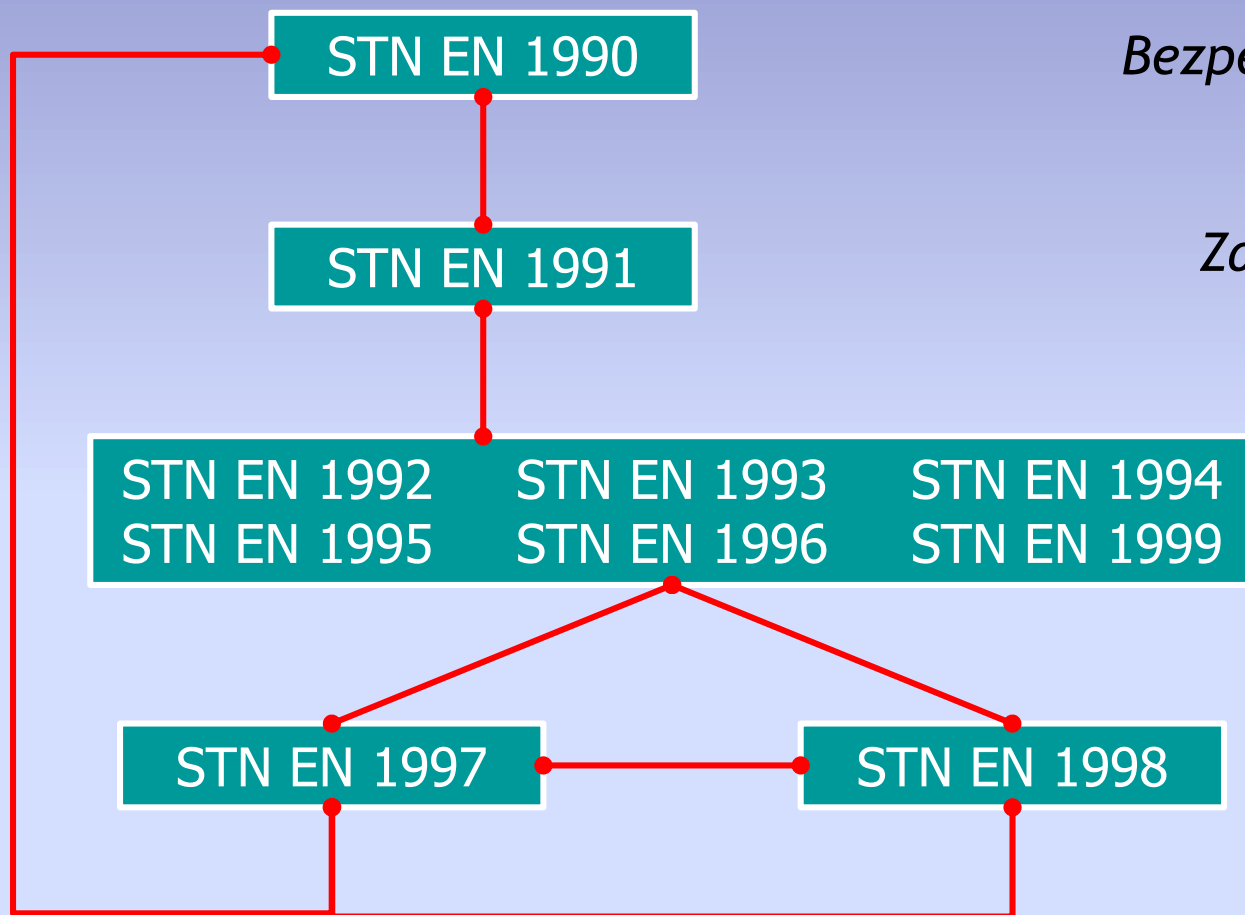
STN EN 1997 Eurokód 7: Navrhovanie geotechnických konštrukcií

STN EN 1998 Eurokód 8: Navrhovanie konštrukcií na seizmickú odolnosť

STN EN 1999 Eurokód 9: Navrhovanie hliníkových konštrukcií

+ *Národné prílohy*

Väzby medzi Eurokódmi



Bezpečnosť a trvanlivosť

Zaťaženie konštrukcií

Navrhovanie

*Geotechnický a
seizmický návrh*

Národné prílohy

- vydávajú národné normalizačné inštitúty
- každý Eurokód udáva niektoré parametre s možnosťou úpravy podľa geografických a klimatických podmienok (snehové a vetrové mapy), spôsobu života, rozdielnej úrovni bezpečnosti (národná, regionálna, lokálna)
- národná príloha rozhoduje o zavedení a používaní informatívnych príloh uvedených v Eurokóde
- uvádza doplnkové informácie, ktoré uľahčujú použitie Eurokódov

„Národná príloha nesmie v žiadnom prípade meniť ani upravovať obsah Eurokódu žiadnym spôsobom“

