

Detailní pokyny pro vypracování příkladu B (pomůcka ke cvičení BK02)

1) Stanovení krytí – vzhledem k zadanému stupni vlivu prostředí

2) Návrh tloušťky panelu z ohybové štíhlosti $\lambda = \frac{l}{d} \leq \lambda_d$

$$\frac{l}{d} = \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} \cdot \kappa_{c3} \cdot \lambda_{d,tab} \quad \kappa_{c3} \text{ volím 1,2}$$

- pro předběžný odhad vyztužení 0,5 % pro $\lambda_{d,tab}$ (vybrat tabulku pro prostý nosník)

$\lambda_{d,tab}$ **pro prosté nosníky a různé třídy betonu**

ρ [%]	Pevnostní třída betonu								
	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
0,5	14,6	15,8	17,0	18,5	20,5	23,0	25,8	28,8	32,0
1,5	12,2	12,6	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0

$$h = d + \frac{\emptyset}{2} + c_{nom} \text{ (profil výztuže odhadnout 12 mm)}$$

Pro potřeby příkladu snížit výslednou tloušťku panelu o 20 % a zaokrouhlit dolů.

Cílem příkladu je počítat průhyb, proto chceme, aby nevyhověla ohybová štíhlost.

Pro zjednodušení lze v rámci počítat L_2 jako rozpon panelu, není to však správně podle schématu v zadání. Cílem cvičení je návrh panelu na MSÚ a MSP se zaměřením na výpočet průhybu. Pro přesné stanovení rozponu by bylo třeba znát tvar vazníku a detail uložení panelu.

3) Zatížení – do tabulky (charakteristické i návrhové hodnoty): vlastní tíha, g_{ost} , q

Vše počítám na šířku panelu. Pozor na rozlišení:

- výrobní rozměry – počítám pro vlastní tíhu panelu
- modulový rozměr panelu – uvažuji pro ostatní stálé a užité

Pro další výpočet (stupeň vyztužení, moment setrvačnosti,...) budu uvažovat zjednodušené rozměry, tedy nahradím průřez obdélníkem se stranou rovnou kratší základně lichoběžníku.

4) Kombinace zatížení pro MSÚ

Norma umožňuje postupovat dvěma způsoby:

- podle rovnice 6.10: $f_d = 1,35 \cdot (g_{0,k} + g_{ost,k}) + 1,5 \cdot q_k$
- podle rovnic 6.10a a 6.10b: $f_d = \max \left\{ 1,35 \cdot (g_{0,k} + g_{ost,k}) + 1,5 \cdot \psi_0 \cdot q_k \right\}$
 $\left\{ 1,35 \cdot 0,85 \cdot (g_{0,k} + g_{ost,k}) + 1,5 \cdot q_k \right\}$

V rámci cvičení vyčíslit obě varianty a pro další výpočet uvažovat s větší hodnotou z 6.10a a 6.10b (dle normy).

5) Výpočet vnitřních sil – ohybový moment a posouvající síla

6) Návrh ohybové výztuže panelu

Snažit se o ekonomické vyztužení, tedy aby $A_{s,prov}$ bylo co nejblíže $A_{s,req}$.

Pozor, vše se počítá na šířku panelu, tedy i výztuž vyjde do šířky panelu.

7) Posouzení ohybové výztuže železobetonového panelu

- Stupeň vyztužení
- Ohyb
- Smyk

Plný deskový průřez by měl vždy vyjít jako prvek bez smykové výztuže (kromě extrémně velkého zatížení u podpor). Pozor, neplatí pro vylehčené průřezy, tam je třeba smyk ověřovat vždy!

