

# Zásady navrhování a zatížení podle Eurokódu

Prof. Ing. Milan Holický, DrSc.

Klokneruv ústav CVUT, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 842, Fax: 224 355 232

E-mail: [holicky@klok.cvut.cz](mailto:holicky@klok.cvut.cz)

[www.cvut.cz](http://www.cvut.cz) -- soucasti, KU, Odd. spolehlivosti

Zásady - návrhové situace

Nejistoty - spolehlivost

Klasifikace zatížení

Kombinace zatížení

Príklady a závěry

# Zásady EN 1990 - návrhové situace a životnost

## • Návrhové situace

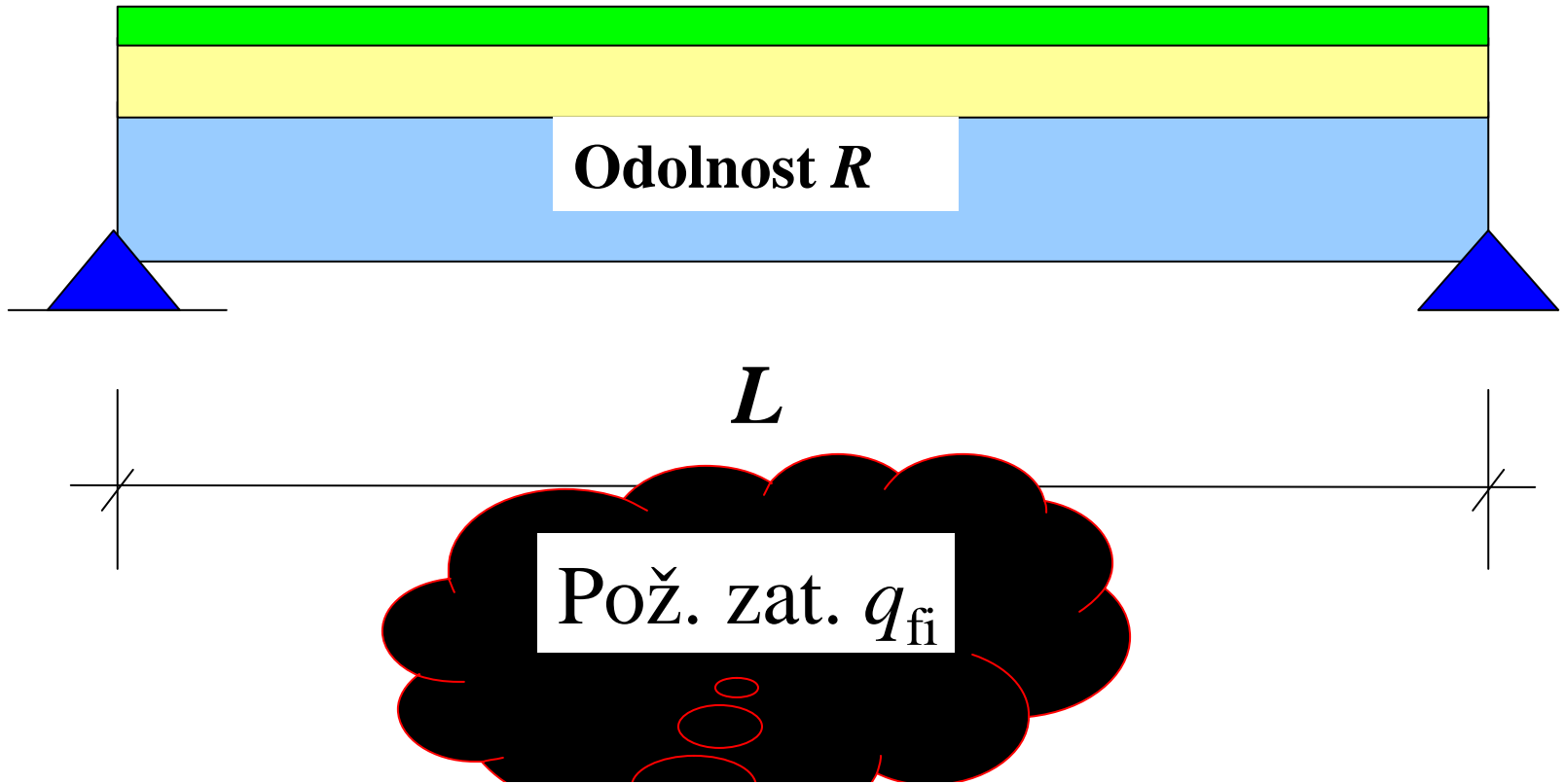
- Trvalá - normální provoz
- Docasná - výstavba, prestavba
- Mimorádná - požár, výbuch, náraz
- Seizmická - zemetresení

## • Návrhová doba životnosti

- |                        |            |
|------------------------|------------|
| – Vymenitelné součásti | 1 až 5 let |
| – Docasná konstrukce   | 25 let     |
| – Budovy               | 50 let     |
| – Mosty, památníky     | 100 let    |

# Mimorádná návrhová situace pri požáru

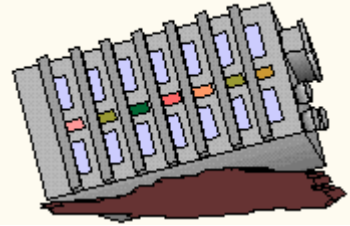
$G + Q$



$$t_d > t_{d,regu}, E_d < R_d, Q_d > Q_{cr,d} \mid \text{požár}$$

# Mezní stavy

• **Mezní stavy** - stavy při jejichž překročení ztrácí konstrukce schopnost plnit funkční požadavky



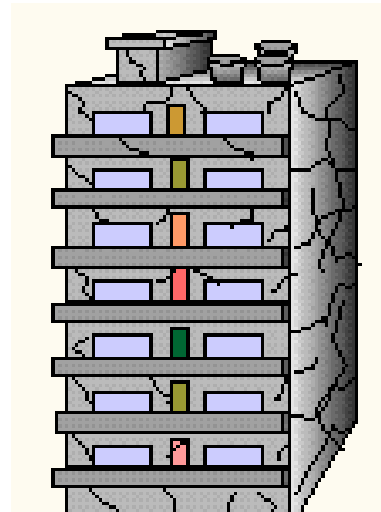
• **Mezní stavy únosnosti**

- ztráta rovnováhy konstrukce jako tuhého tělesa
- porušení, zřícení, ztráta stability
- porušení únavou



• **Mezní stavy použitelnosti**

- provozuschopnost částí konstrukce
- pohodlí uživateli, kmitání
- vzhled, pruhyby, trhliny



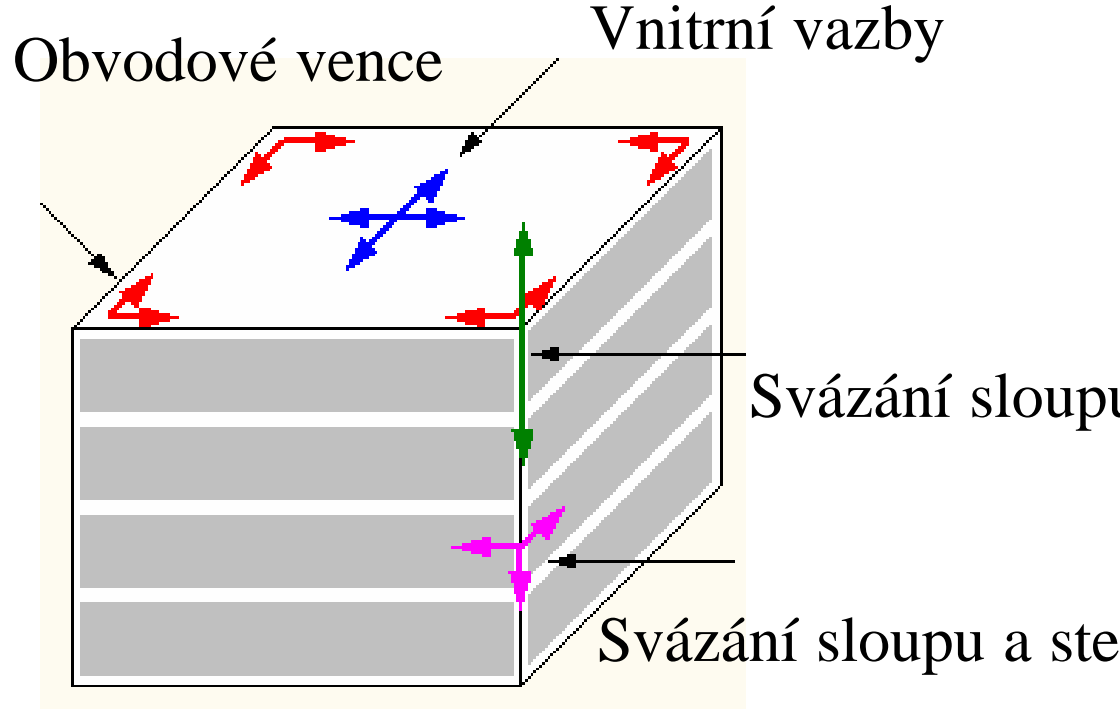
# Celistvost - robustnost

Konstrukce má být navržena a provedena tak, aby se neporušila způsobem neprimereným příčině (požár, výbuch, náraz, lidské chyby).

