

Diagram vykrytí tahových sil v softwaru RIBtec FERMO optimální podpora při návrhu předpětí a dodatečné výztuže

Ve starší generaci softwaru na výpočty předpjatých prefabrikátů (RIBtec RTfermo) se pro návrh množství a úrovně předpětí a množství dodatečné betonářské výztuže používají funkce vyhodnocení časových a místních průběhů elastických (tj. bez zohlednění vzniku trhlin) napětí v betonu a ve výztuži.

Tento způsob podpory návrhu předpětí a výztuže byl v nové generaci softwaru **RIBtec FERMO**, na doporučení a žádost významných výrobců předpjatých prefabrikátů, **nahrazen** tzv. **diagramem vykrytí tahových sil**. Výhodou diagramu vykrytí tahových sil, oproti pracnějšímu vyhodnocování napětí v betonu a ve výztuži, je jeho názornost, spočívající v rychlé, snadné grafické interpretaci využití předpjeté a betonářské výztuže, zobrazení jejich vzájemného podílu na splnění podmínek návrhu, a tedy v okamžitém posouzení hospodárnosti a případných rezerv.

Všeobecně k diagramu vykrytí tahových sil

Průběh vykrytí tahových sil je nejdůležitější pomůckou optimalizace množství předpjeté a dodatečné betonářské výztuže. Tento diagram obsahuje více průběhů tahových sil.

- obálku působících tahových sil na MSÚ (světle modrá plocha);
- obálku působících tahových sil na MSÚ se zohledněním pravidla posunu (tmavomodrá plocha nad světle modrou plochou);
- efektivní vykrytí tahových sil předpětím ve formě, se zohledněním kotevních oblastí, tj. přenosových a kotevních délek (červená tečkovaná čára);
- navýšení vykrytí tahových sil dodatečnou betonářskou výztuží z návrhu výztuže na MSÚ (červená čárkovaná čára);
- navýšení působících tahových sil z návrhů na MSP a MS únavy, které je nutné vykryt dodatečnou betonářskou výztuží.





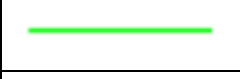
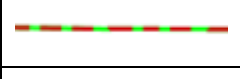
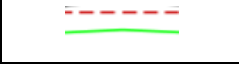
nut.Z(M)		tahy na MSÚ, průběh M_{Ed}/z
nut.Z(M)		tahy na MSÚ se zohledněním pravidla posunu
stáv.Z(P)		efektivní vykrytí tahů předpětím ve formě
stáv.Z(P+S)		součet vykrytí tahů předpjetou a betonářskou výztuží
nut.Z(all)		navýšení tahů z návrhů na MSP a MS únavy
vzájemná poloha průběhů vůči sobě		nut.Z(all) = stáv.Z(P+S): působící tahové síly jsou plně vykryty stávající výztuží
		nut.Z(M) > stáv.Z(P+S): stávající výztuž nedostačuje



Diagram vykrytí tahových sil nezohledňuje přídatky výztuže plynoucí z případných prostupů a ozubů

Pravidlo posunu, které je automaticky zohledněno v průběhu působících tahových sil posouvá vykryvaný průběh tahů o hodnotu a_l a stanovuje se u nosníků namáhaných posouvající silou následovně:

$$a_l = \frac{M_{Ed}}{z} + \frac{V_{Ed}}{2} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha)$$

