

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

FAKULTA STAVEBNÍ

K133 - KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

NÁVRH PŘEDPJATÉHO VAZNÍKU DOSTAVBY  
VÝROBNÍ HALY

Autor:

Vojtěch Černý

Vedoucí práce:

Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Praha 2020

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
 Fakulta stavební  
 Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Černý	Jméno: Vojtěch	Osobní číslo: 469538
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Návrh předpjatého vazníku dostavby výrobní haly	
Název bakalářské práce anglicky: Design of prestressed truss of production hall annex building	
Pokyny pro vypracování: - Popis řešené konstrukce - Popis metod, postupů, kritérií použitých pro návrh - Návrh a posouzení předpjatého vazníku včetně dočasných návrhových situací - Návrh oblasti uložení vazníků - Výkresová dokumentace	
Seznam doporučené literatury: - Navrátil, J.: Předpjaté betonové konstrukce. CERM, Brno, 2008. ISBN 9788072045617. - Foglar, M., Frantová, M., Jiříček, P.: Betonové konstrukce 3: Navrhování betonových konstrukcí na MSP, úvod do předpjatého betonu. Skriptum. ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04943-3. - Kohoutková, A., Procházka, J., Šmejkal, J.: Modelování a vyztužování betonových prvků - Lokální modely železobetonových konstrukcí. Skriptum. ČVUT v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05340-9. - Nilson, A.H., Darwin, D., Dolan, C.W.: Design of Concrete Structures. 14th Edition. Chapter 19: Prestressed Concrete. McGraw Hill, New York, 2010. ISBN 978-0-07-329349-3. - Teoretické manuály použitého softwaru - Samostatně vyhledejte další vhodnou literaturu	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Petr Bílý, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 17.2.2020	Termín odevzdání bakalářské práce: 17.5.2020 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
18.2.2020	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Petra Bílého, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne .....

Vojtěch Černý

.....  
Jméno Příjmení

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Bílému, Ph.D. za velmi přínosné rady, a hlavně ochotný přístup ke konzultacím v momentální krizové době.

Dále bych chtěl poděkovat firmě ProjektyZeman.cz za poskytnutí přístupu k některým normám a programům.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za nepřetržitou podporu.

## Abstrakt

Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh a posouzení předpjatého vazníku dostavby výrobní haly v obci Křeč u Pelhřimov, kraj Vysočina.

Návrh a posouzení se týká předpjatého vazníku o rozpětí 14 m. Varianta předpětí byla zvolena na základě požadavků investora, kde si požádal o zvýšení podchodné výšky, tudíž snížení výšky vazníku. Následný statický výpočet ukázal, že pouhý železobetonový vazník nevyhoví hned z několika důvodů.

Dále je v práci také věnována pozornost oblasti uložení vazníku tzv. oblast diskontinuit. K analýze oblasti diskontinuit je použita metoda příhradové analogie.

## Klíčová slova

Železobeton, statický výpočet, předpjatý vazník, příhradová analogie, posouzení.

## Abstract

Main subject of this bachelor thesis is design and assessment of prestressed concrete girder of completion of production hall at Křeč near Pelhřimov.

The design and assessment concerns prestressed concrete girder which spans over 14 m. The variant of prestressed concrete was chosen based on investor's requirements, who wanted to decrease the height of girder, because of maximizing ground clearance bellow the girder. Structural analysis showed, that only basic reinforced concrete won't be enough.

Another main topic is about discontinuity regions at support area of the girder. For analysis of this discontinuity region is used strut and tie method.

## Key words

Reinforced concrete, structural analysis, prestressed concrete girder, strut and tie model, assessment

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	8
1.1	Identifikační údaje	8
1.2	Popis objektu	8
<b>2</b>	<b>Zatížení a kombinace</b>	9
2.1	Zatížení	9
2.1.1	Proměnná zatížení	9
2.1.2	Stálá zatížení	11
2.2	Kombinace zatížení	13
<b>3</b>	<b>Vnitřní síly</b>	14
3.1	Zatěžovací stavy	15
3.2	Ruční výpočet vnitřních sil	17
3.3	Automatizovaný výpočet vnitřních sil	18
3.4	Závěr	20
<b>4</b>	<b>Materiálové charakteristiky</b>	21
4.1	Beton	21
4.2	Betonářská ocel	21
4.3	Předpínací ocel	21
<b>5</b>	<b>Návrh předpjatého vazníku</b>	22
5.1	Úvod	22
5.1.1	Princip předpjatého betonu	22
5.2	Stanovení krytí	22
5.3	Geometrie a průřezové charakteristiky	23
5.3.1	Geometrie	23
5.3.2	Průřezové charakteristiky	24
5.4	Návrh předpětí	25
5.4.1	Výpočet předpínacího napětí	25
5.4.2	Předběžný návrh předpínací síly	26
5.4.3	Předběžný návrh rozmístění předpínací výztuže	27
5.5	Výpočet ideálních průřezových charakteristik	28
5.6	Výpočet ztrát	29
5.6.1	Okamžité ztráty	29
5.6.2	Dlouhodobé ztráty	34

