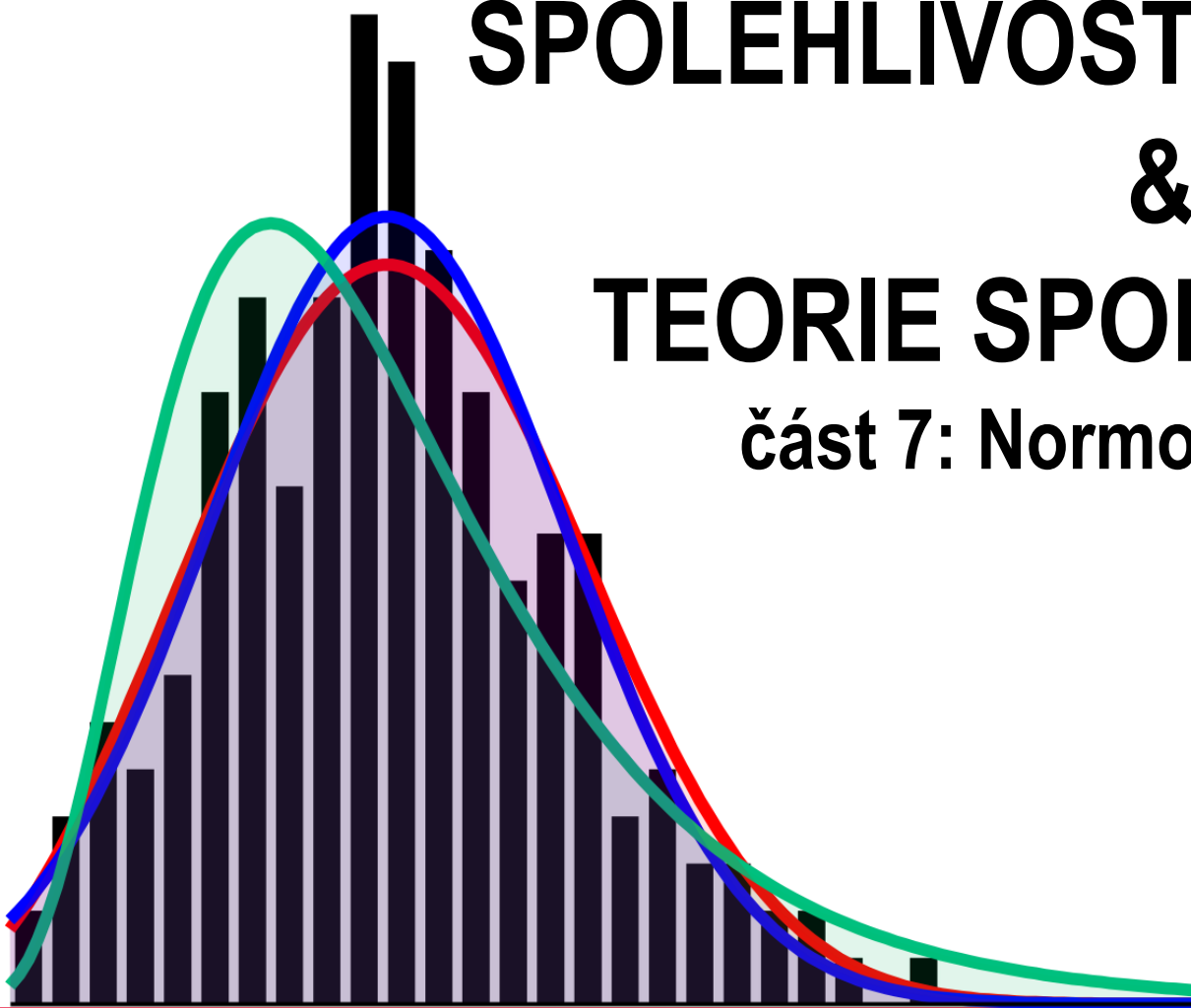




# SPOLEHLIVOST KONSTRUKCÍ & TEORIE SPOLEHLIVOSTI

## část 7: Normové předpisy



Drahomír Novák  
Jan Eliáš  
Lukáš Novák



# část 7 Normové předpisy



# Historie návrhu konstrukcí

- metody návrhu konstrukcí se neustále vylepšují
- nejprve čistě **empirické** metody
- dnes návrh vychází z matematických, mechanických a statistických znalostí
- tři základní moderní návrhové metody jsou rozšířeny po celém světě
  - metoda **dovolených namáhání**
  - metoda **stupně bezpečnosti**
  - metoda **dílčích součinitelů spolehlivosti**
- multikriteriální **optimalizační problém**: spolehlivost a životnost vs. celkové náklady