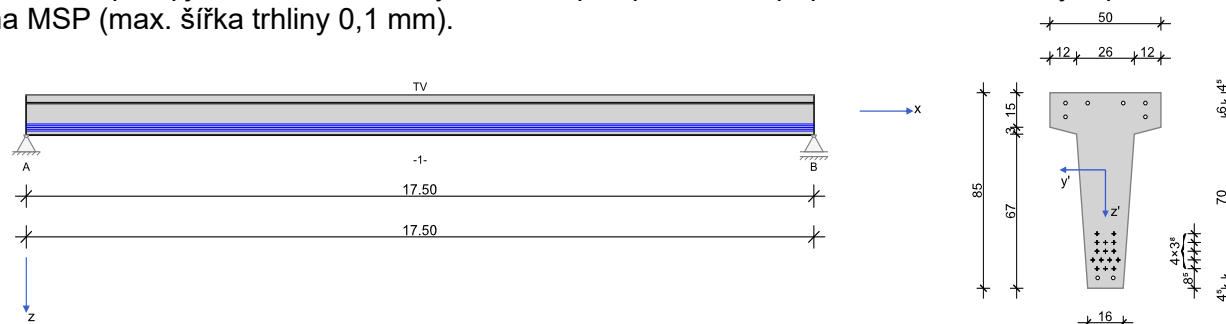
Práce s diagramem vykrytí tahových sil

Vyztužení prvků musí být takové, aby byly v celkovém úhrnu obálky všech působících tahových sil vykryté vložení předpjaté a betonářské výztuže. Úkolem projektanta-statika je, mj. a s ohledem na požadavky technologie výroby, nalezení optimálního poměru mezi předpjatou a dodatečnou betonářskou výztuží vykryvajícími veškeré působící tahy. Toho lze dosáhnout zpravidla po několika málo ručních, iteračních krocích, úpravách vstupních parametrů řešeného projektu FERMO.

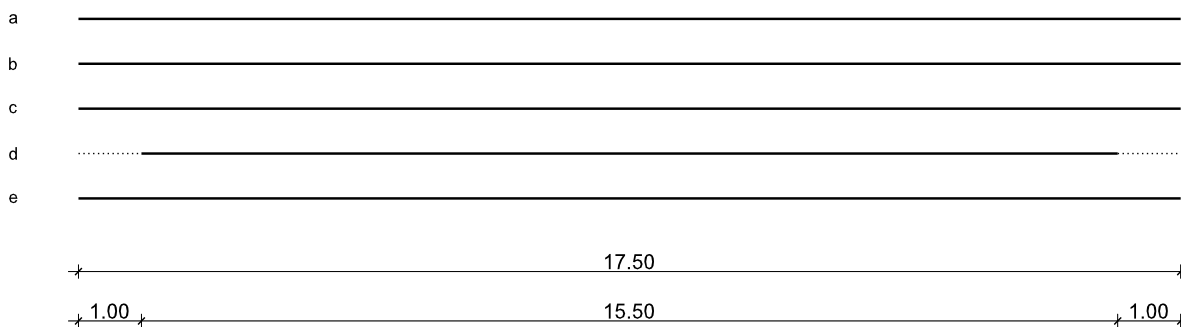
Návrh prvku bez přímého zadání dodatečné betonářské výztuže je sice možný, avšak u předpjatých prefabrikátů obvykle nevede na optimální výsledek. Přesné zadání uspořádání betonářské výztuže a předpjaté výztuže mají ze statického a ekonomického hlediska rozhodující význam.

Příklady a interpretace diagramu vykrytí tahových sil pro různé poměry vyztužení

Následující, jednoduchý příklad řešení vaznice (vstupní soubor *VykrytiTahu.Ferx* ke stažení z <http://d.rib.cz/RIBTEC/down/VykrytiTahu.Ferx>) demonstruje možné praktické případy a interpretaci diagramu vykrytí tahových sil. Jednotlivé varianty řešení se od sebe navzájem liší pouze zadaným množstvím předpjaté a betonářské výztuže, resp. v posledním případě navíc zostřeným požadavkem na MSP (max. šířka trhliny 0,1 mm).



Předpjatá výztuž



Materiál

Beton

E_{cm}	Střední modul pružnosti	γ	Specifická tíha
ν	Poissonovo číslo	α_T	Teplotní součinitel
f_{ck}	Charakteristická válcová tlaková pevnost	ϵ_{c2}	Stlačení betonu při max. napětí
f_{cm}	Střední hodnota tlakové pevnosti betonu	ϵ_{cu2}	Výpočetní tlaková pevnost
f_{cd}	Návrhová hodnota tlakové pevnosti betonu	α_{cc}	Dlouhodobé účinky na tlakovou pevnost betonu
f_{ctm}	Střední hodnota betonu na centrický tah	α_{ct}	Dlouhodobé účinky na tahovou pevnost betonu
γ_c	Dílčí součinitel bezpečnosti pro beton		

Beton	E_{cm} [N/mm ²]	f_{ck} [N/mm ²] f_{cm} [N/mm ²]	f_{cd} [N/mm ²] f_{ctm} [N/mm ²]	ϵ_{c2} [‰] ϵ_{cu2} [‰]	Kamenivo Cement	γ_c	α_{cc} α_{ct}	γ [kN/m ³] α_T [1/K]
C60/75	39100 0.20	60.0 68.0	40.0 4.4	-2.3 -2.9	Quarzit 32,5 R	1.50	1.00 1.00	25.0 1.0E-05