<b>5.7</b>	<b>Posouzení MSP</b> .....	40
5.7.1	Omezení napětí v předpínací výztuži .....	40
5.7.2	Omezení napětí v betonu: .....	41
<b>5.8</b>	<b>Posouzení MSÚ</b> .....	43
5.8.1	Ohyb .....	43
5.8.2	Ověření zplastizování předpínací výztuže.....	43
5.8.3	Posouzení smyk.....	45
<b>5.9</b>	<b>Závěr</b> .....	46
5.9.1	Schéma lan a jejich separace.....	46
5.9.2	Shrnutí posouzení napětí .....	47
<b>6</b>	<b>Návrh oblasti uložení</b> .....	49
<b>6.1</b>	<b>Úvod</b> .....	49
6.1.1	Maximální návrhové napětí.....	49
<b>6.2</b>	<b>Geometrie oblasti diskontinuit</b> .....	50
<b>6.3</b>	<b>Model náhradní příhradoviny</b> .....	50
<b>6.4</b>	<b>Návrh a posouzení</b> .....	51
6.4.1	Vzpěry .....	51
6.4.2	Táhla.....	52
6.4.3	Konstrukční svislá a vodorovná výztuž ozubu .....	54
6.4.4	Schéma vyztužení a kotevních délek.....	54
<b>7</b>	<b>Návrh manipulačních úchytů</b> .....	55
7.1	Návrh .....	55
7.2	Posouzení.....	56
7.3	Kotevní délky .....	56
7.4	Schéma úchytu .....	57
<b>8</b>	<b>Závěr</b> .....	58

# 1 Úvod

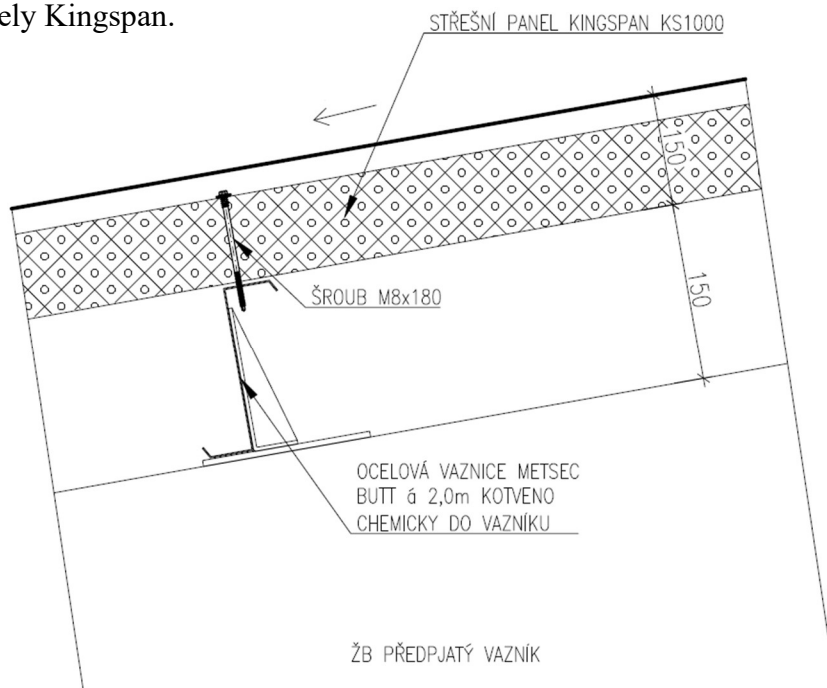
## 1.1 Identifikační údaje

Název stavby:	Dostavba výrobní haly Křeč
Typ objektu:	Výrobní hala (zámečnické dílny)
Umístění objektu:	k. ú. Křeč, okres Pelhřimov
Počet podlaží:	1 nadzemní podlaží