8) Skica tvaru a vyztužení – v měřítku obrázků do statického výpočtu

9) Kombinace zatížení pro MSP – charakteristická, častá a kvazi-stálá

- charakteristická kombinace (index „k“) $f_k = (g_{0,k} + g_{ost,k}) + q_k$
- častá (frequent – index „f“) $f_f = (g_{0,k} + g_{ost,k}) + \psi_1 q_k \quad (\psi_1 = 0,5)$
- kvazi-stálá (quasi-permanent – index „qp“) $f_{qp} = (g_{0,k} + g_{ost,k}) + \psi_2 q_k \quad (\psi_2 = 0,3)$

Spočítat ohybové momenty pro jednotlivé kombinace.

10) Průřezové charakteristiky ideálního průřezu

Pro posuzování prvku z hlediska MSP si nejprve stanovíme základní průřezové charakteristiky, které budeme v dalších výpočtech potřebovat. Jelikož se železobetonový prvek skládá ze dvou materiálů s rozdílnými pevnostními a přetvárnými charakteristikami, je nutné jej převést na tzv. ideální průřez.

Veličiny ve výpočtu označujte pro lepší orientaci indexy; I pro veličinu bez trhlin, II pro veličinu s trhlinami, st pro krátkodobé působení (short term), lt pro dlouhodobé působení (long term).

a) Působení prvku při krátkodobém zatížení ($\varphi = 0$):

- Efektivní modul pružnosti betonu $E_{c,eff}$ při krátkodobém působení zatížení odpovídá $E_{c,m}$
- Pracovní součinitel $\alpha_{e,st} = \frac{E_s}{E_{c,eff,st}}$
- Výška tlačené oblasti ideálního průřezu bez trhlin $x_{i,I,st}$ ze součtové podmínky rovnováhy

$$F_{cc} = F_{ct} + F_s \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2} b \cdot x_{i,I,st} \cdot \sigma_{cc} = \frac{1}{2} b \cdot (h - x_{i,I,st}) \cdot \sigma_{ct} + A_s \cdot \sigma_s$$

$$\text{Kde z podobnosti trojúhelníků platí: } \sigma_{cc} = \sigma_{ct} \cdot \frac{x_{i,I,st}}{h - x_{i,I,st}} \quad \sigma_s = \sigma_{ct} \cdot \alpha_e \frac{d - x_{i,I,st}}{h - x_{i,I,st}}$$

$$\text{Potom: } \frac{1}{2} b \cdot x_{i,I,st}^2 = \frac{1}{2} b \cdot (h - x_{i,I,st})^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x_{i,I,st})$$

- Vzdálenost $a_{i,I,st} = x_{i,I,st} - \frac{h}{2}$ pro Steinerův doplněk
- Moment setrvačnosti ideálního průřezu bez trhlin při krátkodobém působení k těžišti:

$$I_{y,I,st} = \frac{1}{12} b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot a_{i,I,st}^2 + \alpha_e \cdot A_{s,prov} \cdot (d - x_{i,I,st})^2$$

- Ohybový moment na mezi vzniku trhlin M_{cr} $M_{cr,st} = f_{ctm} \cdot \frac{I_{y,I,st}}{h - x_{i,I,st}}$

Po překročení tohoto momentu momentem od zatížení budou v železobetonovém prvku vznikat trhliny. Jelikož vznik trhlin je proces jednorázový a nevratný, bude pro jeho ověření užita charakteristická kombinace zatížení. $M_k > M_{cr} \quad \rightarrow \quad \text{Trhliny budou vznikat}$

- Výška tlačené oblasti ideálního průřezu s trhlinami z rovnosti statických momentů

$$x_{i,II,st} = \frac{\alpha_{e,st} \cdot A_s}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\alpha_{e,st} \cdot A_s}} \right)$$

- Moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami při krátkodobém působení k jeho těžišti:

$$I_{y,II,st} = \frac{1}{3} b \cdot x_{i,II,st}^3 + \alpha_{e,st} \cdot A_s \cdot (d - x_{i,II,st})^2$$