Všeobecné zásady a pravidlá navrhovania

- STN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhovania konštrukcií
- Nosné stavebné konštrukcie a nosné prvky musia byť navrhnuté a realizované tak, aby počas svojej predpokladanej životnosti spĺňali nasledujúce podmienky:
 - prenesú všetky zaťaženia a vplyvy, ktoré sa pravdepodobne vyskytnú počas ich realizácie a užívania
 - musia byť pri vhodne zvolenej miere **spôľahlivosti** ekonomicky udržiavané
 - musia mať primeranú mechanickú odolnosť, používateľnosť, trvanlivosť a požiarňu odolnosť
 - v prípade mimoriadnej udalosti (náraz, výbuch) nesmie dôjsť k ich progresívnemu zrušeniu - požiadavka na dostatočnú robustnosť
- seizmická odolnosť

Spoločnosť stavebných konštrukcií

- Všeobecne sa spoločnosťou objektu rozumie jeho schopnosť plniť požadované funkcie pri zachovaní prevádzkových ukazovateľov v daných podmienkach, medziach a v požadovanom časovom úseku.
- Parciálnymi zložkami spoločnosti sú:
 - bezpečnosť - neohrozovať ľudské zdravie a životné prostredie,
 - používateľnosť - použitie pre navrhovaný účel,
 - trvanlivosť (životnosť) - doba spoločnej prevádzky.
- V priebehu životnosti sa konštrukcia nachádza v určitých stavoch:
 - z hľadiska činnosti: - prevádzka
 - prestoj
 - z hľadiska poruchy: - bezporuchový stav
 - stav poruchy.

Limitným stavom konštrukcie - medzný stav

- je to stav poruchového prestoja
- stav, ktorého vznik znamená prerušenie alebo obmedzenie používania konštrukcie

- V prípade stavebných konštrukcií rozlišujeme:

• *medzné stavy únosnosti (MSÚ)*

súvisia s bezpečnosťou a trvanlivosťou, najmä z pohľadu ochrany ľudských životov a ich zdravia, ale aj ochrany majetku, príp. ochrany skladovaných nebezpečných odpadov, chemikálií, ...

• *medzné stavy používateľnosti (MSP)*

súvisia s používateľnosťou. Týkajú sa najmä funkčnosti, vzhľadu, pohodlia ľudí ale aj trvanlivosti

Medzné stavy únosnosti

Ich prekročenie vedie
k porušeniu konštrukcie
- kolapsu.



- strata statickej rovnováhy konštrukcie alebo jej ľubovoľnej časti,
- premena konštrukcie alebo jej časti na pohyblivý mechanizmus - konštrukcia sa zmení na kinematický systém
- porušenie kritického prierezu prvku prekročením pevnosti materiálu alebo nadmernou deformáciou,
- strata stability tvaru konštrukcie alebo jej časti (vzper, vydúvanie),
- únavové a krehkolomné porušenie.

Medzné stavy používateľnosti

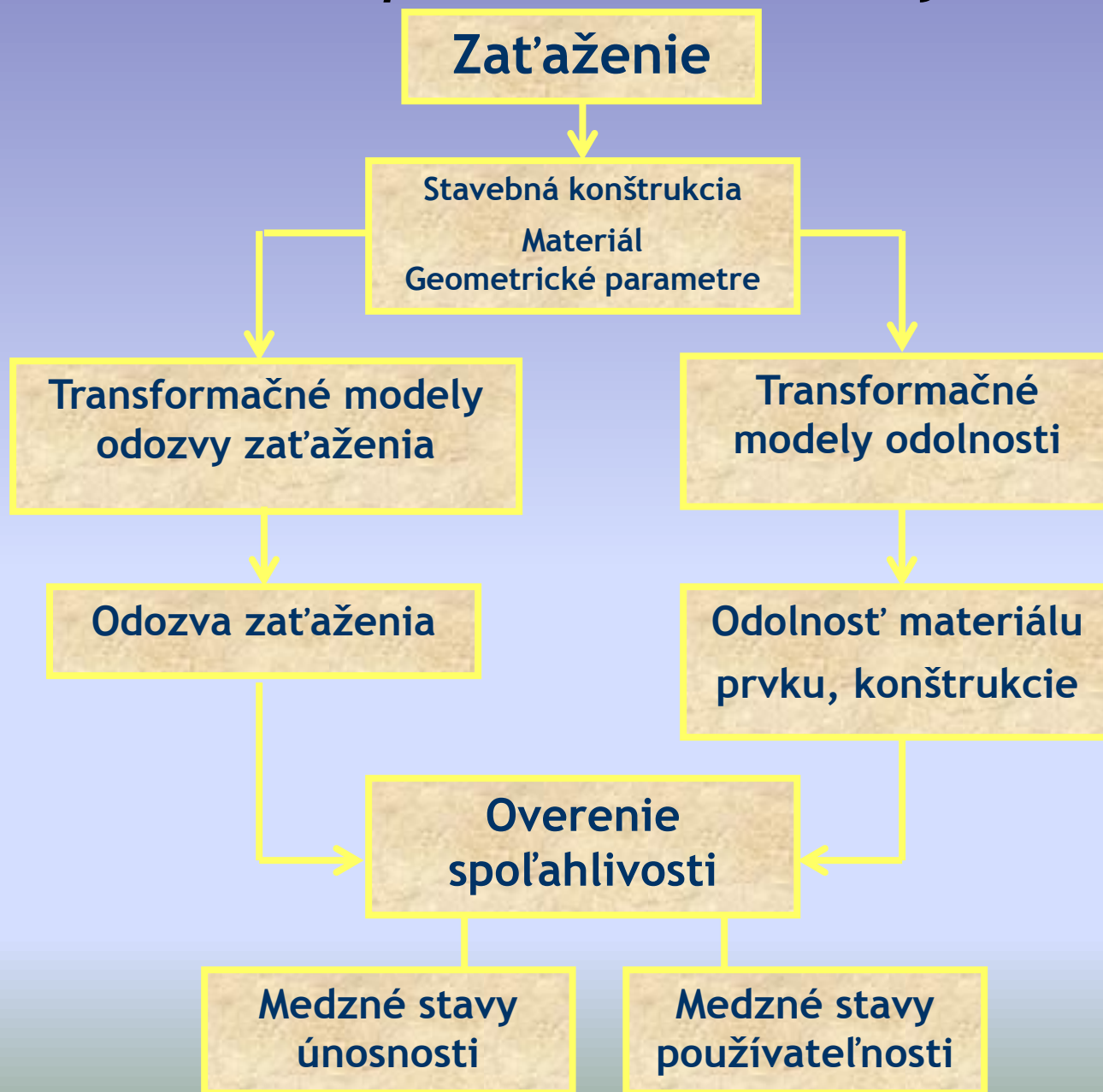
Pri ich prekročení nebudú splnené prevádzkové požiadavky na konštrukciu.