# Metoda dovolených namáhání

- první metoda rozšířená po celém světě

$$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{allowed}}, \quad \sigma_{\text{allowed}} = \sigma_{\text{crit}} / k$$

- faktor  $k$  zahrnuje nejistoty v zatížení ( $\sigma_{\max}$ ) i odolnosti materiálu ( $\sigma_{\text{crit}}$ )
- $k$  musí být dostatečně vysoké, aby zajistilo požadovanou spolehlivost
- nevýhody:
  - pouze lokální ověření a pouze v elastické oblasti
  - nelze oddělit nejistoty jednotlivých vstupních veličin
  - pravděpodobnost poruchy může být explicitně ovlivněna jen jednou veličinou – faktorem  $k$



# Metoda stupně bezpečnosti

- druhá světově rozšířená metoda

$$s = X_{res} / X_{load} > s_0$$

- $s$  je **stupeň bezpečnosti** a  $s_0$  jeho požadovaná hodnota
- oproti metodě dovolených namáhání může veličina  $X$  představovat nejen elastické napětí ale také např. ohybový moment se zahrnutím plasticity, počet cyklů kterým je konstrukce vytavena a podobně.
- nevýhody:
  - nelze **oddělit** nejistoty **jednotlivých vstupních veličin**
  - pravděpodobnost poruchy může být explicitně ovlivněna jen jednou veličinou – faktorem  $s$



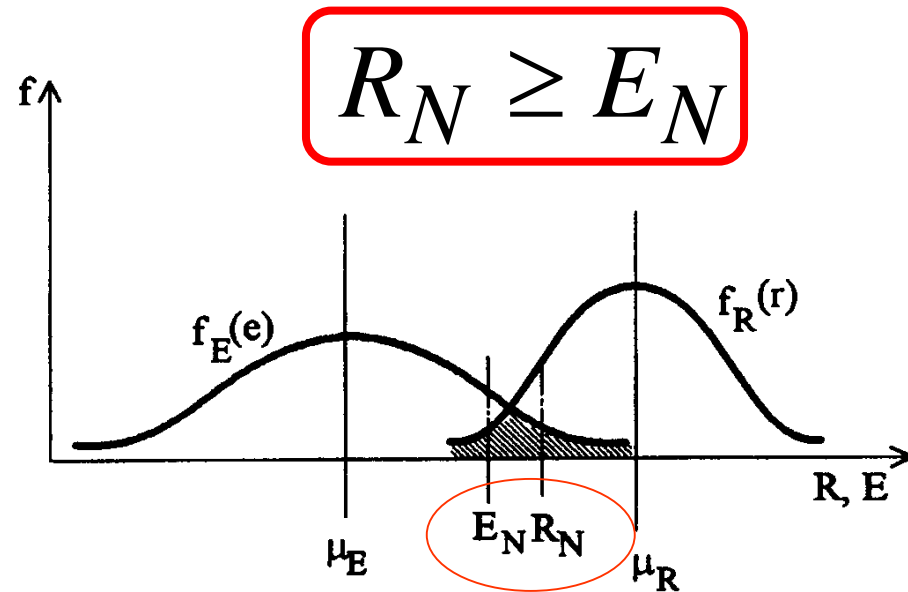
# Metoda dílčích součinitelů spolehlivosti

- všechny vstupní veličiny (včetně zatížení, geometrie a materiálů) jsou uvažovány svojí **charakteristickou hodnotou**  $G_k$ , která je buď 5% nebo 95% kvantil, **EUROKÓD**
- musí ověřit, že účinky návrhových zatížení nepřekročí:
  - návrhovou odolnost konstrukce v **mezním stavu únosnosti**
  - provozní kritéria pro **mezní stav použitelnosti**
  - u některých konstrukcích také další ověření, např. na únavu
- pro vybrané návrhové situace je nutno stanovit kritické zatěžovací případy
- **zatěžovací stav** určuje slučitelné uspořádání zatížení, souborů deformací a imperfekcí, které se mají uvažovat současně
- **kombinace nezávislých zatížení** - zatížení, která nemohou nastat současně, např. z fyzikálních důvodů, se nemají uvažovat společně v jedné kombinaci