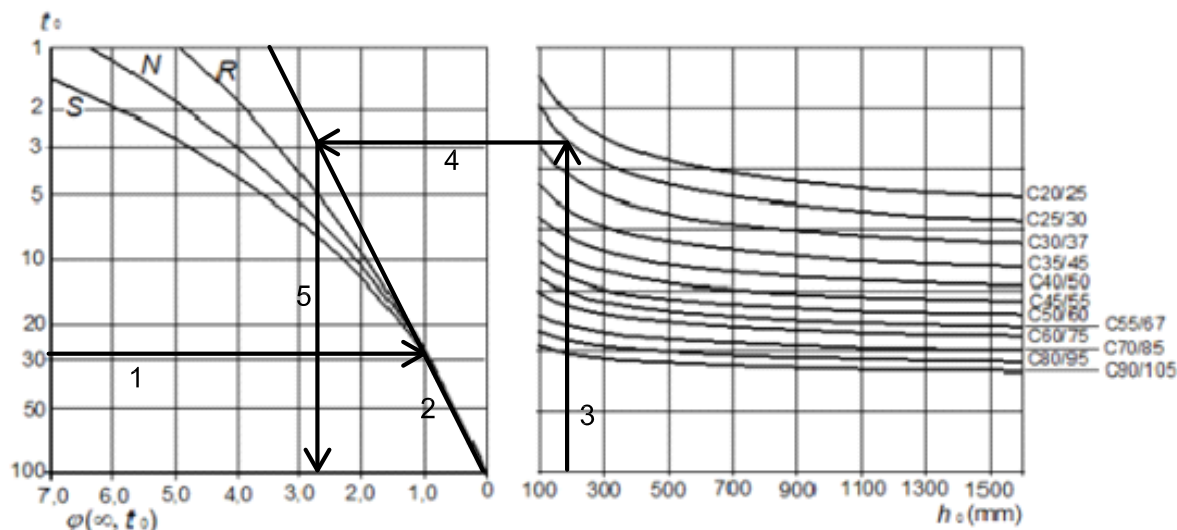
b) Působení prvku při dlouhodobém zatížení

- Stanovit si součinitel dotvarování φ
(Při dlouhodobém působení zatížení se uplatní dotvarování betonu)

Postup pro stanovení součinitele dotvarování:

1. Na „levém“ grafu je v odpovídající úrovni t_0 (v tomto případě 28 dní) vedena vodorovná přímka, dokud neprotne křivku třídy cementu S, N, nebo R (v tomto případě R).
2. Místem průniku je vedena sečna vycházející z nulové hodnoty součinitele dotvarování.

3. Na „pravém“ grafu je vertikálně vynesena hodnota jmenovitého rozměru h_0 dokud neprotne křivku odpovídající dané třídě betonu (C 25/30). $h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$
4. Z místa průniku je vedena horizontální příčka tak aby protнула sečnu vytvořenou v druhém kroku.
5. Z tohoto bodu je pak spuštěna kolmice, která v místě křížení s osou φ udává hodnotu součinitele dotvarování.



- Efektivní modul pružnosti betonu $E_{c,eff}$ při dlouhodobém působení zatížení: $E_{c,eff,lt} = \frac{E_{cm}}{1+\varphi}$
- Pracovní součinitel $\alpha_{e,lt} = \frac{E_s}{E_{c,eff,lt}}$
- Průřez bez trhlin výška tlačené oblasti $x_{i,I,lt}$ a moment setrvačnosti $I_{y,I,lt}$ – analogicky jako u krátkodobého působení s využitím $E_{c,eff,lt}$ a $\alpha_{e,lt}$
- Ohybový moment na mezi vzniku trhlin $M_{cr,lt}$ $M_{cr,lt} = f_{ctm} \cdot \frac{I_{y,I,lt}}{h - x_{i,I,lt}}$
- Pokud $M_k > M_{cr,lt}$ → **Trhliny budou vznikat**
- Výška tlačené oblasti $x_{i,II,lt}$ a moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami $I_{y,II,lt}$ – opět analogicky jako u krátkodobého působení

Pro přehlednost a následné výpočty si vytvořit souhrnnou tabulku s výsledky.