- nadmerné deformácie ovplyvňujúce vzhľad alebo využitie konštrukcie,
- neprijateľné vibrácie ovplyvňujúce psychiku a pohodlie ľudí ako aj správanie konštrukcie
- lokálne porušenie (trhliny) redukujúce trvanlivosť konštrukcie.

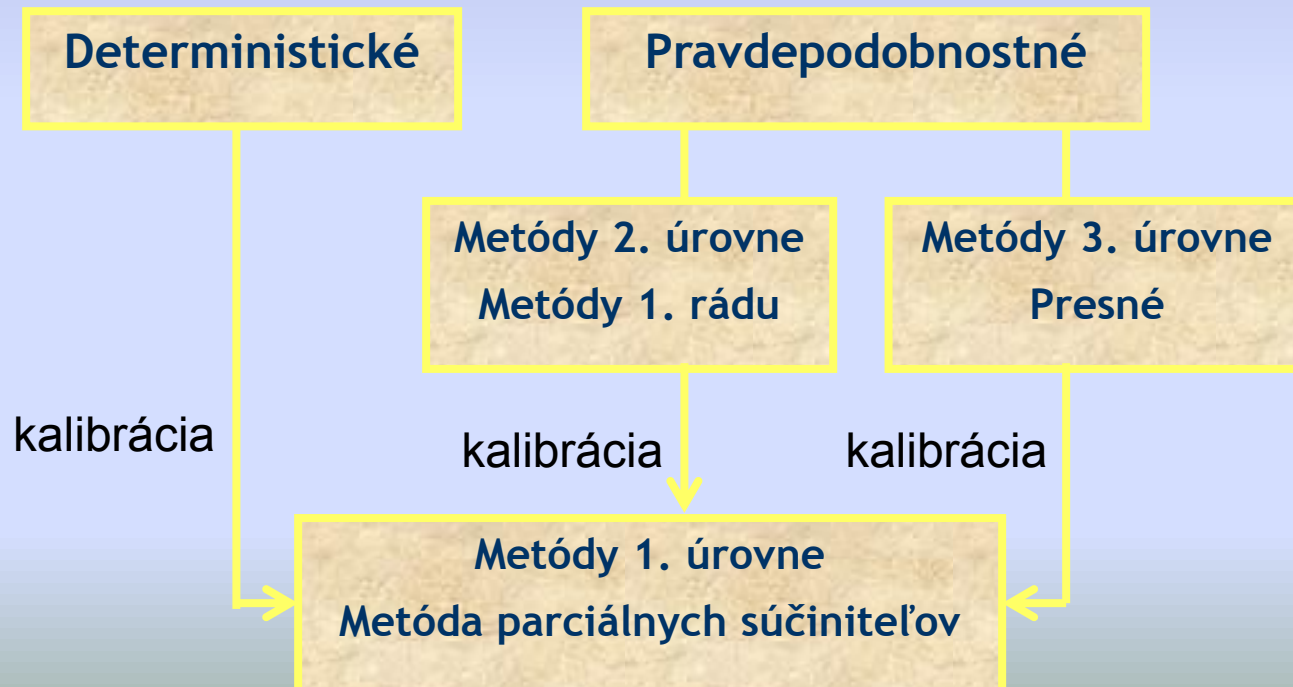
Zamedzenie vzniku jednotlivých medzných stavov sa preukazuje splnením podmienok spoľahlivosti, ktoré sú pre tieto stavy predpísané normami pre navrhovanie stavebných konštrukcií.