Betonářská výztuž

E_s	Modul pružnosti	γ	Specifická tíha
f_{yk}	Charakteristická hodnota meze kluzu	ϵ_{ud}	Mez přetvoření k návrhové hodnotě
f_{tk}	Charakteristická hodnota tahové pevnosti	Duktilita	Zařazení do třídy duktility
f_{yd}	Návrhová hodnota meze kluzu	Diagram	S rostoucí pevností, dle kap. 3.3.6 (7)
γ_s	Dílčí součinitel bezpečnosti pro betonářskou výztuž	$\Delta\sigma_{RSK\ d\leq 28}$	Únavový rozkmit (N^*) pro $d \leq 28$ mm
		$\Delta\sigma_{RSK\ d>28}$	Únavový rozkmit (N^*) pro $d > 28$ mm

Betonářská výztuž	E_s [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²] f_{tk} [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	ϵ_{ud} [%o]	Duktilita Diagram	γ_s	$\Delta\sigma_{RSK\ d\leq 28}$ $\Delta\sigma_{RSK\ d>28}$	γ [kN/m ³]
B500S	200000	500 540	435	25.0	B (vysoká) ja	1.15	162.5 162.5	78.5

Předpjatá výztuž

f_{pk}	Jmenovitá pevnost předpjaté výztuže	\emptyset	Průměr kanálku - vnitřní, vnější [mm]
$f_{p,0.1k}$	Mez kluzu 0,1 Pevnost předpjaté výztuže	k	Nežádoucí radiální úhel
γ_p	Dílčí součinitel spolehlivosti předpjaté výztuže	μ	Součinitel tření předpínací kabel - kanálek
$f_{p,0.1d}$	Návrhová mez tažnosti 0.1	s	Pokluz v kotvách
$\Delta\sigma_{RSK(N^*)}$	Únavový rozkmit (N^*)	R_{min}	Min. poloměr křivosti
E_p	E-Modul předpjaté výztuže	σ_{po}/f_{pk}	Relaxační parametry pro 1000h po dopnutí

Pracovní diagram napětí-přetvoření UVAŽUJE s rostoucí pevností dle kap. 3.3.6 (7).

Předpjatá výztuž	Druh/Typ Soudržnost	$f_{p01,k}$ $f_{p01,d}$	f_{pk} f_{pd}	E_p $\Delta\sigma_{RSK(N^*)}$	γ_{inf} γ_{sup}	γ_p l_{pt} [m]	\emptyset_{int} \emptyset_{out}	k [°/m] μ	s [mm] R_{min} [m]	σ_{po}/f_{pk}		
										60%	70%	80%
ST1570/1770	Lana okamžitá	1560 1357	1770 1539	195000 185	0.95 1.05	1.15 0.70	0 0	0.00 0.00	0.0 0.0	1.0	2.5	4.5

Příklad 1: optimální řešení

Zadaná výztuž

Podélná výztuž

Výztuž horní		Výztuž dolní	
HH-dobeton	HH dobetonávky	HH-DP*	HH dolní pásnice prefabrikátu
HH-prefa	HH prefabrikátu	DH-prefa	DH prefabrikátu
DH-HP*	DH horní pásnice prefabrikátu	Typ	Typ výztuže var / fix*
e	Rozteče prutů vztažené k ose symetrie	x_z-x_k	Oblast rozmístění
*	fix: vrstvy výztuže se v návrhu sice zohledňují, avšak nenavvyšují, a to ani v režimu "Návrh"		
var: výztuž se v režimu "Návrh" navrhuje a vrstvy výztuže se stejnou referencí se vnitřně slučují do jedné vrstvy v težišti slučovaných vrstev			

Vrstva	Počet	\emptyset_s [mm]	A_s [cm ²]	Typ	e [cm]	z [cm]	z od reference	x_z [m]	x_k [m]
1	2	16	4.02	var	36.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
2	2	16	4.02	fix	36.0	4.5	DH horní pásnice	0.000	17.500
3	2	16	4.02	var	16.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
4	2	16	4.02	var	7.0	4.5	DH prefabrikátu	0.000	17.500