11) Posouzení z hlediska MSP – omezení napětí

- Tahové napětí v oceli σ_s při charakteristické kombinaci zatížení musí být menší než $0,8f_{yk}$

$$\sigma_s = \alpha_e \cdot \frac{M_k}{I_{y,II,st}} \cdot (d - x_{i,II,st})$$

- Tlakové napětí v betonu σ_{cc} při charakteristické kombinaci musí být menší než $0,6f_{ck}$

$$\sigma_{cc} = \frac{M_k}{I_{y,II,st}} \cdot x_{i,II,st} \text{ (podélné trhliny)}$$

- Tlakové napětí v betonu σ_{cc} při kvazi-stálé kombinaci musí být menší než $0,45f_{ck}$

$$\sigma_{cc} = \frac{M_{qp}}{I_{y,II,lt}} \cdot x_{i,II,lt} \text{ (lineární dotvarování)}$$

12) Posouzení z hlediska MSP – šířka trhlin

- Minimální plocha vyztužení z hlediska šířky trhlin

$$A_{s,min} = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s}$$

$k_c = 0,4$ pro nepředepnutý prvek; $k=1,0$; $f_{ct,eff} = f_{ctm}$;

A_{ct} je plocha betonu v tažené oblasti průřezu

σ_s stanovím z tabulek 1 a 2 pro maximální průměr prutu použitý v konstrukci a pro vzdálenost prutů – uvažuji menší hodnotu napětí, nebo odhadnu

- Omezení šířky trhlin bez výpočtu

Výpočet stanovení šířky trhliny je relativně náročný, proto norma umožňuje přibližné posouzení podle tabulek, které vycházejí z těchto výpočtů. Pro výztuž navrženou s přihlédnutím k meznímu stavu únosnosti mají být, s ohledem na přibližné posouzení podle tabulek, splněny buď požadavky na průměr výztužných vložek, nebo na jejich vzdálenost. Napětí v oceli se uvažuje na průřezích s trhlínami při příslušné kombinaci zatížení. Pokud nejsou požadavky na vzdálenost výztuže, případně jejich průměr splněny, je třeba kontrolovat šířku trhlin výpočtem, nebo upravit výztuž tak, aby požadavky podle tabulek byly splněny.

Pro ověření mezního stavu šířky trhlin je třeba vypočítat napětí ve výztuži při kvazi-stálé kombinaci zatížení.

$$\sigma_s = \alpha_{e,lt} \cdot \frac{M_{qp}}{I_{y,II,lt}} \cdot (d - x_{i,II,lt})$$

Tab. 1 Maximální průměr prutů ϕ_s^* pro omezení šířky trhlin

Napětí ve výztuži ² [MPa]	Maximální průměr prutu [mm]		
	w _k = 0,4 mm	w _k = 0,3 mm	w _k = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-
POZNÁMKA 1. Hodnoty v tabulce vycházejí z následujících předpokladů: c = 25mm; f _{ct,eff} = 2,9MPa; h _{cr} = 0,5h; (h-d) = 0,1h; k ₁ = 0,8; k ₂ = 0,5; k _c = 0,4; k = 1,0; k _t = 0,4 and k' = 1,0 2. Při odpovídající kombinaci účinků zatížení			

Tab. 2 Maximální vzdálenost prutů pro omezení šířky trhlin

Napětí ve výztuži ² [MPa]	Maximální vzdálenost prutů [mm]		
	w _k =0,4 mm	w _k =0,3 mm	w _k =0,2 mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-
Poznámky jsou vysvětleny pod tabulkou 1 výše.			

13) Ověření vymezení ohybové štíhlosti $\lambda = \frac{l}{a} \leq \lambda_d$

Oproti bodu 2 tohoto postupu je třeba zpřesnit množství výztuže pro stanovení κ_{c3} a $\lambda_{d,tab}$ (pro mezilehlé hodnoty stupně vyztužení interpolovat).