Ronan point 1960 –  
výbuch v 20 podlaží



Opatření – vytvoření vazeb mezi prvky



# Nejistoty ve stavebnictví

## •Nejistoty

- Náhodnosti - přirozená proměnlivost
- Statistické nejistoty - nedostatek dat
- Modelové nejistoty
- Neurčitosti - nepřesnosti definic
- Hrubé chyby - lidský činitel
- Neznalosti - nové materiály a podmínky

## •Nástroje

- teorie pravděpodobnosti a fuzzy množin
- matematická statistika

**Některé nejistoty je obtížné kvantifikovat**

# Puvod a príčiny poruch

<b>Návrh</b>	<b>Provádění.</b>	<b>Provoz</b>	<b>Ostatní</b>
20 %	50 %	15 %	15 %
<b>Lidské chyby</b>		<b>Zatížení</b>	
80 %		20 %	

Lidské chyby lze omezit kontrolou jakosti

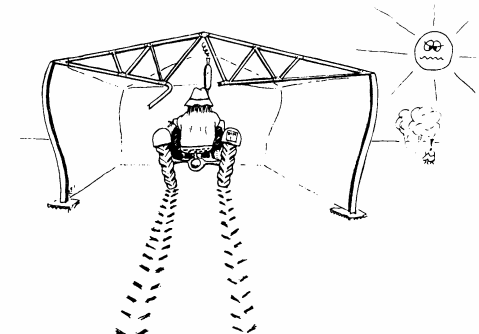
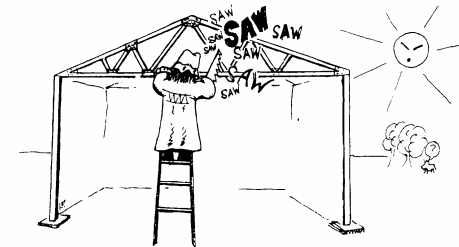
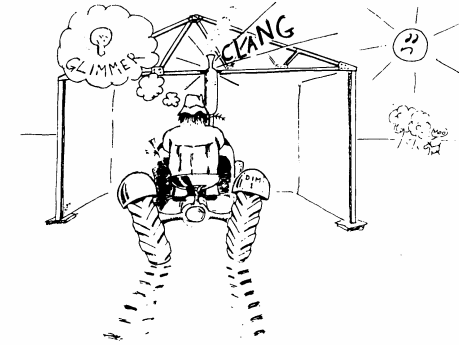
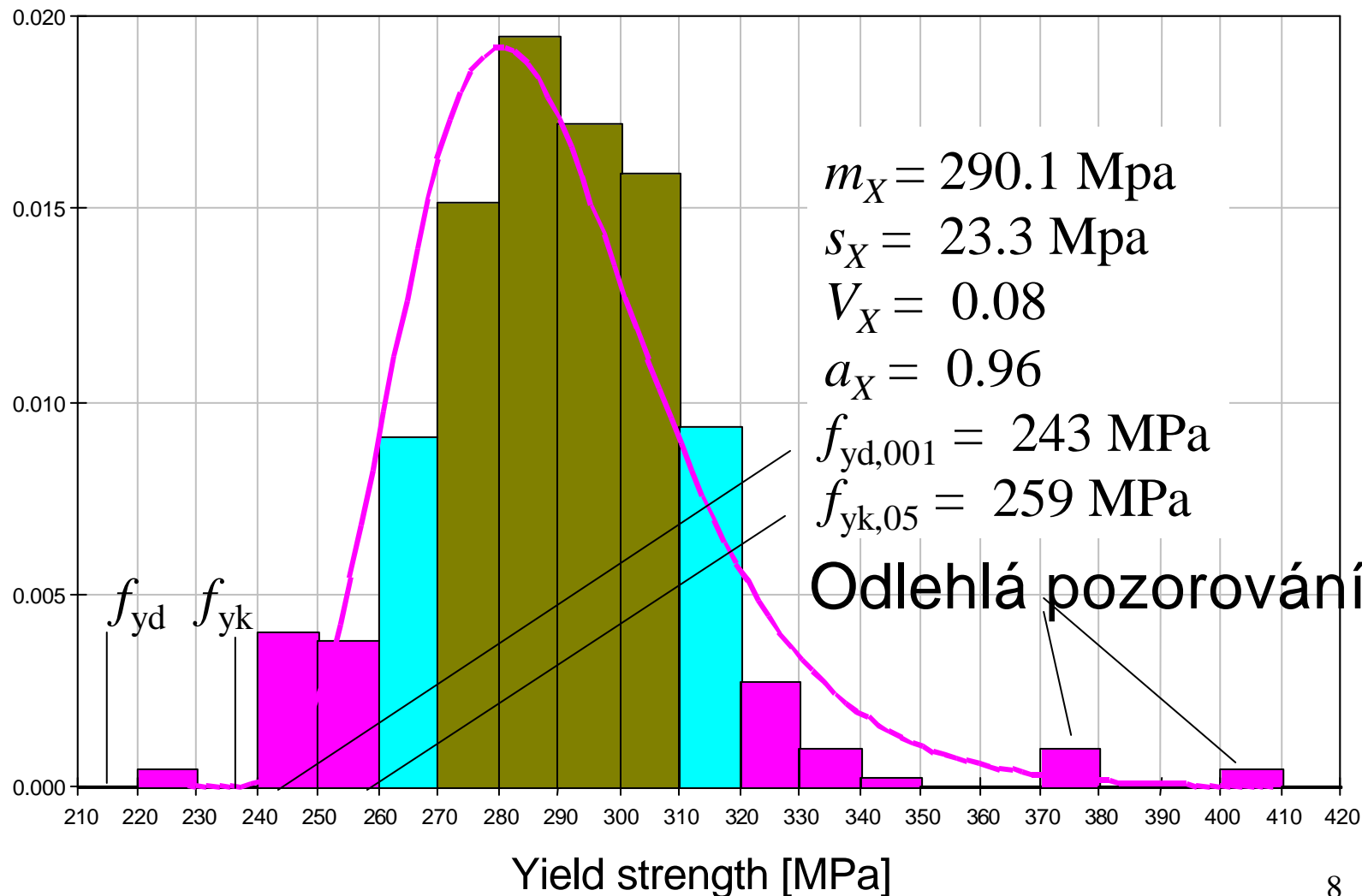


Fig. 1.3 A Farmer's Story.

# Mez kluzu pro S 235 – 792 měření

Relative frequency

*Density Plot (Shifted Lognormal) - [A1\_792]*



# Spolehlivost

• **Spolehlivost** - vlastnost (pravdepodobnost) konstrukce plnit predpokládané funkce během stanovené doby životnosti za určitých podmínek.

- spolehlivost - pravdepodobnost poruchy  $p_f$
- funkce - požadavky
- doba životnosti  $T$
- určité podmínky

• **Pravdepodobnost poruchy  $P_f$  je**

**nejdůležitější** a objektivní míra spolehlivosti konstrukce

$$P_f < P_{f,t} ; b > b_t \quad \beta = -\Phi_N^{-1}(P_f)$$

Vztah mezi  $P_f$  a  $b$

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$b$	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

# Smerná pravdepodobnosť

Pro životnosť 50 let:  $P_{f,t} \sim 10^{-4}$ ,  $b \sim 3,8$

Pocet úmrtí za

Činnosť/príčina	1 h. a $10^8$ o.,	50 let a 1 o.
Horolezectví	2700	(>1,0)
Letecká doprava	120	0,5
Automobilová doprava	56	0,25
Výstavba	7,7	0,033
Prumyslová výroba	2,0	0,0088
Zrúcení konstrukcie	0,002	0,0000009

# Diferenciace spolehlivosti v EN a ISO

## Klasifikace spolehlivosti v EN 1990

Trídy spolehliv.	Nebezpečí ztráty života ekonomické, sociální a ekologické škody	Index spolehliv. $b$		Příklady budov a inženýrských staveb
		$b_t$ for $T_a=$ 1 year	$b_t$ for $T_d=$ 50 years	
3 –	Vysoké	5,2	4,3	Mosty, veřejné budovy
2 –	Střední	4,7	3,8	Obytné a kancelářské budovy
1 –	Nízké	4,2	3,3	Zemědělské budovy, skleníky

## Smerné hodnoty indexu spolehlivosti $b_t$ v ISO 2394

Relativní cena opatření na zvýšení spolehlivosti	Následky poruchy			
	malé	mírné	střední	velké
Velká	0	1,5	2,3	3,1
Střední	1,3	2,3	3,1	3,8
Malá	2,3	3,1	3,8	4,3

# Základní a výsledné velicity

- Základní velicity:

- zatížení  $F$
- materiálové vlastnosti  $f$
- rozmery  $a$

- Výsledné velicity

- odolnost konstrukce  $R$
- účinek zatížení  $E$

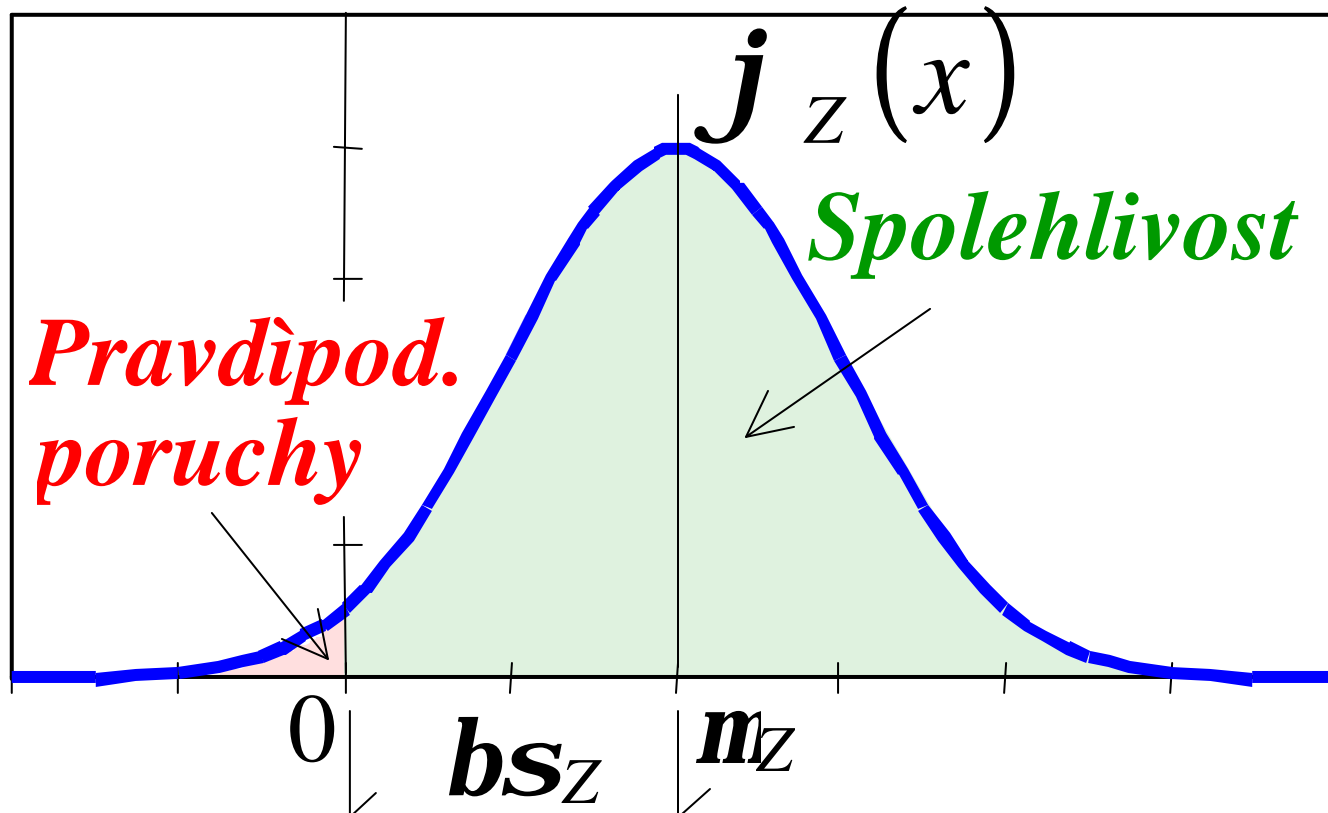
• Podmínka spolehlivosti  $\text{P}$     reserva  $Z$