Proces overovania spoľahlivosti stavebných konštrukcií



Triedenie metód teórie spoľahlivosti

- ***Deterministické metódy***: - metóda dovolených namáhání
- metóda stupňa bezpečnosti
- ***Pravdepodobnostné metódy*** -1. úrovne
2. úrovne
3. úrovne



Inžinierske metódy teórie spoľahlivosti stavebných konštrukcií

Inžinierskymi metódami teórie spoľahlivosti sú označované metódy 2. úrovne

Inžinierska pravdepodobnostná metóda (Ržanicyn, Cornell)

Predstavuje najjednoduchšiu pravdepodobnostnú metódu teórie spoľahlivosti a zakladá sa na pravdepodobnostnom vyhodnotení rezervy spoľahlivosti g v tvare:

$$g = R - E \geq 0$$

$$g = R / E \geq 1$$

R je odolnosť konštrukcie ako funkcia náhodných premenných vstupných parametrov,

E je odozva zaťaženia ako funkcia náhodných premenných vstupných parametrov (Zaťaženie = vnútorné sily, napätia, deformácie, frekvencie kmitania,...).

Pravdepodobnosť poruchy :

$$P_f = P(g < 0) = P(R - E < 0)$$

$$P_f = P(g < 1) = P(R / E < 1)$$

Za predpokladu štatistickej nezávislosti R a E bude pravdepodobnosť poruchy:

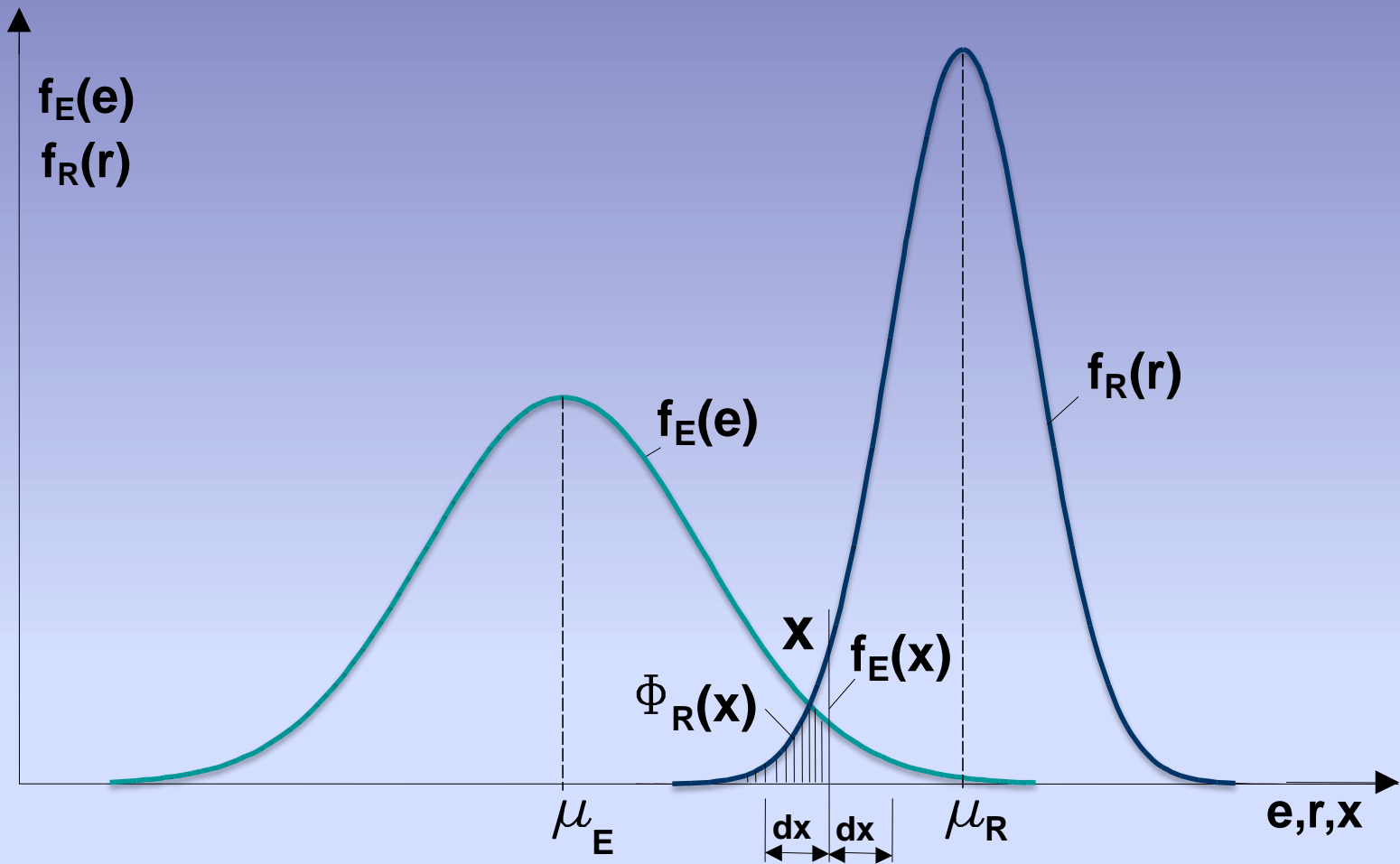
$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_E(x) \phi_R(x) dx$$