## 1.2 Popis objektu

Výrobní hala je pěti lodní a v celém svém půdorysu jednopodlažní. Dostavba se týká dvou lodí (obr. členění haly). Půdorysně je hala tvaru obdélníku o maximálních rozměrech včetně opláštění (42,7 x 60,7) m, z toho dostavba (42,7 x 24) m. Zastřešení tvoří sedlová střecha se sklonem 10° a s maximální výškou hřebene 11 m nad úrovní ±0,000 m. Konstruktivní systém objektu je prefabrikovaný železobetonový skelet se zastřešením pomocí prefabrikovaných vazníků průřezu tvaru „T“ a předpjatých prefabrikovaných vazníků průřezu tvaru „I“. Vazníky jsou sedlového tvaru s rovným spodním lícem a pultového tvaru s podvěšeným spodním lícem. Objekt je založen na železobetonových základových patkách.

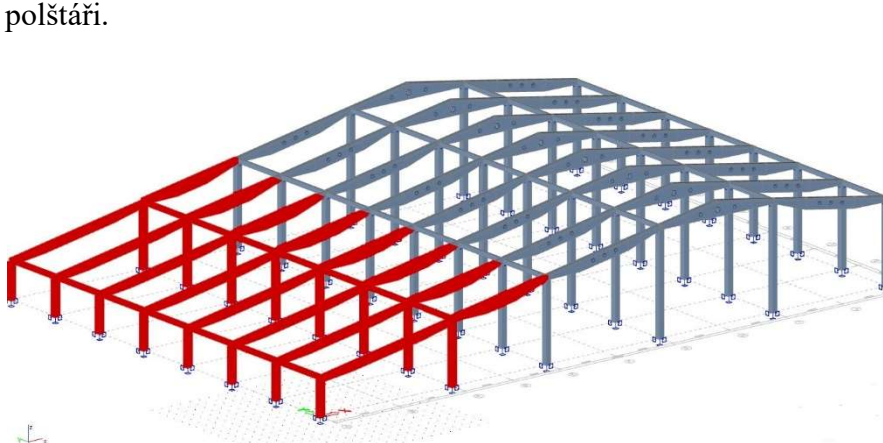
Opláštění haly je tvořeno sendvičovými panely Kingspan. Pomocná nosná konstrukce zastřešení haly je navržena pomocí tenkostěnného vaznicového systému Metsec, přes který jsou kladeny panely Kingspan.



Obr.1.1 - Skladba střešního pláště



Podlahu haly tvoří průmyslová drátkobetonová podlaha s předpokládaným užitným zatížením  $10 \text{ t/m}^2$  ( $100 \text{ kN/m}^2$ ). Tloušťka podlahy je 250 mm s uložením na ztuhnutém štěrkovém polštáři.



Obr.1.2 - Členění haly (červená – dostavba, modrá – stávající hala)

## 2 Zatížení a kombinace

Hodnoty zatížení a kombinací uvažovány dle normy ČSN EN 1991-1-1 [9].

### 2.1 Zatížení

#### 2.1.1 Proměnná zatížení

##### Zatížení sněhem - s

IV. Sněhová oblast dle mapy sněhových oblastí ČR.

$$\text{Sněhová oblast IV.} \quad s_k = 2,00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Typ střechy: sedlová

Sklon:  $\alpha = 10^\circ$

Součinitel expozice  $C_e := 1.0$  (normální krajina)

Tepelný součinitel  $C_t := 1.0$  (nízká tepelná propustnost)

Tvarový součinitel  $\mu := 0.8$  ( $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ )

$$s := \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0.8 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 2.00 = 1.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

##### Zatížení užitné – q

Střecha  $q_k = 0,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$  (kategorie H – nepochozí střechy dle ČSN 1991-1-1 [9])