# Spolehlivostní pozadí

- návrh konstrukce - komponenty (a konstrukce jako celek) musí splňovat spolehlivostní požadavky – odolnost větší než zatížení
- **odolnost  $R$  a účinky zatížení  $E$**  - 2 náhodné veličiny – **rozdělovací funkce  $f_R(r)$  &  $f_E(e)$**
- deterministická podmínka spolehlivosti
- **návrhová odolnost  $R_N$** :  
funkce návrhové pevnosti,  
geometrie atd.
- **návrhové účinky zatížení  $E_N$** :  
funkce návrhových  
zatížení atd.



# Návrhová hodnota účinků zatížení

- z **reprezentativní** hodnoty  $F_{rep}$   $F_d = \gamma_F F_{rep}$
- $\gamma_F$  dílčí součinitel spolehlivosti (nazvaný podle typu zatížení  $\gamma_G$  nebo  $\gamma_Q$ , resp.  $\gamma_A$  nebo  $\gamma_P$ )
- $F_{rep}$  je nejčastěji charakteristická hodnota (95% kvantil)
- **stálé** ( $G$ ), **nahodilé** ( $Q$ ) a **mimořádné** ( $A$ ) zatížení
- podle typu zatížení se rozlišuje
  - stálé zatížení  $G_d = \gamma_G G_k$
  - nahodilé zatížení  $Q_d = \gamma_Q Q_k, \gamma_Q \psi_0 Q_k, \psi_1 Q_k, \psi_2 Q_k$ 
    - koeficient  $\psi$  - podle délky trvání zatížení
  - mimořádné zatížení  $A_d = \gamma_A A_k$
  - zatížení od předpětí  $P_d = \gamma_P P_k$
  - sesmické zatížení  $A_{Ed} = \gamma_{Ed} A_{Ed}$





# Návrhová hod. materiálových vlastností

$$X_d = \eta X_k / \gamma_M$$

- $\gamma_M$  je **dílčí součinitel spolehlivosti** materiálu nebo výrobku daný v ENV 1992 až 1999; obsahuje nejistotu materiálu i modelové nejistoty

$$\gamma_M = \gamma_m \gamma_{Rd}$$

- $\eta$  převodní součinitel vystihující účinek doby trvání zatížení, vliv objemu a rozměrů, účinky vlhkosti, teploty aj.
- $X_k$  je **charakteristická hodnota** stanovená jako 5% kvantil
- $X_d$  je kvantil odpovídající bezpečnostním požadavkům



# Návrhová hodnota $E$ & $R$

- **účinek zatížení  $E$**  představuje vnitřní sílu, deformaci, poměrné přetvoření, teplotu, ...

$$E_d = E(F_{d1}, F_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, X_{d1}, X_{d2}, \dots)$$

- $F_{d1}, F_{d2}$  = návrhové hod. zatížení zatěžovacích stavů 1, 2, ...,
- $a_{d1}, a_{d2}$  = návrhové hodnoty geometrických údajů konstrukce
- $X_{d1}, X_{d2}$  = návrhové hodnoty vlastností jednotlivých materiálů

- **odolnost  $R$**  představuje účinek zatížení, při kterém konstrukce “selže”, všechny vlastnosti konstrukce s příslušnými návrhovými hodnotami