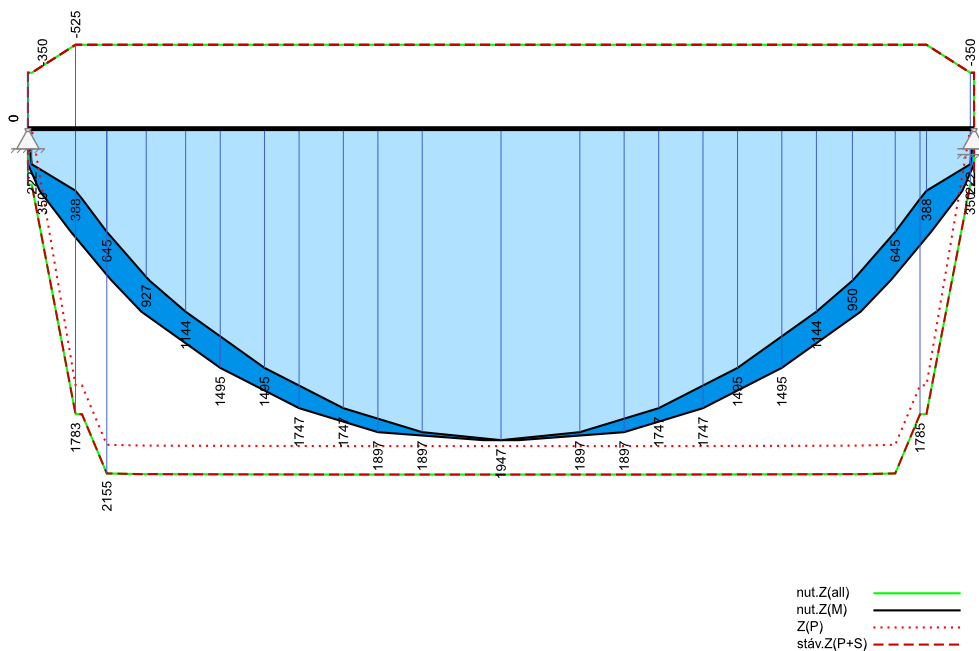
Předpjatá výztuž

Okamžitá soudržnost

Typ	Materiál předpjaté výztuže	ζ	Poměr soudržnosti předpjaté výztuže/měkká výztuž
A_p	Plocha jednoho kabelu předpjaté výztuže	Z_p	Svislá excentricita předpínacích kabelů od HH nebo DH
ΣA_p	Součet ploch předpjaté výztuže po vrstvách	vlevo/vpravo	Délky separace zleva/zprava
\emptyset_p	Jmenovitý průměr předpjaté výztuže	P_{max}	Max. předpínací síla po lanech
e	Vodorovná rozteč předp. výztuže	σ_{pmax}	Max. napětí po předpínacích lanech
		0.0 %	Krátkodobá relaxace při tepelné úpravě

Vrstva	Typ	n _p	A _p [cm ²]	ΣA _p [cm ²]	φ _p [mm]	ζ	e [cm]	z _p Vztah	z _p [cm]	P _{max} [kN]	σ _{pmax} [N/m ²]	Separace		
												n _p	vlevo	vpravo
a	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	8.5	119.1	1275	0	0.000	0.000
b	ST1570/1770	4	0.93	3.74	12.5	0.60	3.8	DH	12.3	119.1	1275	0	0.000	0.000
c	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	16.1	119.1	1275	0	0.000	0.000
d	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	19.9	119.1	1275	3	1.000	1.000
e	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	7.6	DH	23.7	119.1	1275	0	0.000	0.000

Vykrytí tahů [kN]



Tato 1. varianta vyztužení demonstruje „optimální“ poměr a množství předpjatá a betonářské výztuže:

- vykrytí tahů předpjatou výztuží „stáv.Z(P)“ je „tečné“ (vykryvá cca 100% max. tahů) k obálce působících tahových sil „nut.Z(M) ———“ v místě jejího extrému;
- průběh „nut.Z(M) ———“ leží pod průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“, přičemž podíl betonářské výztuže na vykrytí tahů je v porovnání s podílem předpjaté výztuže výrazně menší;
- průběh „nut.Z(all) ———“ převážně splývá s průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“;
- rezervy návrhu jsou dostačující.