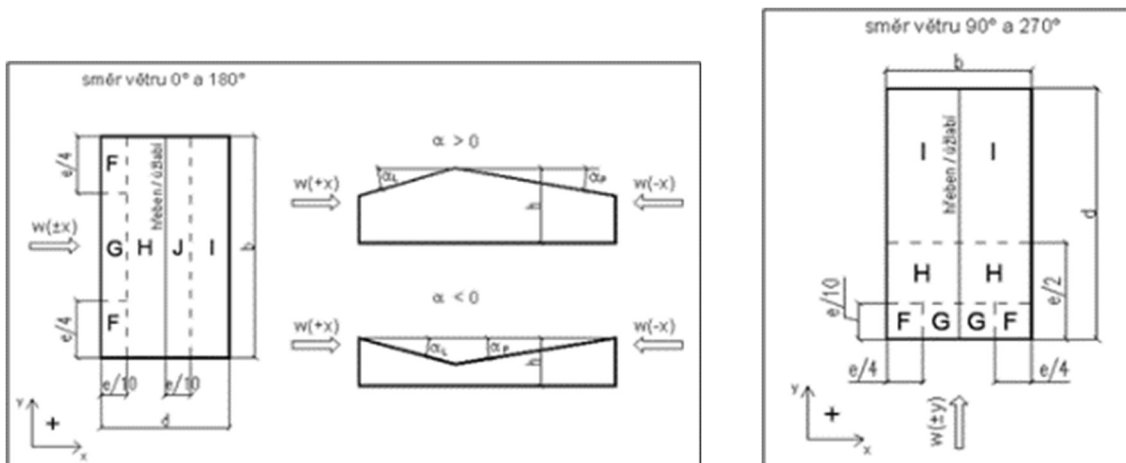
Podlaha  $q_k = 100 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$  (průmyslová činnost  $10 \text{ t/m}^2$  - výroba a sklad)

## Zatížení větrem – q

III. Větrná oblast dle mapy větrových oblastí ČR.

Větrná oblast III.  $v_{b,s} = 27,5 \text{ m/s}$

**Schéma tlakových oblastí sedlové střechy:**



Obr.2.1 - Geometrie ve směru osy x (vlevo); geometrie ve směru osy y (vpravo)

**Výsledné hodnoty zatížení větrem na jednotlivé oblasti:**

wk (kN/m <sup>2</sup> )	směr větru 0° a 180° (x)				
	sklon střechy $\alpha_L$			sklon střechy $\alpha_P$	
	F	G	H	I	J
1	-1,48	-1,14	-0,51	-0,57	-0,49
2	-1,48	-1,14	-0,51	-0,34	-0,34
3	0,11	0,11	0,11	-0,57	-0,46
4	0,11	0,11	0,11	-0,34	-0,34

Tab.2.1 - Zatížení větrem (směr x)

wk (kN/m <sup>2</sup> )	směr větru 90° a 270° (y)			
	F	G	H	I
$\alpha_L$	-1,65	-1,48	-0,74	-0,63
$\alpha_P$	-1,65	-1,48	-0,74	-0,63

Tab.2.2 - Zatížení větrem (směr y)

**Poznámka:** Podrobný výpočet zatížení větrem viz Příloha P.1.

Kladné hodnoty (tlak); záporné hodnoty (sání)

Pro příčný vítr (směr x), uvažovány čtyři kombinace (viz P.1.)

Výsledné hodnoty zatížení větrem dále rozpočítány v kapitole 2.1.2.

## 2.1.2 Stálá zatížení

Rozbor zatížení dle ČSN EN 1991-1-1 [9]:

### Zatížení sedlové střechy

1.1 Zatížení sedlové střechy (na plochu)						
Typ zatížení	Popis zatížení	Objemová tíha $\gamma_v$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Tloušťka vrstvy t [m]	Charakteristická hodnota $f_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Součinitel spolehlivosti $\gamma_M$ [-]	Návrhová hodnota $f_d$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Stálé	1) Vlastní tíha konstrukce:					
	- vaznice Metsec			0,05	1,35	0,07
	2) Ostatní stálé:					
	- technologie na střeše			0,30	1,35	0,41
	- panely Kingspan tl. 120 mm			0,15	1,35	0,20
	- technologie v podhledu			0,30	1,35	0,41
- rezerva				0,20	1,35	0,27
	Stálé zatížení celkem:			<b>1,00</b>		<b>1,35</b>
Proměnné	3) Užité:					
	- kategorie H, nepochozí střechy			0,75	1,50	1,13
	4) Sníh:	$\mu$ [-]	0,80			
	- sněhová oblast IV, $\psi_0=0,5$	$s_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2,00			
	- na průmět			1,60	1,50	2,40
	- na plochu			1,58	1,50	2,36
	5) Větr:					
	- větrná oblast III, $v_b=27,5$ m/s, $\psi_0=0,6$	$\alpha$ [°]	10,0			
	a) vítr příčný:					
	- tlak větru, návětrná strana, oblast H			0,11	1,50	0,17
	- sání větru, návětrná strana, oblast H			-0,51	1,50	-0,77
	- sání větru, závětrná strana, oblast I			-0,57	1,50	-0,86
b) vítr podélný:						
- sání větru oblast H			-0,74	1,50	-1,11	
	Proměnné zatížení v návrhové kombinaci			<b>1,60</b>		<b>2,41</b>
	Celkové zatížení v návrhové kombinaci			<b>2,60</b>		<b>3,76</b>

Tab.2.3 - Zatížení sedlové střechy.