$\phi_R(x)$ je hodnota distribučnej funkcie odolnosti

$$P(R < x) = \phi_R(x)$$

$f_E(x)$ vyjadruje pravdepodobnosť výskytu odozvy zaťaženia v okolí bodu x

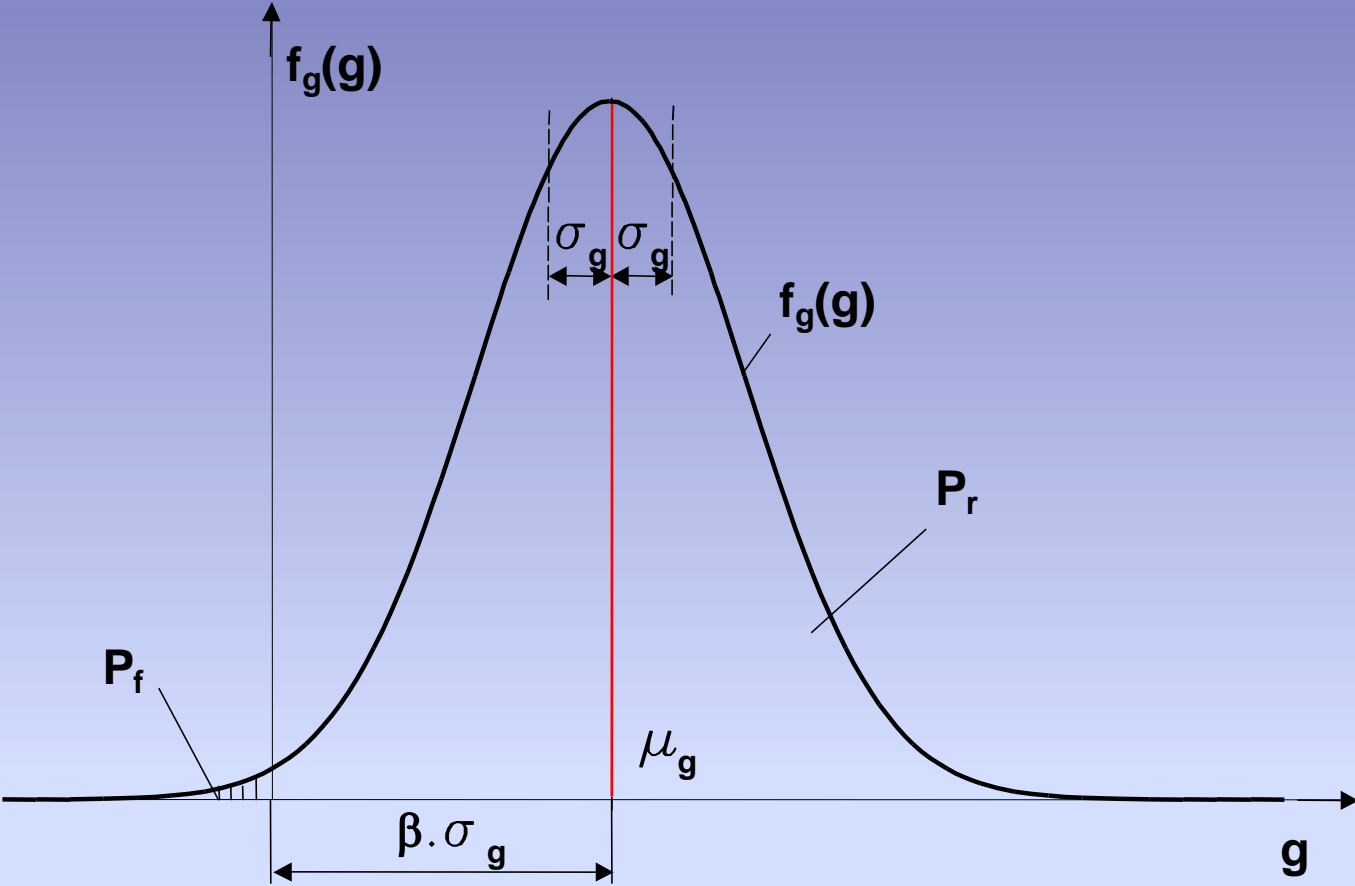
$$P(x - dx/2 \leq E \leq x + dx/2) = f_E(x) dx$$



$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_E(x) \phi_R(x) dx$$

$$P(R < x) = \phi_R(x)$$

$$P(x - dx/2 \leq E \leq x + dx/2) = f_E(x) dx$$



$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_g(g) dg$$

$$P_r = \int_0^{\infty} f_g(g) dg$$

Index spoľahlivosti (elementárny podľa Cornella): $\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_E}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}}$

Podmienka spoľahlivosti: $P_f \leq P_{fd}$
 $\beta \geq \beta_d$

Skutočná odolnosť konštrukcie R a skutočná odolnosť E sú premenlivé veličiny. Ich premenlivosť vyplýva:

- z premenlivosti vlastností materiálov,
- z premenlivosti zaťaženia,
- z rozdielov medzi projektovanými a skutočnými rozmermi konštrukcie,
- zo zjednodušení, ktoré boli zahrnuté pri výpočtových modeloch odozvy a odolnosti.