Vzhledem k umělému zmenšení tloušťky panelu by nemělo vyhovět. → Konstrukci je nutné posoudit na průhyb. (I pokud vyhoví, průhyb se v rámci cvičení bude počítat.)

14) Výpočet průhybu

Průhyby stanovují z křivosti, mohou pak jednotlivé fenomény snadno sčítat.

Požadavky na průhyb:

- Dlouhodobý průhyb při kvazi-stálá kombinace $f_{qp,lim} = l/250$
- Dlouhodobý průhyb s přírůstkem okamžitého zatížení na hodnotu časté kombinace (požadavek investora) $f_{f,lim} = l/200$

- a. **Průhyb při krátkodobém zatížení** – spočítám si poddajnosti průřezu s trhlinami a bez trhlin a nakombinuji pomocí součinitele vyjadřující tahové zpevnění (dzéta)

$$C_{I,st} = \frac{1}{E_{c,eff,st} \cdot I_{y,I,st}} \quad C_{II,st} = \frac{1}{E_{c,eff,st} \cdot I_{y,II,st}}$$

$$\zeta_{st} = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^2 \quad \beta = 1 \text{ pro krátkodobé působení}$$

Pozor, jde o vznik trhlin, tedy nevratný jev, proto uvažuji charakteristickou kombinaci zatížení (trhliny, pokud jednou vzniknou už nezmizí!)

Křivost krátkodobá – kvazi-stálá kombinace: $\left(\frac{1}{r_m} \right)_{qp,st} = M_{qp} [(1 - \zeta_{st}) \cdot C_{I,st} + \zeta_{st} \cdot C_{II,st}]$

Křivost krátkodobá – častá kombinace: $\left(\frac{1}{r_m} \right)_{f,st} = M_f [(1 - \zeta_{st}) \cdot C_{I,st} + \zeta_{st} \cdot C_{II,st}]$

Zajímá nás přírůstek křivosti (a následně průhybu), který vznikne navýšením zatížení z kvazi-stálé kombinace na častou kombinaci. Krátkodobý přírůstek je dán rozdílem krátkodobé křivosti od požadované kombinace zatížení (v tomto případě časté) a krátkodobé křivosti od kvazi-stálé kombinace.

$$\left(\frac{1}{r_m} \right)_{st,1} = \left(\frac{1}{r_m} \right)_{f,st} - \left(\frac{1}{r_m} \right)_{qp,st}$$

- b. **Průhyb při dlouhodobém zatížení** – spočítám si poddajnosti průřezu s trhlinami a bez trhlin (viz a. s použitím dlouhodobých hodnot) a nakombinuji pomocí součinitele vyjadřující tahové zpevnění (dzéta)

$$\zeta_{lt} = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^2 \quad \beta = 0,5 \text{ pro dlouhodobé působení}$$

Křivost dlouhodobá – kvazi-stálá kombinace: $\left(\frac{1}{r_m} \right)_{qp,lt} = M_{qp} [(1 - \zeta_{lt}) \cdot C_{I,lt} + \zeta_{lt} \cdot C_{II,lt}]$

- c. **Průhyb od smršťování** – viz pomůcka „Výpočet křivosti od smršťování“

Stanovím celkový dlouhodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace zatížení a porovnám s $f_{qp,lim}$

Stanovím dl. průhyb s přírůstkem okamžitého zatížení na častou kombinaci a porovnám s $f_{f,lim}$

Výpočet průhybu: $f_X = k \cdot l^2 \cdot \left(\frac{1}{r_m} \right)_X$

15) Závěr:

- a. Tabulka – porovnání základních parametrů krátkodobého a dlouhodobého průhybu od kvazistálé kombinace zatížení
- b. Graf – graf závislosti momentu na křivosti pro krátkodobý i dlouhodobý průhyb s vyznačenými limitními hodnotami