### Zatížení podlahy

1.2 Zatížení podlahy halý (na plochu)						
Typ zatížení	Popis zatížení	Objemová tíha $\gamma_v$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Tloušťka vrstvy t [m]	Charakteristická hodnota $f_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Součinitel spolehlivosti $\gamma_M$ [-]	Návrhová hodnota $f_d$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Stálé	1) Vlastní tíha konstrukce:					
	- průmyslová podlaha tl. 250 mm	24,0	0,250	6,00	1,35	8,10
	2) Ostatní stálé:					
	- rezerva			0,50	1,35	0,68
	Stálé zatížení celkem:			<b>6,50</b>		<b>8,78</b>
Proměnné	3) Užité:					
	- kategorie E - skladovací plochy 10t/m <sup>2</sup>			100,00	1,50	150,00
	Proměnné zatížení celkem			<b>100,00</b>		<b>150,00</b>
	Zatížení celkem			<b>106,50</b>		<b>158,78</b>

Tab.2.4 - Zatížení podlahy.

## Zatížení předpjatého prefabrikovaného vazníku

2.1 Zatížení předpjatého vazníku (na délku)(6m zš)						
Typ zatížení	Popis zatížení	Plošné zatížení $f_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Zatěžovací šířka $b$ [m]	Charakteristická hodnota $f_k$ [kN/m]	Součinitel spolehlivosti $\gamma_M$ [-]	Návrhová hodnota $f_d$ [kN/m]
Stálé	1) Vlastní tíha konstrukce:					
	- vaznice Metsec	0,05	6,000	0,30	1,35	0,41
	- žb vazník (odhad)			4,80	1,35	6,48
	2) Ostatní stálé:					
	- technologie na střeše	0,30	6,000	1,80	1,35	2,43
	- panely Kingspan tl. 120 mm	0,15	6,000	0,90	1,35	1,22
	- technologie v podhledu	0,30	6,000	1,80	1,35	2,43
- rezerva	0,20	6,000	1,20	1,35	1,62	
	Stálé zatížení celkem:			<b>10,80</b>		<b>14,58</b>
Proměnné	3) Užitné:					
	- kategorie H, nepochozí střechy	0,75	6,000	4,50	1,50	6,75
	4) Sníh:					
	- sněhová oblast IV, $\psi_0=0,5$					
	- na průmět	1,60	6,000	9,60	1,50	14,40
	- na plochu	1,58	6,000	9,45	1,50	14,18
	5) Větr:					
	- větrná oblast III, $v_b=27,5\text{m/s}$ , $\psi_0=0,6$					
		tlak větru [kN/m <sup>2</sup> ]	Zatěžovací šířka [m]	wk(3,25m) [kN/m]	wk(6m) [kN/m]	
	a) vítr příčný:					
	- sání větru, návětrná strana, oblast F	-1,480	3,250	6,000	-4,81	-8,88
	- sání větru, návětrná strana, oblast G	-1,140	3,250	6,000	-3,71	-6,84
	- sání větru, návětrná strana, oblast H	-0,510	3,250	6,000	-1,66	-3,06
	- sání větru, závětrná strana, oblast I	-0,57	3,250	6,000	-1,85	-3,42
	- sání větru, závětrná strana, oblast J	-0,49	3,250	6,000	-1,59	-2,94
	- tlak větru, návětrná strana, oblast F	0,11	3,250	6,000	0,36	0,66
	- tlak větru, návětrná strana, oblast G	0,11	3,250	6,000	0,36	0,66
- tlak větru, návětrná strana, oblast H	0,11	3,250	6,000	0,36	0,66	
b) vítr podélný:						
- sání větru oblast F	-1,650	3,250	6,000	-5,36	-9,90	
- sání větru oblast G	-1,480	3,250	6,000	-4,81	-8,88	
- sání větru oblast H	-0,740	3,250	6,000	-2,41	-4,44	
- sání větru oblast I	-0,63	3,250	6,000	-2,05	-3,78	
	Proměnné zatížení v návrhové kombinaci			<b>10,26</b>		<b>15,39</b>
	Celkové zatížení v návrhové kombinaci			<b>21,06</b>		<b>29,97</b>

Tab.2.5 - Zatížení předpjatého vazníku.