Inžinierska pravdepodobnostná metóda:

- predstavuje zjednodušený prístup - lineárna kombinácia dvoch v v výsledných náhodných premenných E a R .
- v skutočnosti ide o lineárne a nelineárne kombinácie zaťaženi, pevnostných a geometrických štatisticky nezávislých aj závislých veličín.
- ide o systém n náhodných veličín X_i v n -rozmernom priestore.

Rezerva spoľahlivosti je funkciou náhodných veličín $X_1, X_2 \dots X_n$

$$g = g(X_1, X_2 \dots X_n)$$

a podmienka spoľahlivosti je v tvare:

$$g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2 \dots X_n) \geq 0$$

Pravdepodobnosť poruchy

$$P_f = \int_{D_f} f(X_1, X_2 \dots X_n) \cdot dX_1 \cdot dX_2 \dots dX_n$$

$f(x_1, x_2 \dots x_n)$ je funkcia združenej hustoty pravdepodobnosti náhodných veličín $x_1, x_2 \dots x_n$

$$g = X_1 X_2 - \sum_{i=3}^n X_i, \quad g = \left(X_1 X_2 - \sum_{i=4}^n X_i \right) / X_3$$

Metódy riešenia:

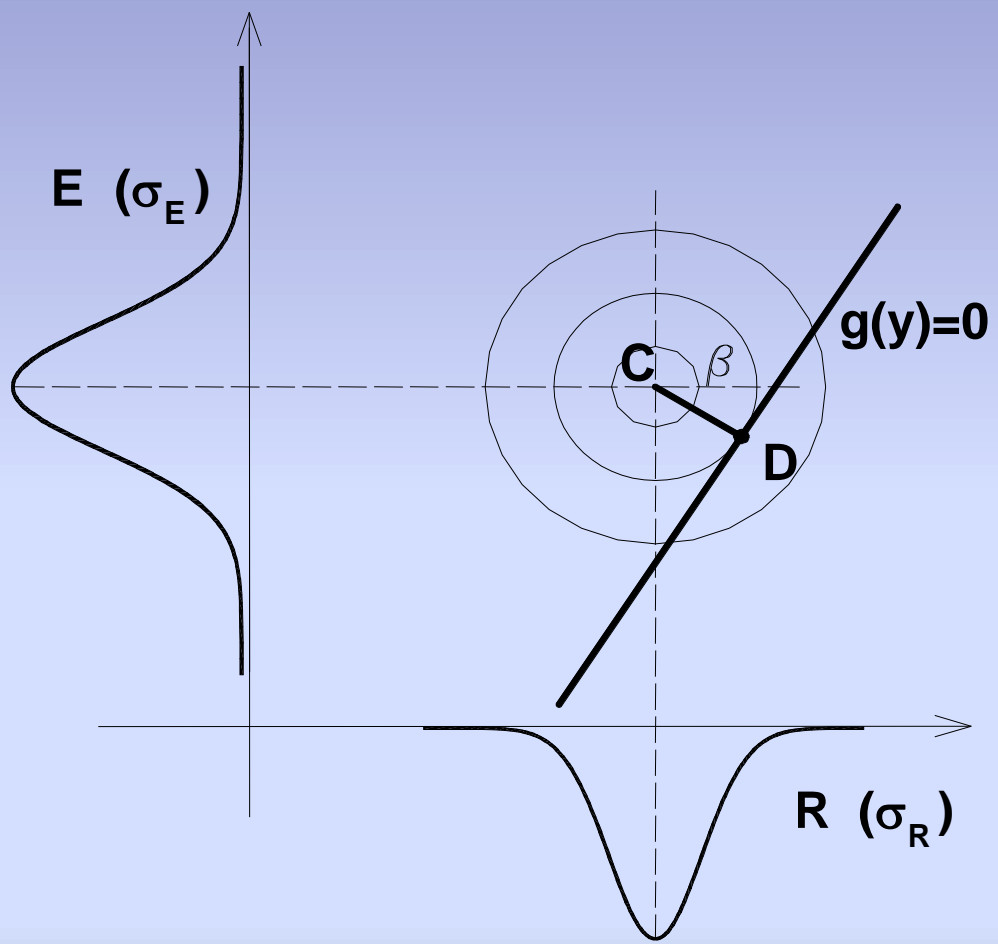
- **aproximačné** - FORM (First Order Reliability Method)
- SORM
- **simulačné** - Monte Carlo, Importance Sampling,
Latin Hypercube Sampling apod.

Aproximačné metódy

- Vstupné veličiny X_i sa transformujú na nekorelované normované náhodné veličiny Y_i

$$Y = (X - \mu_x) / \sigma_x$$

- Hľadá sa poloha návrhového bodu D, ktorý leží na funkcii poruchy $g(y)$ a má najmenšiu vzdialenosť od stredu rozdelenia C. Táto vzdialenosť je index spoľahlivosti β (Hasofer - Lindov index spoľahlivosti).
- Funkcia poruchy sa obvykle linearizuje (FORM) rozvojom do Taylorovho radu alebo sa používa jej kvadratická aproximácia (SORM).