$$E < R \quad \text{P} \quad Z = R - E$$

# Reserva spolehlivosti $Z = R - E > 0$

$$m_Z = m_R - m_E, \quad s_Z^2 = s_R^2 + s_E^2$$

Index spolehlivosti:  $b = m_Z / s_Z$

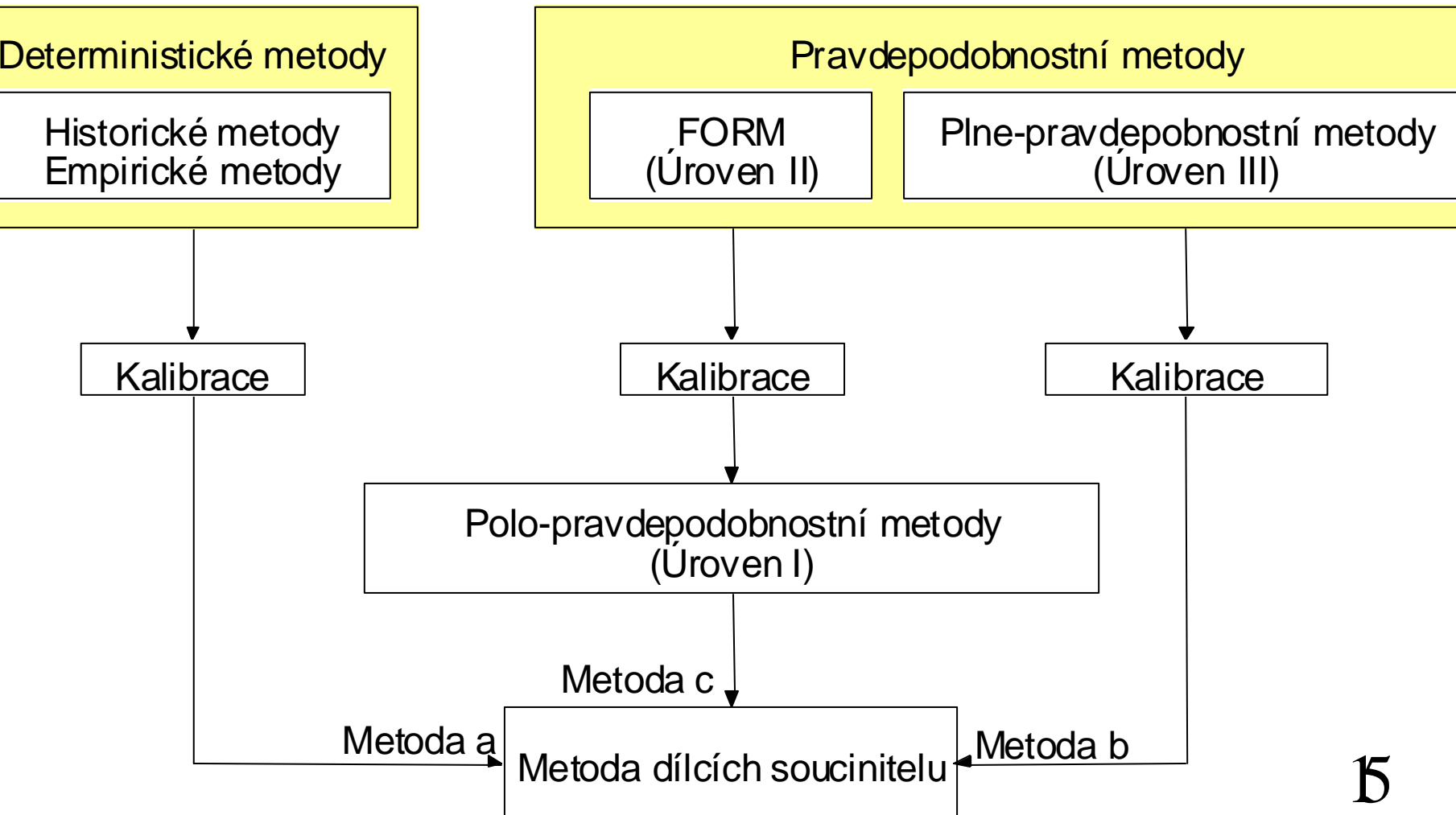


# Metody overování spolehlivosti

- Historické a empirické metody
- Dovolená namáhání
- Stupen bezpečnosti
- Metoda dílcích soucinitelu
- Pravděpodobnostní metody
- Rizikové inženýrství

*Zvyšuje se náročnost výpočtu*

# Návaznost metod overování spolehlivosti





# Základy metody dílcích součinitelů

## Charakteristické hodnoty:

- zatížení:  $F_k$  (horní kvantil =  $F_{0,98}$ )
- vlastností materiálu:  $f_k$  (dolní kvantil =  $f_{0,05}$ )
- rozmeru  $a_k$  (nominální hodnoty =  $a_{\text{nom}}$ )

## Návrhové hodnoty:

- zatížení  $F_d = \mathbf{g}_F \mathbf{y}_i F_k$
- vlast. materiálu  $f_d = f_k / \mathbf{g}_M$
- rozmeru  $a_d = a_k \pm \Delta a, \Delta a \approx 0$

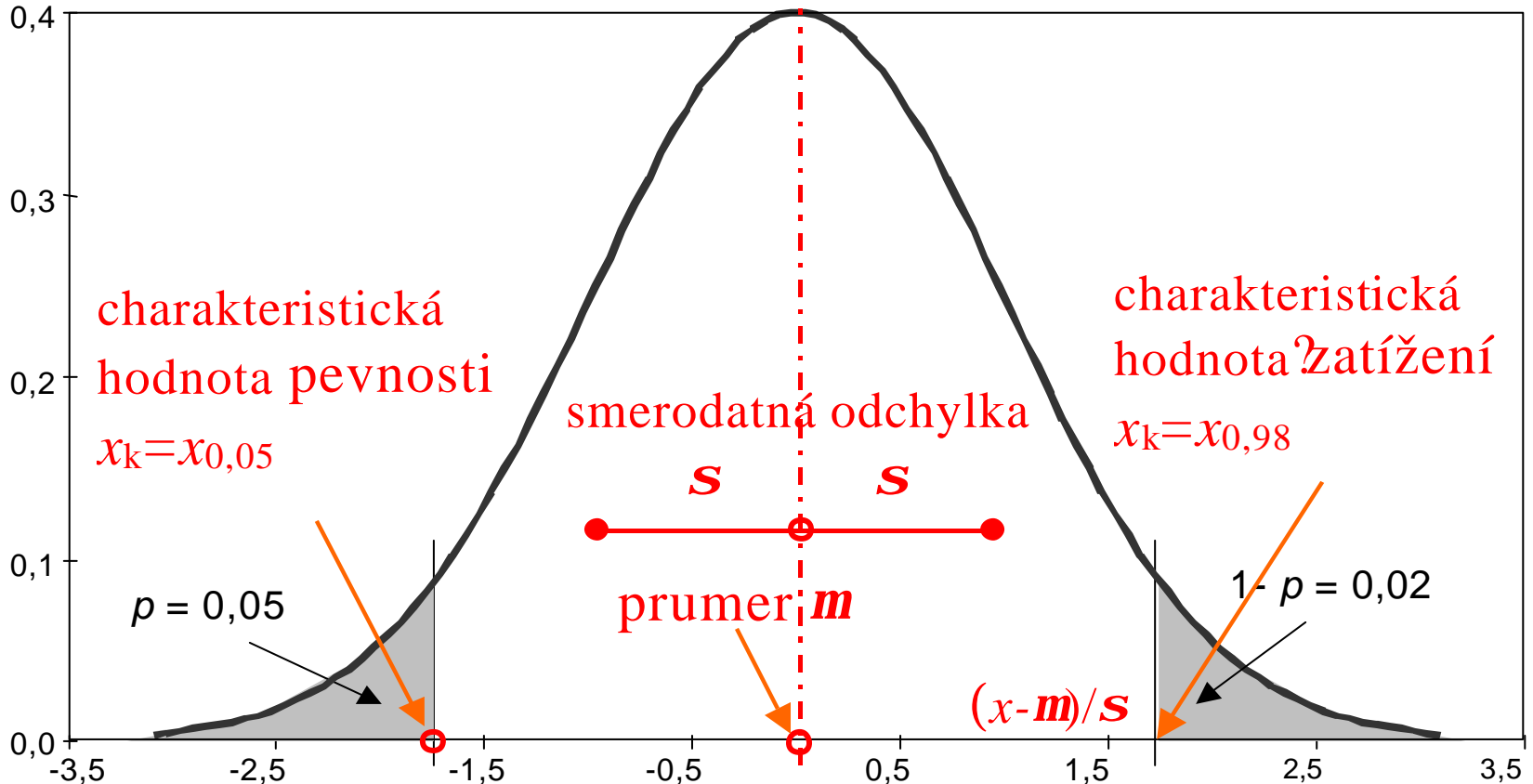
$\mathbf{g}_F, \mathbf{g}_M, \mathbf{y}_i$  jsou závislé na úrovni spolehlivosti  $\mathbf{b}$

Podmínka spolehlivosti:  $E_d(F_d, f_d, a_d) < R_d(F_d, f_d, a_d)$

Príklad:  $E_d = \mathbf{g}_G G_k + \mathbf{g}_Q Q_k < R_d = A f_{yk} / \mathbf{g}_M$

# Charakteristické hodnoty

Hustota pravděpodobnosti  $\varphi(x)$  pevnosti nebo zatížení  $X$



Príklad náhodné velicíny  $X$  s normálním rozdelením

Charakteristické hodnoty nejsou zpravidla průmerné hodnoty.  
Pro běžné materiály a zatížení jsou uvedeny v predpisech. 18