Příklad 2: nedostačující předpětí

Podélná výztuž

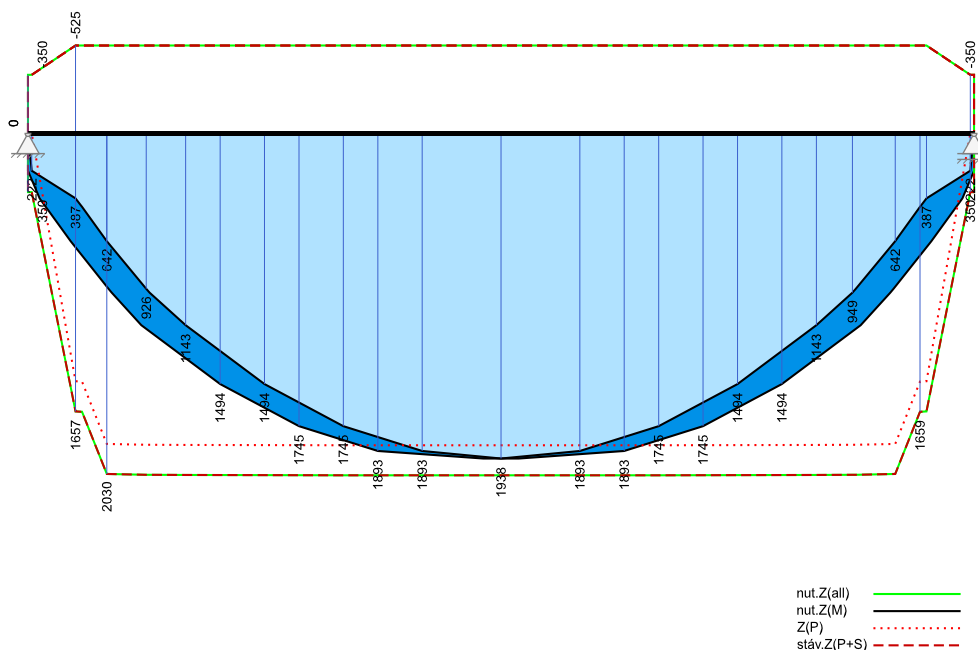
Vrstv a	Počet	ϕ_s [mm]	A_s [cm ²]	Typ	e [cm]	z [cm]	z od reference	x_z [m]	x_k [m]
1	2	16	4.02	var	36.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
2	2	16	4.02	fix	36.0	4.5	DH horní pásnice	0.000	17.500
3	2	16	4.02	var	16.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
4	2	16	4.02	var	7.0	4.5	DH prefabrikátu	0.000	17.500

Předpjatá výztuž

Okamžitá soudržnost

Vrstv a	Typ	n_p	A_p [cm ²]	ΣA_p [cm ²]	ϕ_p [mm]	ζ	e [cm]	z_p Vztah	z_p [cm]	P_{max} [kN]	σ_{pmax} [N/m ²]	Separace		
												n_p	vlevo	vpravo
a	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	8.5	119.1	1275	0	0.000	0.000
b	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	12.3	119.1	1275	0	0.000	0.000
c	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	16.1	119.1	1275	0	0.000	0.000
d	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	19.9	119.1	1275	3	1.000	1.000
e	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	7.6	DH	23.7	119.1	1275	0	0.000	0.000

Vykrytí tahů [kN]



Tato 2. varianta vyztužení reprezentuje sice výpočetně vyhovující, avšak pravděpodobně méně vhodný návrh:

- vykrytí tahů předpjetou výztuží „stáv.Z(P)“ protíná, resp. leží pod obálkou působících tahových sil „nut.Z(M) ———“;
- průběh „nut.Z(M) ———“ leží pod průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“, přičemž podíl betonářské výztuže na vykrytí tahů je v porovnání s podílem předpjeté výztuže výrazně menší;
- průběh „nut.Z(all) ———“ převážně splývá s průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“, avšak (!)
- rezervy návrhu jsou nízké.