Požadovaná úroveň spoľahlivosti sa definuje pomocou tzv. **limitnej pravdepodobnosti**, ktorá vyjadruje najvyššiu pravdepodobnosť s ktorou pripúšťame dosiahnutie medzného stavu. Limitná pravdepodobnosť sa neuvádza priamo, ale prostredníctvom indexu spoľahlivosti β .

Požadovaná úroveň spoľahlivosti je zaistená zavedením návrhových hodnôt odolnosti a odozvy konštrukcie. Úroveň spoľahlivosti je kalibrovaná indexom spoľahlivosti β :

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R = \mu_R (1 - \alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)$$

$$E_d = \mu_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E = \mu_E (1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_E)$$

kde: β je cieľový index spoľahlivosti ,
 V_R a V_E sú variačné súčinitele odolnosti a odozvy konštrukcie a
 α_R a α_E sú váhové súčinitele.

Požadovanú úroveň spoľahlivosti ovplyvňujú:

- spôsob resp. tvar porušenia konštrukcie (t'ažný s rezervami, t'ažný bez rezervy alebo krehký),
- možné následky porušenia,
- odpor verejnosti voči zlyhaniu,
- náklady a nevyhnutné opatrenia na zníženie rizika porušenia.

STN EN 1990 umožňuje pracovať s rôznymi úrovňami spoľahlivosti pre medzné stavy únosnosti. Ich výber závisí od:

- možných strát ľudských životov,
- sociálnych následkov,
- ekonomických následkov a
- environmentálnych následkov

Definícia tried následkov

Triedy následkov	Popis	Príklady
CC3	Vysoké následky straty ľudských životov a veľmi veľké sociálne, ekonomické a enviromentálne následky	Tribúny štadiónov, verejné budovy s veľkými následkami (koncertné sály, ap.)
CC2	Stredné následky straty ľudských životov a značné sociálne, ekonomické a enviromentálne následky	Obytné a administratívne budovy
CC1	Nízke následky straty ľudských životov a malé alebo zanedbateľné sociálne, ekonomické a enviromentálne následky	Poľnohospodárske budovy, sklady, skleníky,...

Minimálne hodnoty indexu spoľahlivosti

Trieda spoľahlivosti	Medzné stavy únosnosti			Medzné stavy použiteľnosti		
	β		Limitná pravdepodobnosť	β		Limitná pravdepodobnosť
	1 rok	50 rokov		1 rok	50 rokov	
RC3	5,2	4,3	8,4+E-6	2,5	1,5	6,7+E-2
RC2	4,7	3,8	7,2+E-5			
RC1	4,2	3,3	4,8+E-4			

Simulačné metódy

Monte Carlo

- Opakovaná numerická simulácia riešenia funkcie poruchy $g(X)$ vždy s iným náhodne generovaným vektorom vstupných parametrov X_i .
- Získaný súbor g ($g_1, g_2 \dots g_n$) sa štatisticky vyhodnotí.
- Pravdepodobnosť poruchy:

$$P_f = N_f / N$$

kde N_f je počet simulácií s $g_j \leq 0$,
 N je celkový počet simulácií.

Nevýhodou metódy Monte-Carlo je veľký počet simulácií, čo si vyžaduje vysokovýkonný počítač a veľa strojového času.

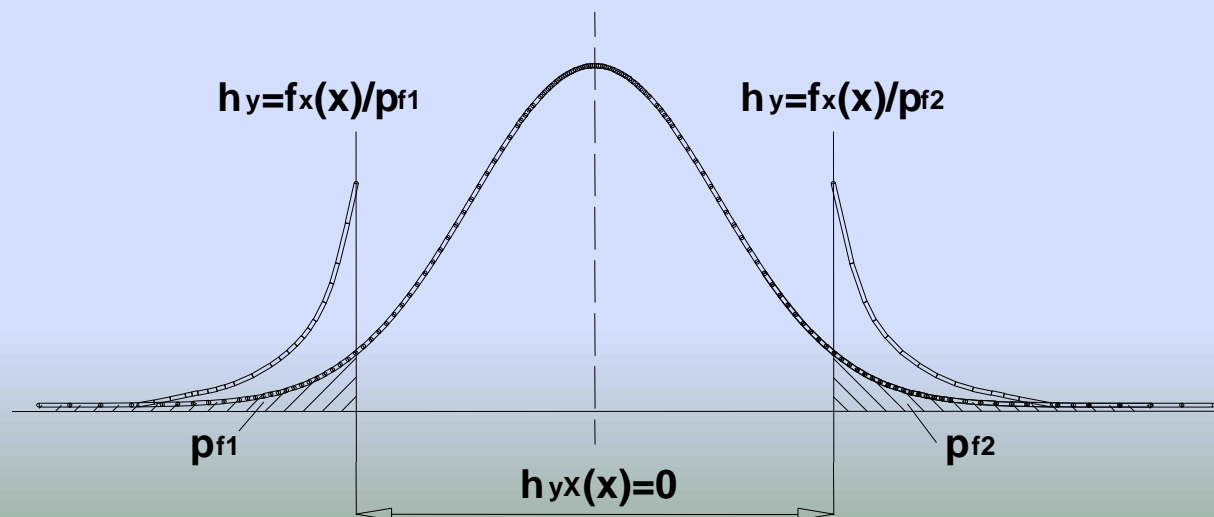
Importance Sampling

- Koncentrácia simulácií do oblasti $g(\mathbf{x}) = 0$ s využitím váhovej funkcie $h_y(\mathbf{x})$