$$R_d = R(a_{d1}, a_{d2}, \dots, X_{d1}, X_{d2}, \dots)$$

# Mezní stavy únosnosti

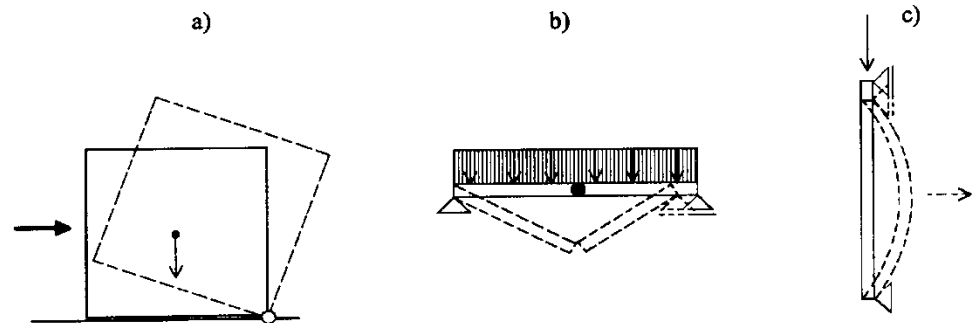
– mezní stav **ztráty stability** polohy nebo celkových posuvů konstrukce jako tuhého tělesa

- $E_{d, stb}$  návrhová hod. účinku **stabilizujících** zatížení
- $E_{d, dst}$  návrhová hod. účinku **destabilizujících** zatížení

$$E_{d, dst} \leq E_{d, stb}$$

– mezní stav pevnosti prvku, spoje či konstrukce

$$E_d \leq R_d$$



Obrázek 1. Mezní stavy únosnosti

- $E_d$  návrhová hodnota **účinku zatížení**, jako je vnitřní síla, moment nebo vektor několika vnitřních sil nebo momentů
- $R_d$  odpovídající návrhová odolnost, zahrnující všechny vlastnosti konstrukce s příslušnými návrhovými hodnotami



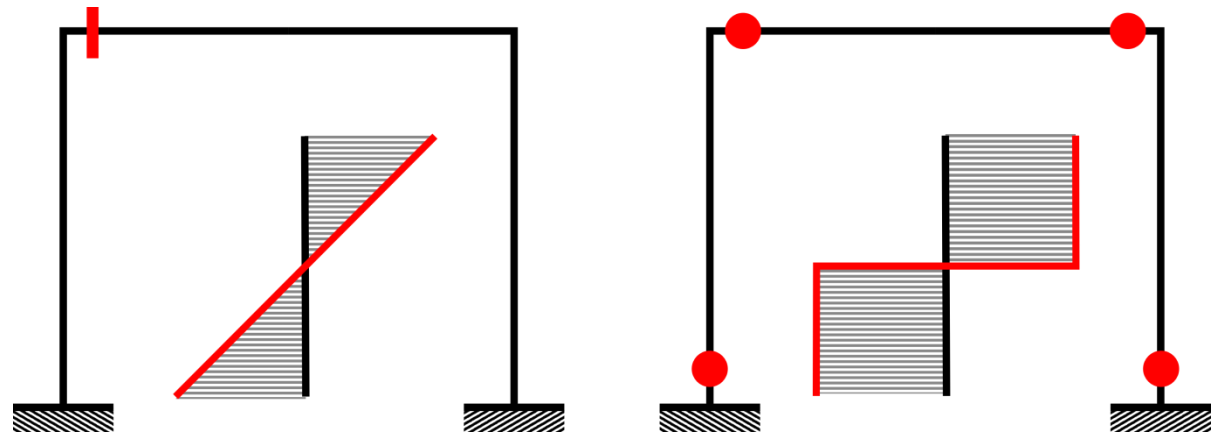
# Mezní stavy použitelnosti

$$E_d \leq C_d$$

- $C_d$  **nominální hodnota** nebo funkce určitých vlastností konstrukce vztažených k uvažovaným návrhovým účinkům zatížení; pokyny pro stanovení těchto hodnot lze nalézt v ENV 1992 až 1999
- $E_d$  návrhová hodnota účinku zatížení (např. posuvu, zrychlení), která je stanovena na základě příslušné kombinace; jedná se o tzv. kombinaci charakteristickou (výjimečnou), stálou nebo kvazistálou (blíže viz opět ENV 1991-1)

# Kritické poznámky k m. dílčích součinitelů

- velikost rezervy spolehlivosti, pravděpodobnosti poruchy či indexu spolehlivosti není vůbec určována!!!
- stejné úrovně spolehlivosti je možné dosáhnout různým způsobem
- Diferenciace spolehlivosti - volba mezního stavu?
- **Nelinearita?** Nekonzistentní přístup!