Příklad 3: nadbytečná předpjatá výztuž

Podélná výztuž

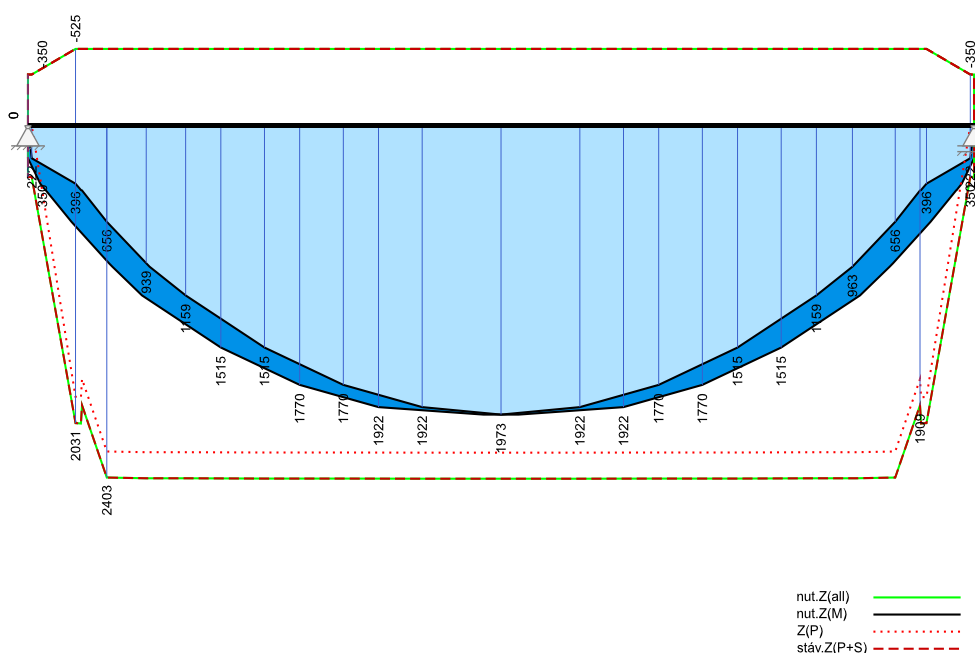
Vrstv	Počet	\varnothing_s [mm]	A_s [cm ²]	Typ	e [cm]	z [cm]	z od reference	x_z [m]	x_k [m]
a									
1	2	16	4.02	var	36.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
2	2	16	4.02	fix	36.0	4.5	DH horní pásnice	0.000	17.500
3	2	16	4.02	var	16.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
4	2	16	4.02	var	7.0	4.5	DH prefabrikátu	0.000	17.500

Předpjatá výztuž

Okamžitá soudržnost

Vrstv	Typ	n_p	A_p [cm ²]	ΣA_p [cm ²]	\varnothing_p [mm]	ζ	e [cm]	z_p Vztah	z_p [cm]	P_{max} [kN]	σ_{pmax} [N/m ²]	Separace		
												n_p	vlevo	vpravo
a	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	8.5	119.1	1275	0	0.000	0.000
b	ST1570/1770	4	0.93	3.74	12.5	0.60	3.8	DH	12.3	119.1	1275	0	0.000	0.000
c	ST1570/1770	4	0.93	3.74	12.5	0.60	3.8	DH	16.1	119.1	1275	0	0.000	0.000
d	ST1570/1770	4	0.93	3.74	12.5	0.60	3.8	DH	19.9	119.1	1275	3	1.000	1.000
e	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	7.6	DH	23.7	119.1	1275	0	0.000	0.000

Vykrytí tahů [kN]



Tato 3. varianta vyztužení reprezentuje sice výpočetně vyhovující, avšak méně hospodárný návrh:

- vykrytí tahů předpjatou výztuží „stáv.Z(P)“ zbytečně převyšuje obálku působících tahových sil „nut.Z(M) ———“;
- průběh „nut.Z(M) ———“ leží pod průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“, podíl betonářské výztuže na vykrytí tahů je v porovnání s podílem předpjaté výztuže sice malý, avšak nadbytečný;
- průběh „nut.Z(all) ———“ převážně splývá s průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“;
- rezerva návrhu je zbytečně vysoká.