$$P_f = \int_{D_f} 1[g(\mathbf{x}) < 0] \frac{f_x(\mathbf{x})}{h_y(\mathbf{x})} \cdot h_y(\mathbf{x}) d\mathbf{X}$$

kde $1[g(\mathbf{x})] = 1$ pre X_j z oblasti poruchy,
 $= 0$ pre ostatné X_i

- Konceptia Importance Sampling sa môže aplikovať aj pre okolie iného bodu, napr. pre bod zodpovedajúci stredným hodnotám



Metóda parciálnych súčiniteľov

- Podmienka spoľahlivosti v separovanom tvare: $E_d \leq R_d$
 $E_d \leq C_d$

E_d je návrhová hodnota odozvy zaťaženia extrémna z hľadiska medzných stavov únosnosti resp. prevádzková z hľadiska medzných stavov používateľnosti

R_d je návrhová hodnota odolnosti materiálu, prvku,

C_d je nominálna hodnota určitých vlastností prvku alebo konštrukcie.

- Separácia náhodných premenných E a R

Realizuje sa pomocou separačných alebo citlivostných (váhových) funkcií odozvy zaťaženia a odolnosti konštrukcie.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} \cdot \frac{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\frac{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\alpha_R \sigma_R + \alpha_E \sigma_E}$$

Z podmienky spoľahlivosti v tvare: $\beta = \beta_d$

vyplýva:

$$\mu_E + \alpha_E \beta_d \sigma_E \leq \mu_R + \alpha_R \beta_d \sigma_R$$

$$\alpha_E = \sigma_E / (\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}$$

$$\alpha_R = \sigma_R / (\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}$$

Pre obvyklé hodnoty σ_E a σ_R

$$0,16 < \sigma_E / \sigma_R < 7,6$$

je možné voliť:

$$\alpha_E = 0,7$$

$$\alpha_R = 0,8$$

Zavedenie reprezentatívnych hodnôt

$$\mathbf{F}_d = \gamma_f \mathbf{F}_R \quad - \text{ návrhová hodnota zaťaženia}$$

$$\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_k / \gamma_m \quad - \text{ návrhová hodnota vlastnosti materiálu}$$

$$\mathbf{a}_d = \mathbf{a}_{\text{nom}} \pm \Delta \mathbf{a} \quad - \text{ návrhová hodnota geometrickej vlastnosti}$$

$$\mathbf{E}_d = \gamma_{Sd} \cdot \mathbf{E}(\gamma_f \mathbf{F}_R, \mathbf{a}_{\text{nom}} \pm \Delta \mathbf{a}) \quad - \text{ návrhová hodnota odozvy zaťaženia}$$

$$\mathbf{R}_d = \mathbf{R}(\mathbf{X}_k / \gamma_{mR}, \mathbf{a}_{\text{nom}} \pm \Delta \mathbf{a}) / \gamma_{Rd} \quad - \text{ návrhová hodnota odolnosti materiálu}$$

Za predpokladu E je úmerné F a R je úmerné X

$$\gamma_F = \gamma_f \cdot \gamma_{Sd} \left(1 + \Delta \mathbf{a} / \mathbf{a}_{\text{nom}}\right) = \gamma_f \cdot \gamma_{Sd} \quad - \text{ parciálny súčiniteľ spoľahlivosti účinkov zaťaženia}$$

$$\gamma_M = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd} / \left(1 - \Delta \mathbf{a} / \mathbf{a}_{\text{nom}}\right) = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd} \quad - \text{ parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu}$$

- γ_f parciálny súčiniteľ zaťaženia, zohľadňuje vplyv nepriaznivých odchýliek zaťaženia od jeho reprezentatívnych hodnôt,
- γ_m parciálny súčiniteľ vlastností materiálu, zohľadňuje vplyv nepriaznivých odchýliek materiálových vlastností od charakteristických hodnôt,
- γ_{Sd} parciálny súčiniteľ modelovej neistoty zohľadňujúci neurčitosti v modeli odozvy konštrukcie na zaťaženia,
- γ_{Rd} parciálny súčiniteľ modelovej zohľadňujúci neurčitosti v modeli odolnosti materiálu alebo prvku,
- Δa zohľadňuje vplyv nepriaznivých odchýliek od charakteristických hodnôt geometrických vlastností.

Návrhová životnosť konštrukcie

Časové obdobie, počas ktorého požadujeme splnenie návrhových kritérií

Kategória návrhovej životnosti	Predpokladaná návrhová životnosť (roky)	Príklady
1	10	Dočasné konštrukcie
2	10 - 25	Vymeniteľné časti konštrukcií (ložiská)
3	15 - 30	Poľnohospodárske konštrukcie
4	50	Pozemné stavby a iné bežné konštrukcie
5	100	Monumentálne pozemné stavby, mosty