# Klasifikace zatížení

Stálá

*G*

Promenná

*Q*

Mimorádná

*A*

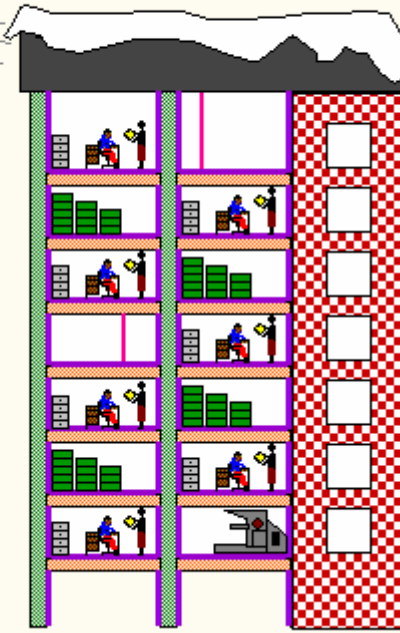
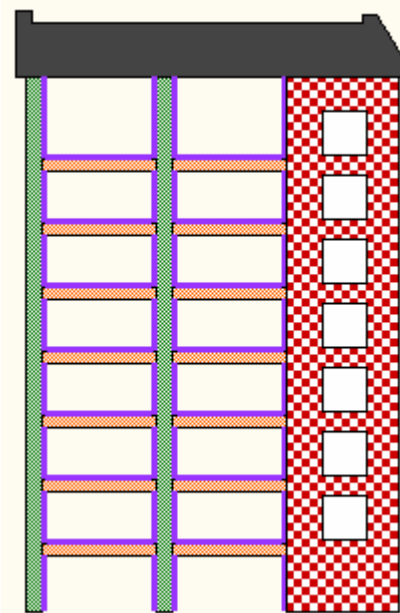
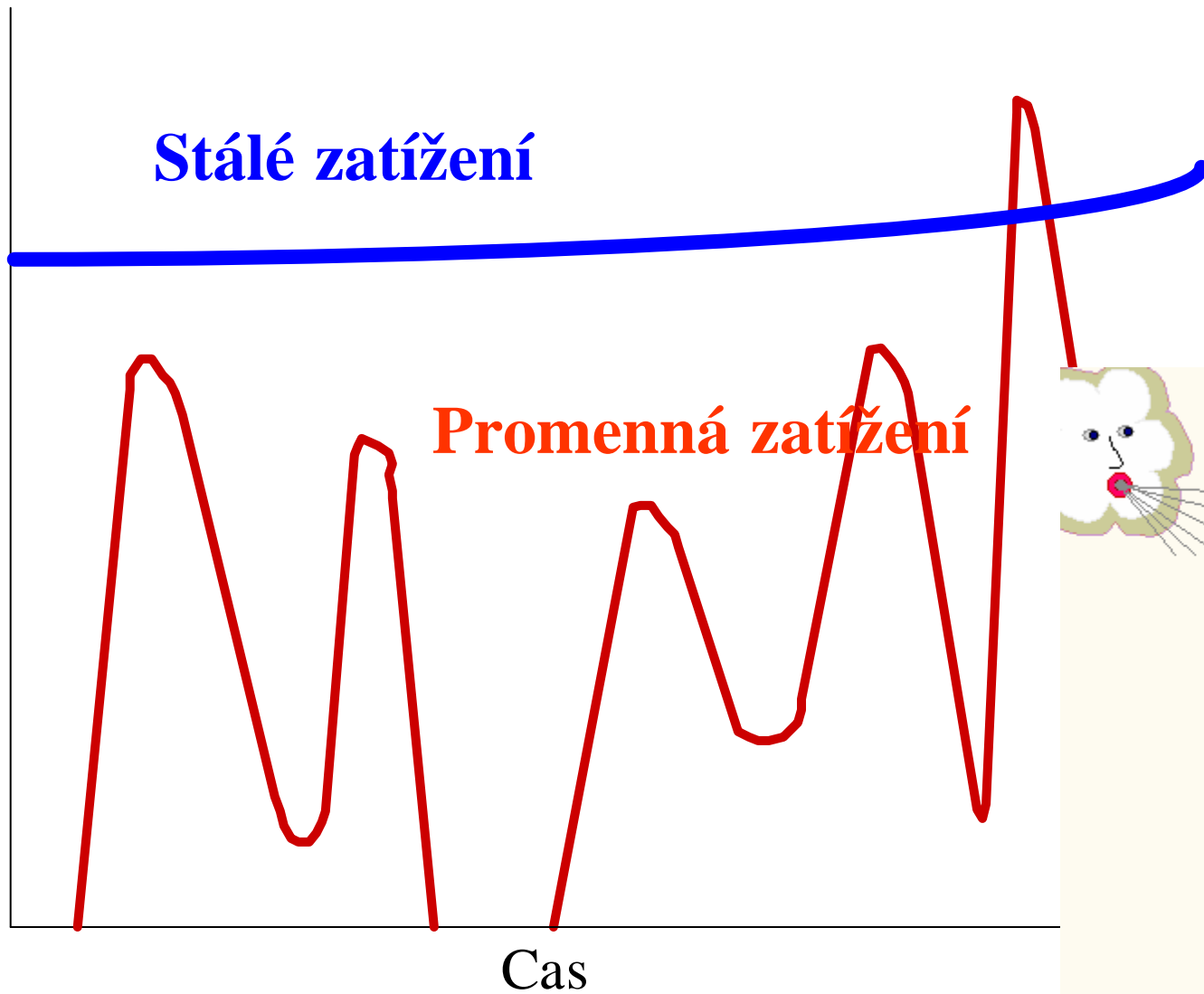
- 
- Vlastní tíha, pevne zabudované součásti
  - Predpetí
  - Zatížení vodou a zeminou
  - Neprímá zatížení, napr. od sedání základu

- Užitná zatížení
- Sníh
- Vítr
- Neprímá zatížení, napr. od teploty

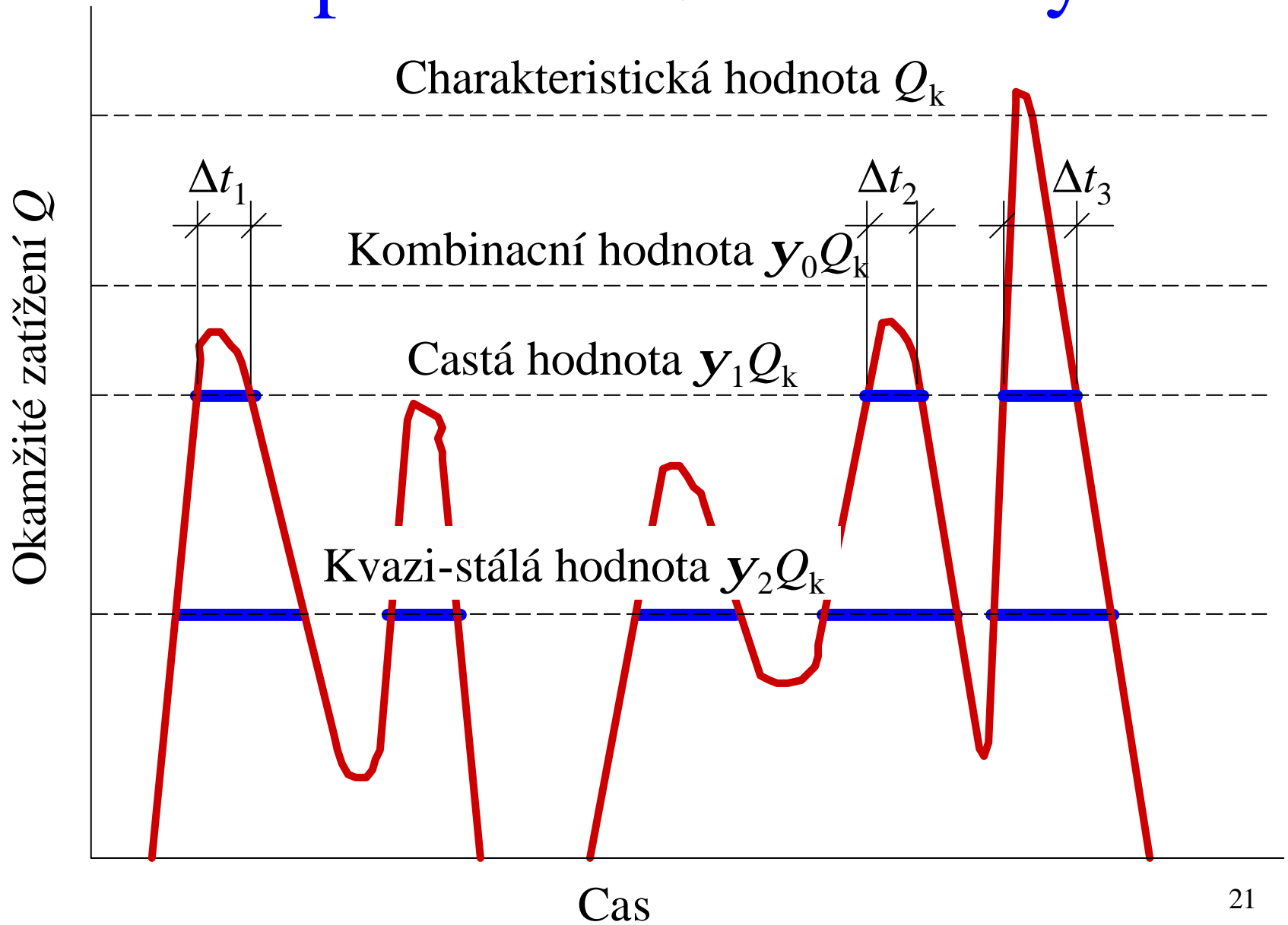
- Výbuch
- Požár
- Náráz vozidel

# Stálé a promenné zatížení

Okamžité zatížení



# Representativní hodnoty



# Reprezentativní hodnoty promenných zatížení

## Kombinací hodnota $y_0 Q_k$

- redukováná pravděpodobnost výskytu  
neprůznivých hodnot několika nezávislých zatížení