Příklad 4: nadbytečná betonářská výztuž

Podélná výztuž

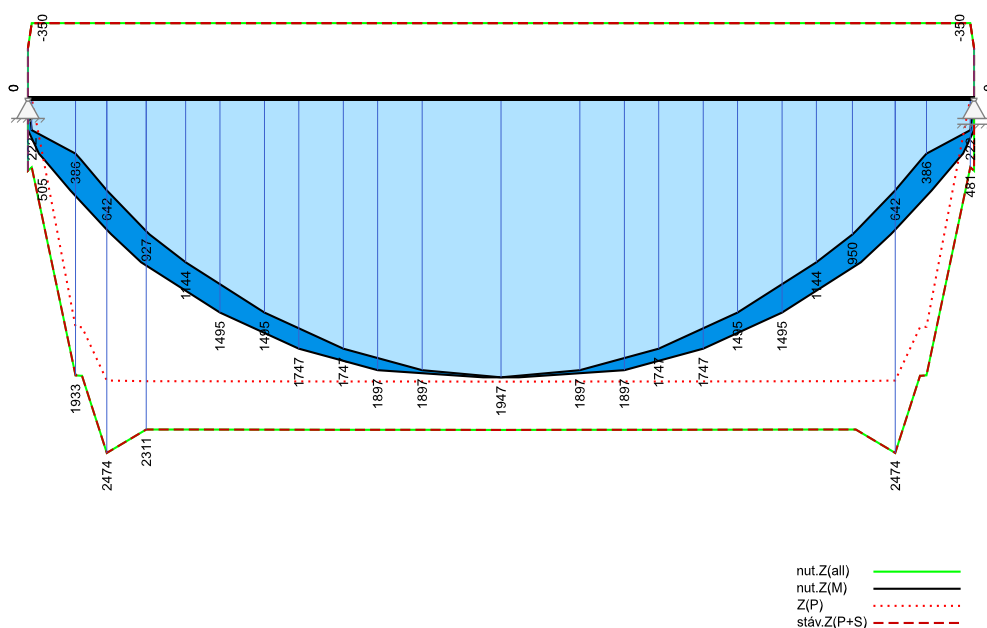
Vrstv	Počet	\varnothing_s [mm]	A_s [cm ²]	Typ	e [cm]	z [cm]	z od reference	x_z [m]	x_k [m]
a									
1	2	16	4.02	var	36.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
2	2	16	4.02	fix	36.0	4.5	DH horní pásnice	0.000	17.500
3	2	16	4.02	var	16.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
4	2	22	7.60	var	7.0	4.5	DH prefabrikátu	0.000	17.500

Předpjatá výztuž

Okamžitá soudržnost

Vrstv	Typ	n_p	A_p [cm ²]	ΣA_p [cm ²]	\varnothing_p [mm]	ζ	e [cm]	z_p Vztah	z_p [cm]	P_{max} [kN]	σ_{pmax} [N/m ²]	Separace		
												n_p	vlevo	vpravo
a	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	8.5	119.1	1275	0	0.000	0.000
b	ST1570/1770	4	0.93	3.74	12.5	0.60	3.8	DH	12.3	119.1	1275	0	0.000	0.000
c	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	16.1	119.1	1275	0	0.000	0.000
d	ST1570/1770	3	0.93	2.80	12.5	0.60	3.8	DH	19.9	119.1	1275	3	1.000	1.000
e	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	7.6	DH	23.7	119.1	1275	0	0.000	0.000

Vykrytí tahů [kN]



Tato 4. varianta vyztužení reprezentuje sice výpočetně vyhovující, avšak méně hospodárný návrh:

- převládající vykrytí tahů předpjatou výztuží „stáv.Z(P)“ je „tečné“ (vykryvá cca 100% max. tahů) k obálce působících tahových sil „nut.Z(M) ———“ v místě jejího extrému;
- průběh „nut.Z(M) ———“ leží pod průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“, přičemž zvýšený podíl betonářské výztuže na vykrytí tahů, v porovnání s podílem předpjaté výztuže, je nadbytečný;
- průběh „nut.Z(all) ———“ převážně splývá s průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“;
- rezerva návrhu je zbytečně vysoká.

Příklad 5: navýšení betonářské výztuže vlivem požadavků na MSP

Jedná se tutéž variantu vyztužení, jako v u příkladu 1, se snížením množství předpjaté výztuže a požadavkem MSP na max. šířku trhliny 0,2 mm.