$$R_d \neq R(X_d)$$

Obrázek 2. Rozdílné volby mezního stavu



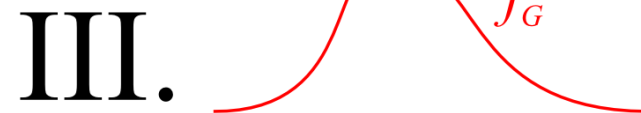
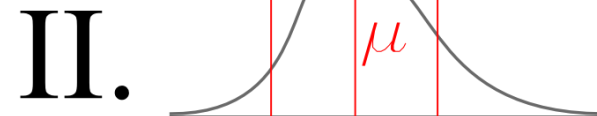
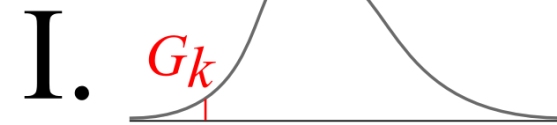
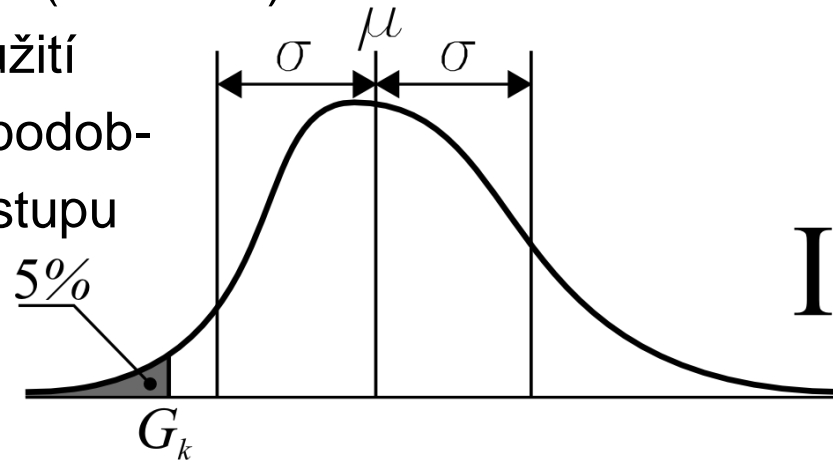
# Čtyři úrovně spolehlivostních metod

- I. úroveň (EUROKÓDY)
  - každá základní veličina vstupuje do výpočtu pouze **jedinou** (návrhovou) **hodnotou**
  - při vlastním navrhování touto metodou jsou jedinými ukazateli spolehlivosti charakteristické hodnoty a dílčí součinitele spolehlivosti
  - metoda dílčích součinitelů spolehlivosti je tedy metodou I. úrovně
- II. Úroveň
  - každá základní veličina je zde popsána **dvěma statistickými parametry** (obvykle střední hodnotou a směrodatnou odchylkou)
- III. úroveň (PLNĚ PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘÍSTUP)
  - všechny základní veličiny jsou popsány vhodným **teoretickým modelem rozdělení pravděpodobnosti**
- IV. Optimalizace nákladů a spolehlivosti (Cost-Risk analysis)
  - uvažuje navíc **ekonomickou** stránku problému

# Metody II. a III. úrovně v normách

- trend směřuje k použití plných pravděpodobnostních metod - III. úroveň
- v současnosti lze použít podle
  - EC1, příloha A, příloha D (úprava dílčích součinitelů bezpečnosti)
  - ISO 2394, fib Model Code 2010 (2020)
  - ČSN 73 0031 (rok 1990)