## Častá hodnota $y_1 Q_k$

- celková doba je 0.01 referenční doby

## Kvazistálá hodnota $y_2 Q_k$

- celková doba je 0.5 referenční doby

# Soucinitele $y_i$

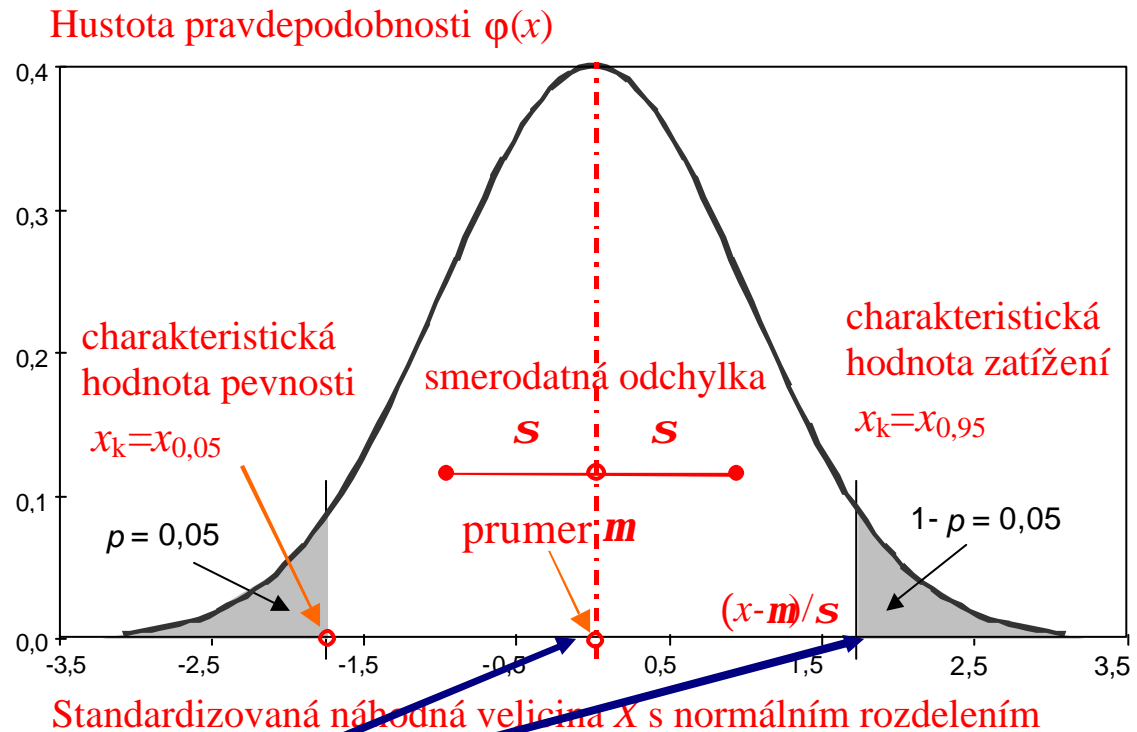
EN 1991-1-1, 2002, tabulka A.1.1

Zatížení	$y_0$	$y_1$	$y_2$
Užitné A, B	0,7	0,5	0,3
Užitné C, D	0,7	0,5	0,6
Užitné E	1,0	0,9	0,8
Sníh	0,7	0,5	0,2
Vítr	0,6	0,2	0,0
Teplota	0,6	0,5	0,0

# Návrhové hodnoty zatížení

Zatížení jsou náhodné veličiny, které se označují symboly

$F$ :  $G, Q, P, g, q, p$



Charakteristické hodnoty  $F_k$ :  $G_k, Q_k, P_k, g_k, q_k, p_k$

Návrhové hodnoty obecně  $F_d = g_F F_k$

Návrhové hodnoty stálých zatížení:  $G_d = g_G G_k$

- promenných zatížení:  $Q_d = g_Q Q_k$  nebo  $Q_d = g_Q y_i Q_k = g_Q Q_{rep}$

kde  $Q_{rep} = y_i Q_k$  označuje reprezentativní hodnotu  $Q$

# Kombinace zatížení v EN 1990

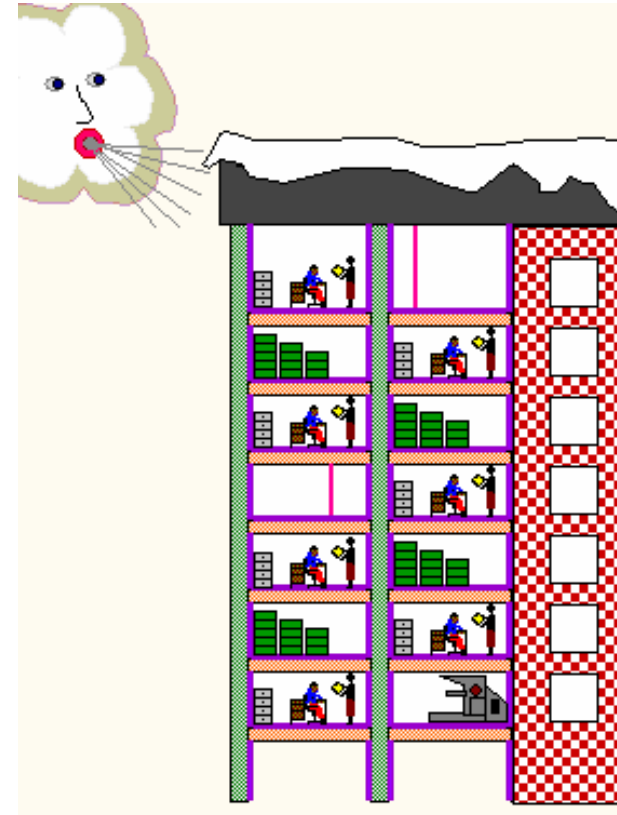
EN 1990, 2002

## Únosnost:

EQU - rovnováha	(6.7)
STR, GEO - konstrukce	(6.10)
Mimorádné kombinace	(6.11)
FAT - únava	

## Použitelnost:

charakteristická - nevratné	(6.14)
castá - vratné	(6.15)
kvazi-stálá - dlouhodobé	(6.16)



# Kombinace pro mezní stavy únosnosti

- Trvalá a prechodná návrhová situace - základní k.

$$\sum_{j \geq 1} \mathbf{g}_{Gj} G_{kj} + \mathbf{g}_P P_k + \mathbf{g}_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \mathbf{g}_{Qi} \mathbf{y}_{0i} Q_{ki} \quad (6.10)$$

- nebo  $\sum_{j \geq 1} \mathbf{g}_{Gj} G_{kj} + \mathbf{g}_P P_k + \sum_{i \geq 1} \mathbf{g}_{Qi} \mathbf{y}_{0i} Q_{ki} \quad (6.10a)$

$$\sum_{j \geq 1} \mathbf{x}_j \mathbf{g}_{Gj} G_{kj} + \mathbf{g}_P P_k + \mathbf{g}_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \mathbf{g}_{Qi} \mathbf{y}_{0i} Q_{ki} \quad (6.10b)$$

- Mimorádná návrhová situace

$$\sum_{j \geq 1} \mathbf{g}_{Gj} G_{kj} + \mathbf{g}_{PA} P_k + A_d + (\mathbf{y}_{11} \text{ nebo } \mathbf{y}_{21}) Q_{k1} + \sum_{i > 1} \mathbf{y}_{2i} Q_{ki} \quad (6.11b)$$

- Seizmická návrhová situace

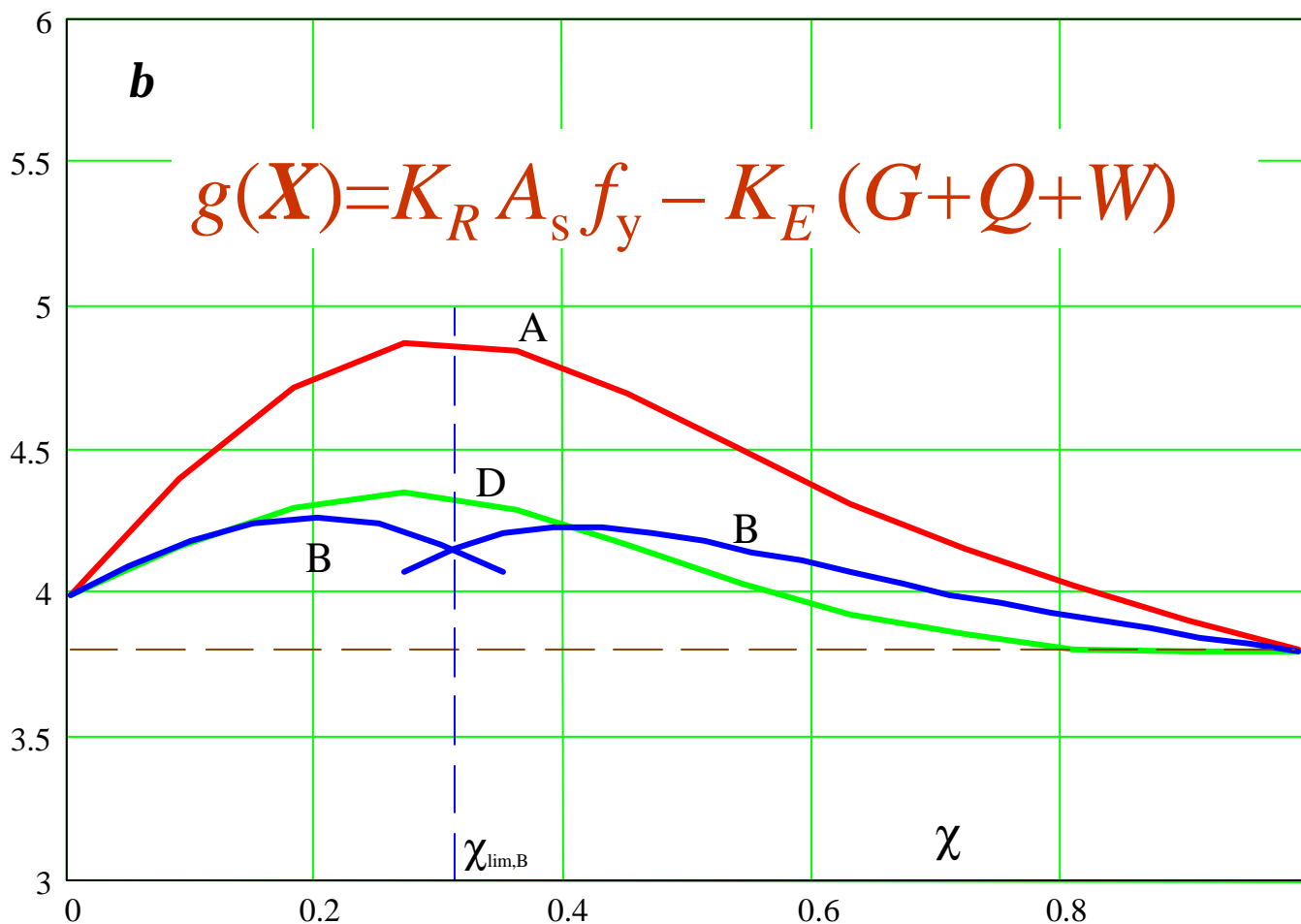
$$\sum_{j \geq 1} \mathbf{g}_{Gj} G_{kj} + P_k + \mathbf{g}_I A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \mathbf{y}_{2i} Q_{ki} \quad (6.12b)$$

# Součinitele $g_G$ a $g_Q$

EN 1990, 2002, tabulky A.1.2

Mezní stav	Účinek zatížení	$g_G$	$g_Q$
A-EQU	Nepríznivý	1,10	1,50
	Príznivý	0,90	0,00
B-STR/GEO	Nepríznivý	1,35	1,50
	Príznivý	1,00	0,00
C-STR/GEO	Nepríznivý	1,00	1,30
	Príznivý	1,00	0,00

# Spolehlivost ocelového prvku



A, B označují kombinace podle EN 1990 ( $g_G = 1,35$ ,  $g_Q = 1,5$ ), D kombinaci A se součinitelem  $g_Q = 1 + 0,5c$ ,  $c = Q_k / (G_k + Q_k)$ .