## Závěr:

Návrhové hodnoty zatížení:

Vlastní tíha:

$$g_{0d} := g_{0k} \cdot \gamma_g = 4,8 \cdot 1,35 = 6,48 \text{ kN/m}$$

Ostatní stálé zatížení:

$$g_{1d} := g_{1k} \cdot \gamma_g = 6 \cdot 1,35 = 8,1 \text{ kN/m}$$

Stálé celkem:

$$g_d := g_{0d} + g_{1d} = 6,48 + 8,1 = 14,58 \text{ kN/m}$$

Proměnné:

$$q_d := q_k \cdot \gamma_q = 10,26 \cdot 1,5 = 15,39 \text{ kN/m}$$

Celkové:

$$f_d := g_d + q_d = 14,58 + 15,39 = 29,97 \text{ kN/m}$$

**Poznámka:** V ručním výpočtu uvažován pouze tlak větru, neboť sání není rozhodující.

V automatizovaném výpočtu jsou pak navoleny kombinace, které vyvozují tu nejméně příznivou.

## 2.2 Kombinace zatížení

### MSÚ

Pro posouzení na účinky MSÚ je uvažována méně příznivá z kombinací 6.10a, nebo 6.10b dle ČSN 1990 (73002) ed. 2. [11]

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

### MSP

Pro posouzení na účinky MSP je uvažovaná příslušná kombinace charakteristická, častá nebo kvazistálá dle ČSN 1990 (73002) ed 2. [11]

Charakteristická kombinace zatížení:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

Častá kombinace zatížení:

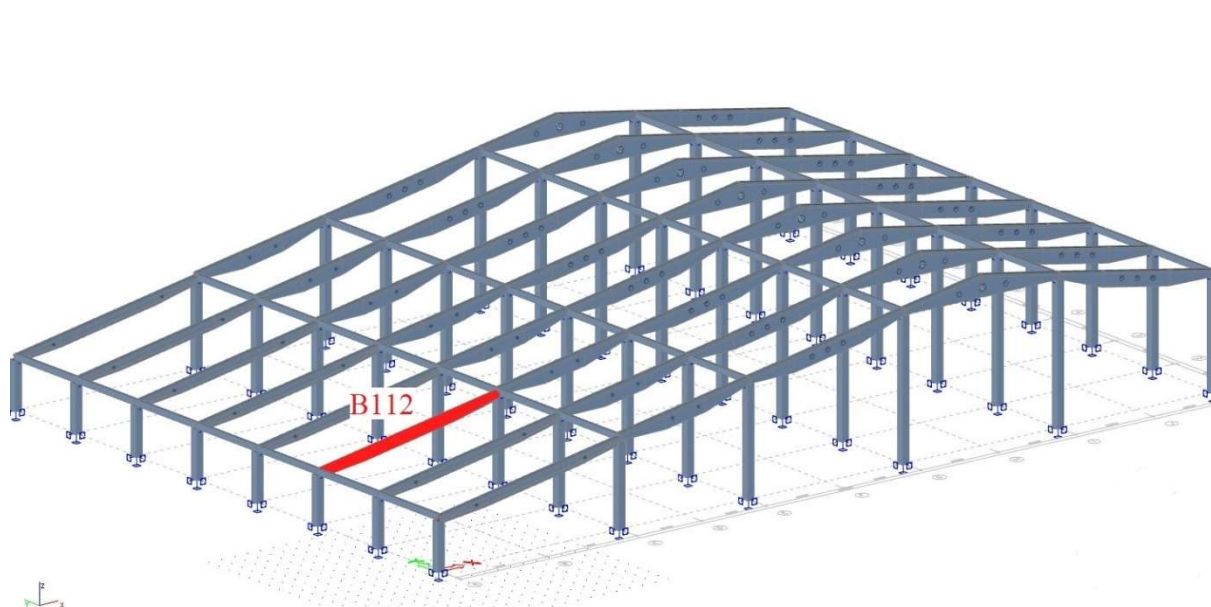
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