Podélná výztuž

Vrstv a	Počet	ϕ_s [mm]	A_s [cm ²]	Typ	e [cm]	z [cm]	z od reference	x_z [m]	x_k [m]
1	2	16	4.02	var	36.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
2	2	16	4.02	fix	36.0	4.5	DH horní pásnice	0.000	17.500
3	2	16	4.02	var	16.0	4.5	HH prefabrikátu	0.000	17.500
4	2	16	4.02	var	7.0	4.5	DH prefabrikátu	0.000	17.500

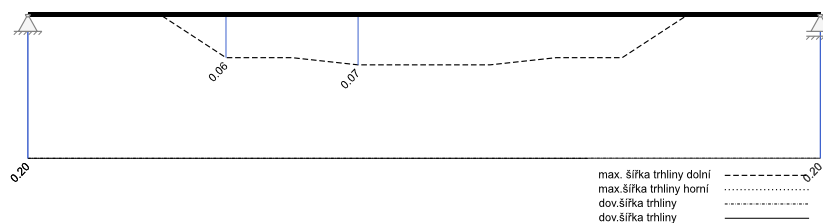
Předpjatá výztuž

Okamžitá soudržnost

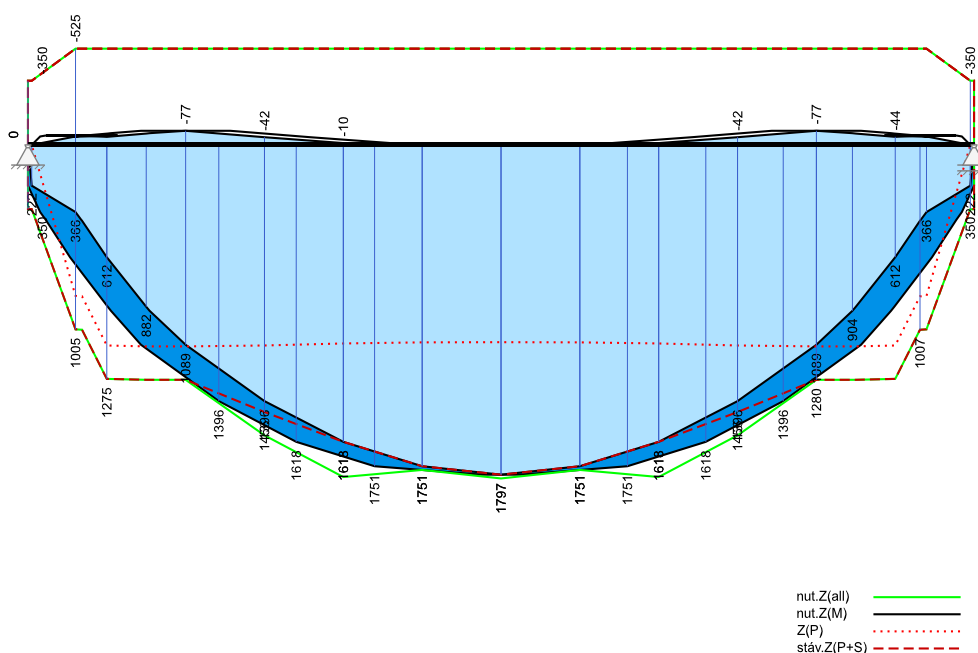
Vrstv a	Typ	n_p	A_p [cm ²]	ΣA_p [cm ²]	ϕ_p [mm]	ζ	e [cm]	z_p Vztah	z_p [cm]	P_{max} [kN]	σ_{pmax} [N/m ²]	Separace		
												n_p	vlevo	vpravo
a	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	3.8	DH	8.5	119.1	1275	0	0.000	0.000
b	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	3.8	DH	12.3	119.1	1275	0	0.000	0.000
c	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	3.8	DH	16.1	119.1	1275	0	0.000	0.000
d	ST1570/1770	2	0.93	1.87	12.5	0.60	3.8	DH	19.9	119.1	1275	3	1.000	1.000

Omezení šířky trhlin

Šířky trhlin [mm]



Vykrytí tahů [kN]



Tato 5. varianta vyztužení reprezentuje nevyhovující návrh:

- vykrytí tahů předpjatou výztuží „stáv.Z(P)“ protíná, resp. leží pod obálkou působících tahových sil „nut.Z(M) ———“;
- průběh „nut.Z(M) ———“ by zřejmě ležel pod průběhem „stáv.Z(P+S) - - - -“, avšak (!);
- v místech možného vzniku trhlin $> 0,1$ mm průběh „nut.Z(all) ———“ leží nad, resp. přesahuje průběh „stáv.Z(P+S) - - - -“;
- rezervy návrhu neexistují.