# Kombinace pro mezní stavy použitelnosti

- Vyjímecná (charakteristická) - trvalé zmeny

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum_{i > 1} y_{0i} Q_{ki} \quad (6.14)$$

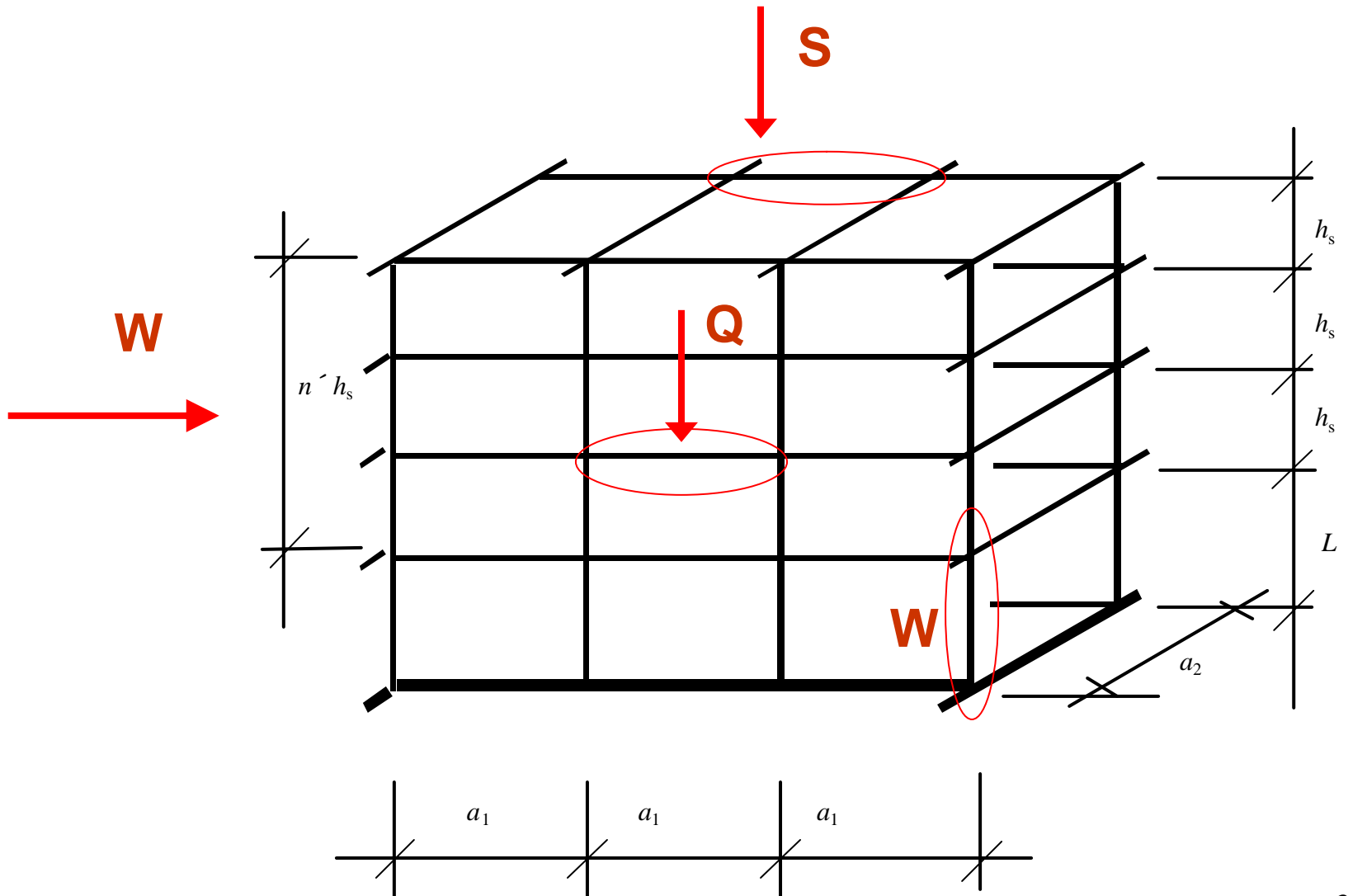
- Castá kombinace - lokální účinky

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + y_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} y_{2i} Q_{ki} \quad (6.15)$$

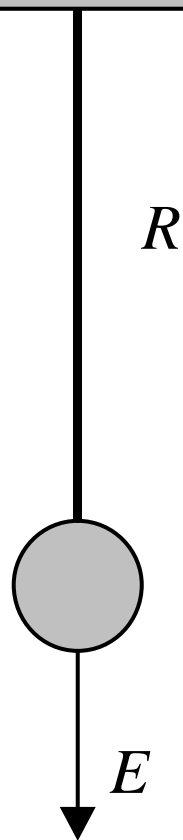
- Kvazistálá kombinace - dlouhodobé účinky

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \sum_{i \geq 1} y_{2i} Q_{ki} \quad (6.17)$$

# Hlavní zatížení



# Príklad ocelového táhla



Úcinek zatížení

Odolnosť

Obecne

$$E = G + Q$$

$$R = A f_y$$

Návrhové  
hodnoty

A:  $E_d = g_G G_k + g_Q Q_k$

$$R_d = A f_{yk} / g_M = A f_{yd}$$

B:  $E_d > x g_G G_k + g_Q Q_k$   
 $> g_G G_k + y_0 g_Q Q_k$

Návrh plochy A

$$E_d < R_d$$



$$A > E_d / f_{yd}$$

**Príklad:**  $g_G = 1,35$  ,  $g_Q = 1,5$  ,  $\xi = 0,85$  ,  $y_0 = 0,7$  ,  $g_M = 1,10$

$G_k = 0,6$  MN,  $Q_k = 0,4$  MN,  $G_k + Q_k = 1,0$  MN

$f_{yk} = 235$  MPa,  $f_{yd} = f_{yk} / g_M = 214$  MPa

A:  $E_d = 1,35 \times 0,6 + 1,5 \times 0,4 = 1,41$  MN

B:  $E_d = 1,35 \cdot 0,6 + 0,7 \times 1,5 \times 0,4 = 1,23$  MN

A:  $A > 1,41 / 214 = 0,00659$  m<sup>2</sup>

B:  $A > 1,23 / 214 = 0,00574$  m<sup>2</sup> (=  $0,87 \times 0,00659$ )

# Návrh geotechnických prvku

EN 1990, 2002, tabulky A.1.2 (B) a (C)

Postup 1. - oddelene soubor B a C pro geotechnické a konstrukční zatížení, obvykle při overování

- konstrukce podle souboru B
- základu podle souboru C

Postup 2. - geotechnické i konstrukční zatížení podle B

**NA: stabilita svahu**

Postup 3. - geotechnické zatížení podle souboru C

- zatížení od konstrukce podle souboru B

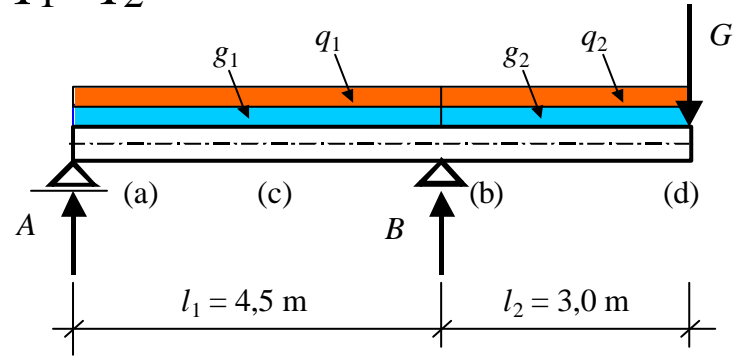
**NA: plošné základy, zemní tlak**

**NA: piloty podle EN 1997-1**

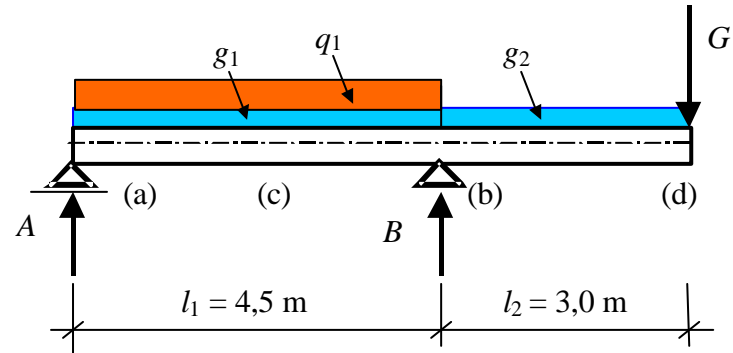
# Konzolový nosník

Zatížení  $g_1, g_2, q_1, q_2, G$

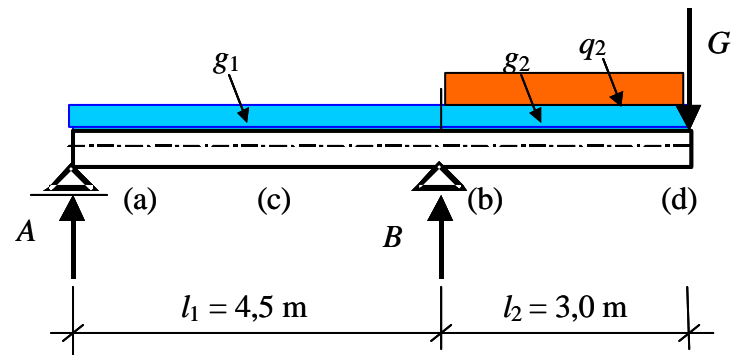
Maximální moment v (b) a reakce  $B$



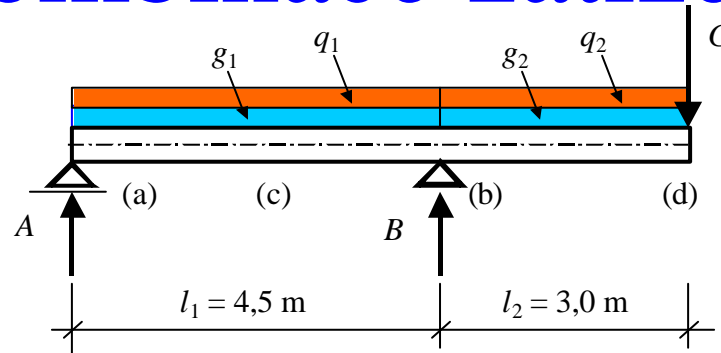
Maximální moment v (c)