dovoluje použití plně pravděpodobnostního přístupu

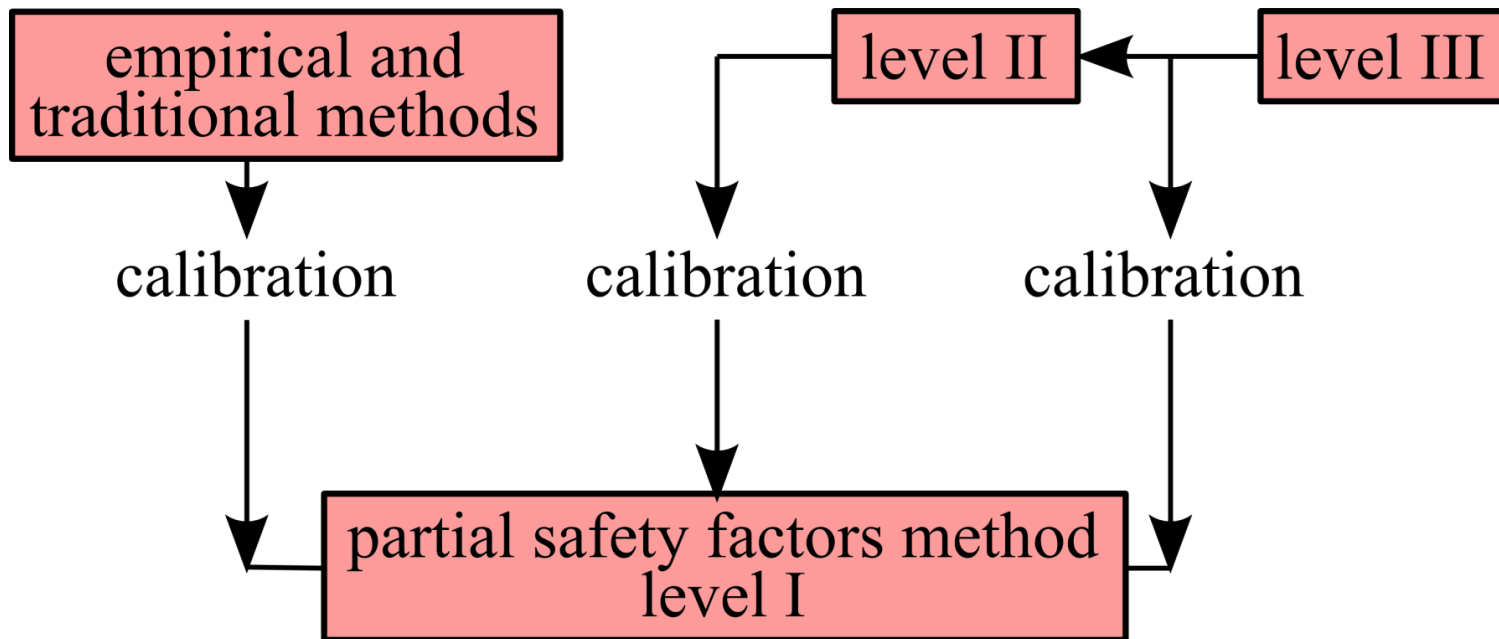


Obrázek 3. Tři úrovně spolehlivostních metod



# Kalibrace dílčích součinitelů bezpečnosti

- syntéza výsledků ze tří zdrojů
- nové materiály: přímo z úrovně II (III)
- některé země bez hluboké tradice v navrhování: přímo z úrovně II (III) (např. jižní Afrika, některé asijské země)



Obrázek 4. Přehled spolehlivostních metod a jejich uplatnění při kalibraci





# Cílová spolehlivost podle EC 1

Tabulka 1. EuroCode cílové pravděpodobnosti poruchy – mezní stavy **únosnosti**

následky	jeden rok	životnost
<b>RC3</b> (velké)	5.2 $1.0 \times 10^{-7}$	4.3 $8.5 \times 10^{-6}$
<b>RC2</b> (střední)	4.7 $1.3 \times 10^{-6}$	<b>3.8</b> $7.2 \times 10^{-5}$
<b>RC1</b> (malé)	4.2 $1.3 \times 10^{-5}$	3.3 $4.8 \times 10^{-4}$

$$\beta_{lim}$$

$$P_{lim}$$

Tabulka 2. EuroCode cílové pravděpodobnosti poruchy – mezní stavy **použitelnosti**

následky	jeden rok	životnost
<b>RC2</b> (střední)	2.9 0.00187	1.5 0.0668

# IV. Optimalizace nákladů a spolehlivosti

- ISO 2394:2015
- Optimalizace rozhodujícího parametru
- Minimální úroveň parametru dle rizika ztráty života
- Optimální úroveň parametru jako minimum funkce zohledňující pravděpodobnost poruchy, následky poruchy a cenu konstrukce