Statická rovnováha  
(minimální reakce  $A$ )



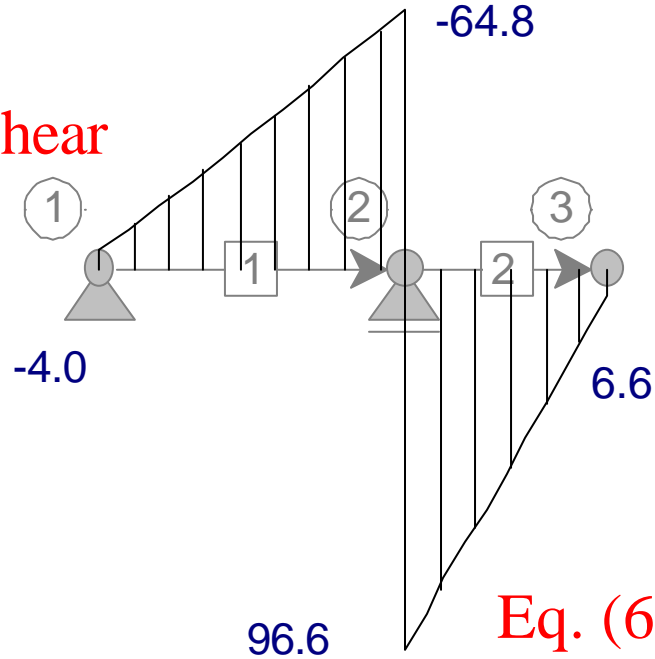
# Kombinace zatížení



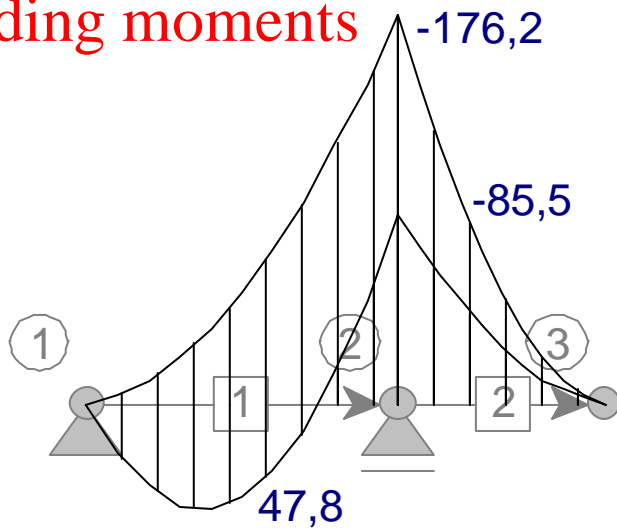
Load case	Limit state	Action				
		$g_1$	$g_2$	$q_1$	$q_2$	$G$
1	Equilibrium, eq. (6.7)	0,90	1,10	-	1,50	1,10
2	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	1,00	1,50	-	1,00
3	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	1,35	-	1,50	1,35
4	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	1,35	1,50	1,50	1,35
5	Ultimate, eq. (6.10a)	1,35	1,00	$1,50 \times 0,7$	-	1,00
6	Ultimate, eq. (6.10b)	$0,85 \times 1,35$	1,00	1,50	-	1,00
7	Ultimate, eq. (6.10a)	1,00	1,35	-	$1,50 \times 0,7$	1,35
8	Ultimate, eq. (6.10b)	1,00	$0,85 \times 1,35$	-	1,50	$0,85 \times 1,35$
9	Serviceability, eq. (6.14)	1,00	1,00	1,00	-	1,00
10	Serviceability, eq. (6.14)	1,00	1,00	-	1,00	1,00
11	Serviceability, eq. (6.15)	1,00	1,00	$1,00 \times 0,5$	-	1,00
12	Serviceability, eq. (6.15)	1,00	1,00	-	$1,00 \times 0,5$	1,00
13	Serviceability, eq. (6.16)	1,00	1,00	$1,00 \times 0,3$	-	1,00
14	Serviceability, eq. (6.16)	1,00	1,00	-	$1,00 \times 0,3$	1,00

# Úcinek zatížení

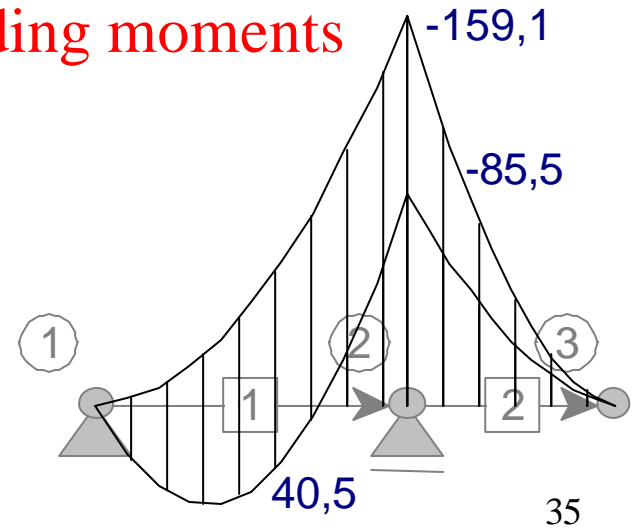
Eq(6.7) - shear



Eq. (6.10)  
bending moments



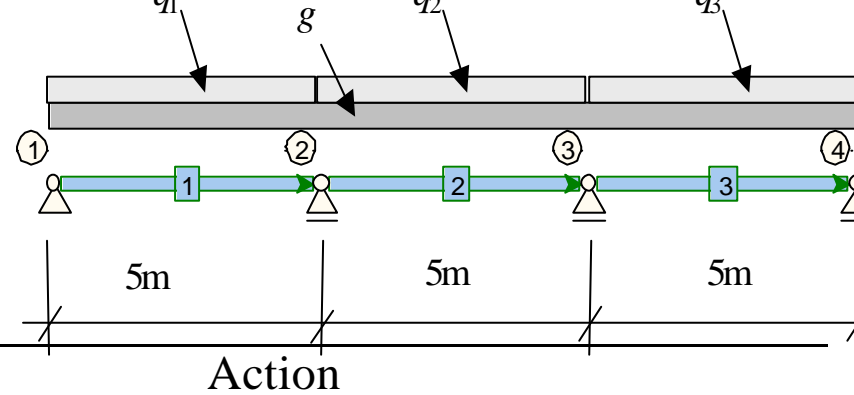
Eq. (6.10a) and (6.10b)  
bending moments



# Závěry

- Metoda dílcích součinitelu je nejdokonalejší operativní metoda navrhování
- Pravděpodobnostní metody umožňují porovnávání, zobecňování a další zdokonalování
- Dosud je spolehlivost prvku z různých materiálu značně nevyrovnaná
- Další kalibrace součinitelu spolehlivosti jsou potřebné
- Ve zvláštních případech je možno aplikovat pravděpodobnostní postupy

# Spojitéy nosník - únosnost



Load case	Limit state	Action			
		$g$	$q_1$	$q_2$	$q_3$
0	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	0	0	0
1	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	1,50	0	0
2	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	1,50	1,50	0
3	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	1,50	0	1,50
4	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	1,50	1,50	1,50
5	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	0	1,50	0
6	Ultimate, eq. (6.10)	1,35	0	1,50	1,50
7	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	0	0	0
8	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	1,50	0	0
9	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	1,50	1,50	0
10	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	1,50	0	1,50
11	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	1,50	1,50	1,50
12	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	0	1,50	0
13	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	0	1,50	1,50
14	Ultimate, eq. (6.10)	1,00	0	0	1,50

# Spojitéý nosník - použitelnost

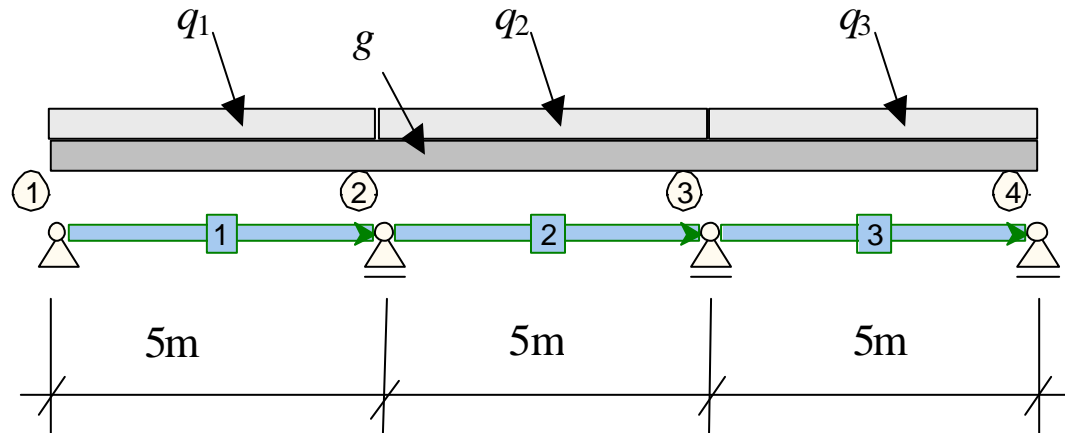
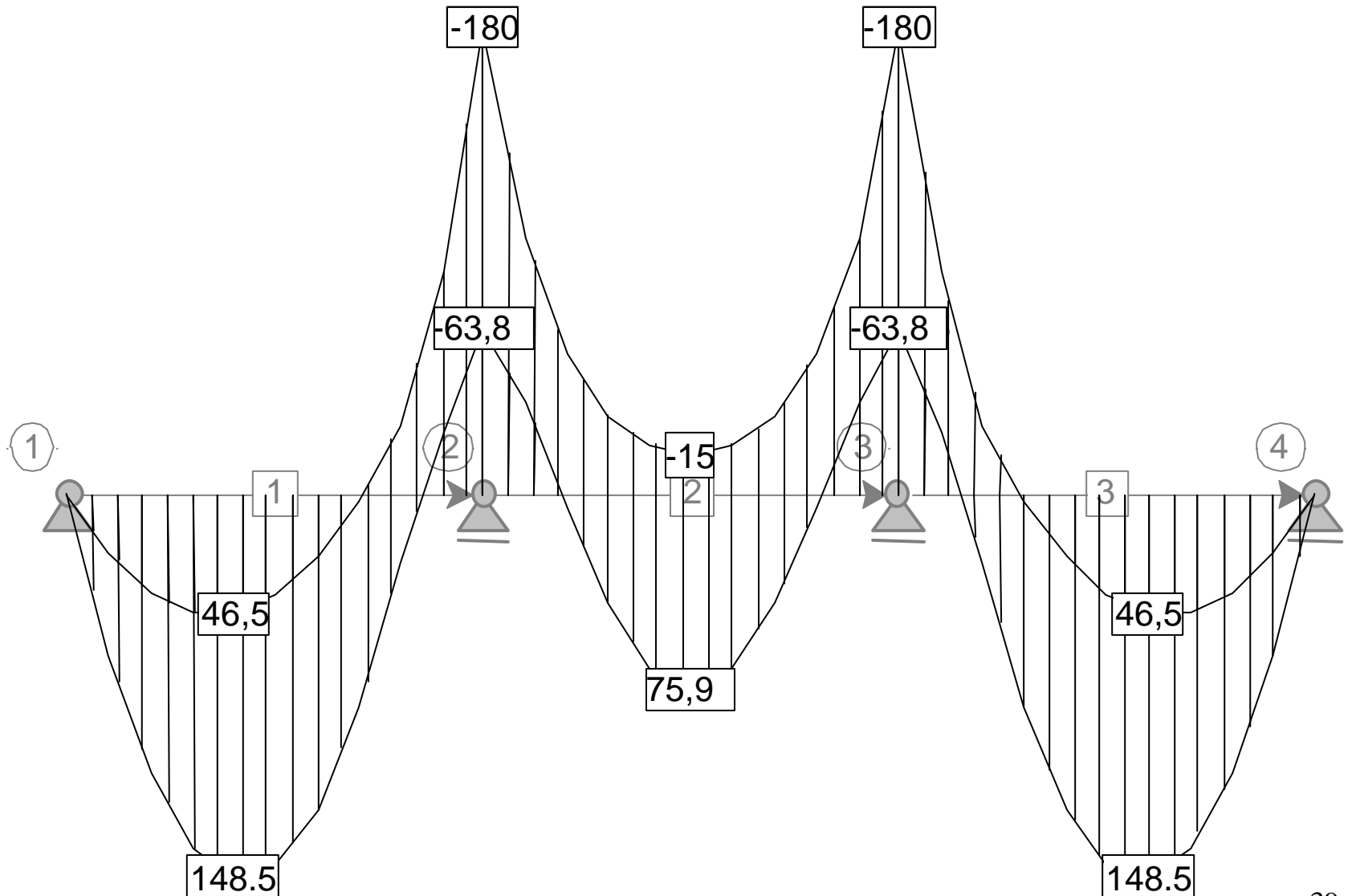


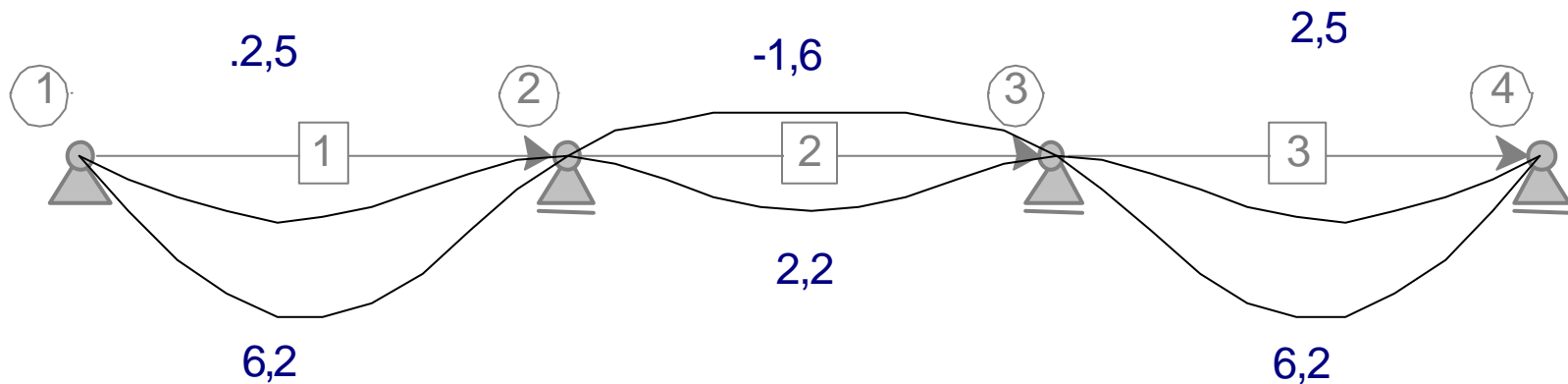
Table 5.2b. Load cases and appropriate factors ( $g \times y$ ) for serviceability limit states.

Load case	Limit state	Action			
		$g$	$q_1$	$q_2$	$q_3$
	Serviceability, eq. (6.14)	1,00	1,00	-	1,00
	Serviceability, eq. (6.14)	1,00	-	1,00	-
	Serviceability, eq. (6.17)	1,00	$1,00 \times 0,3$	-	$1,00 \times 0,3$
	Serviceability, eq. (6.17)	1,00	-	$1,00 \times 0,3$	-

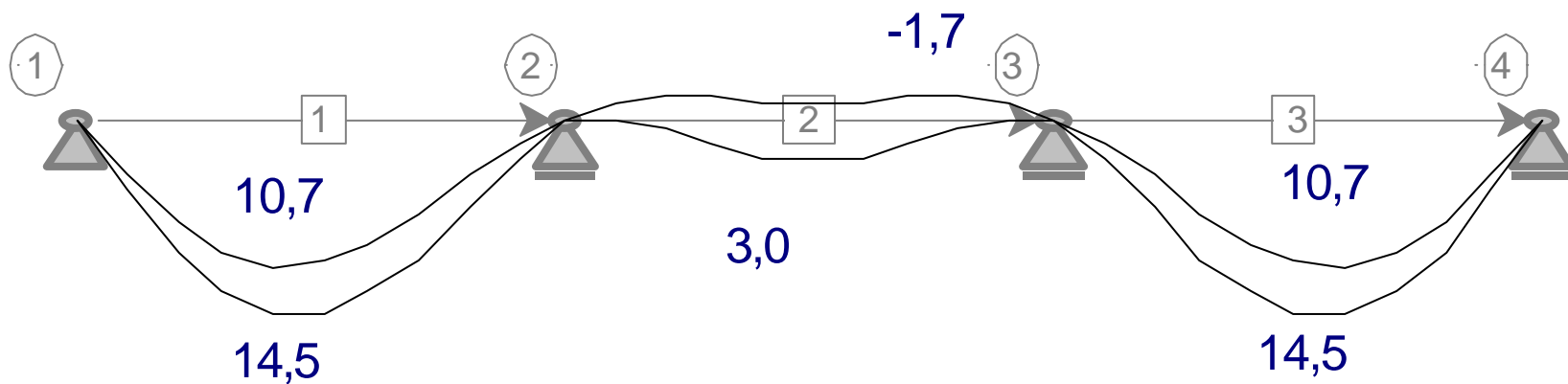
# Ohybový moment



# Pretvorení

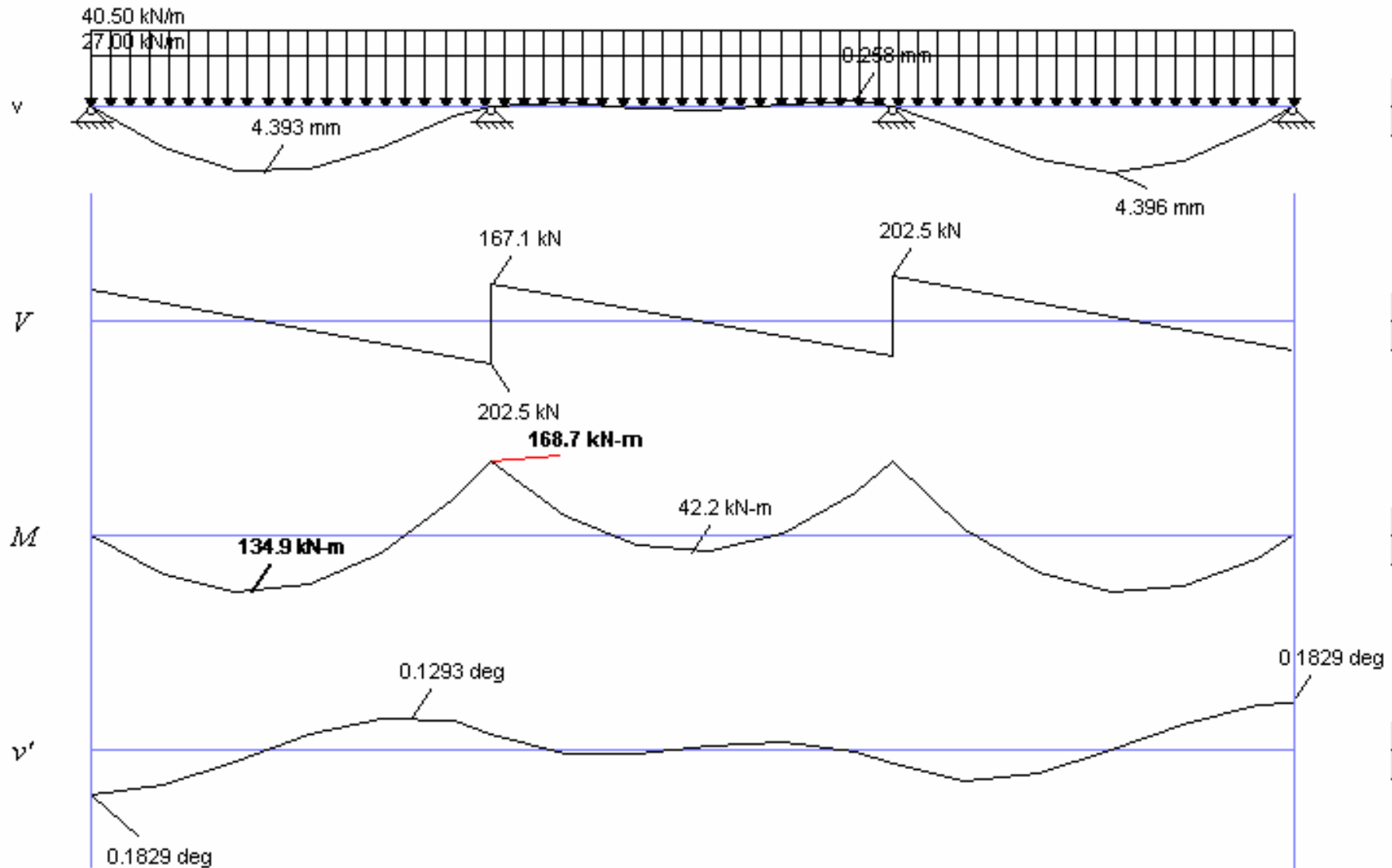


Zatežovací případy 1 a 2



Zatežovací případy 3 a 4

# Lineární řešení a redistribuce



# Redistribuce