Kvazistálá kombinace zatížení

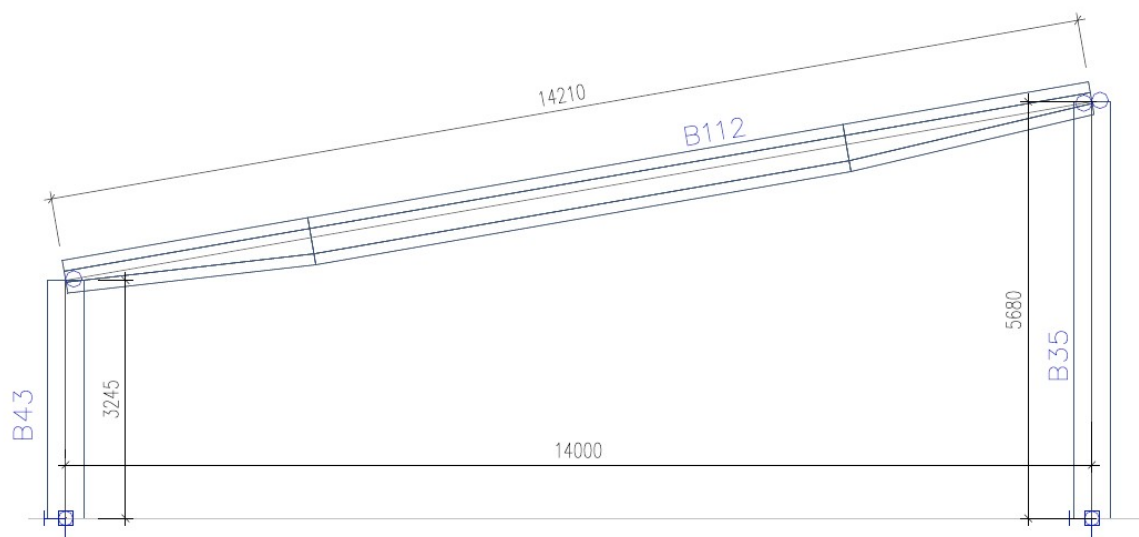
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

### 3 Vnitřní síly

Schéma řešené konstrukce:



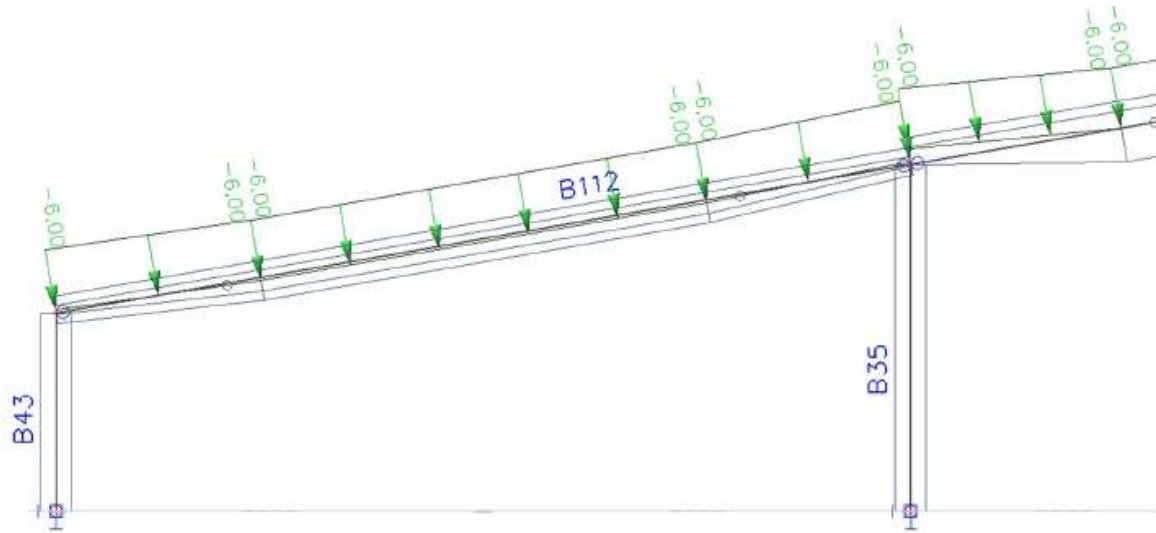
Obr.3.1 - Řešený vazník



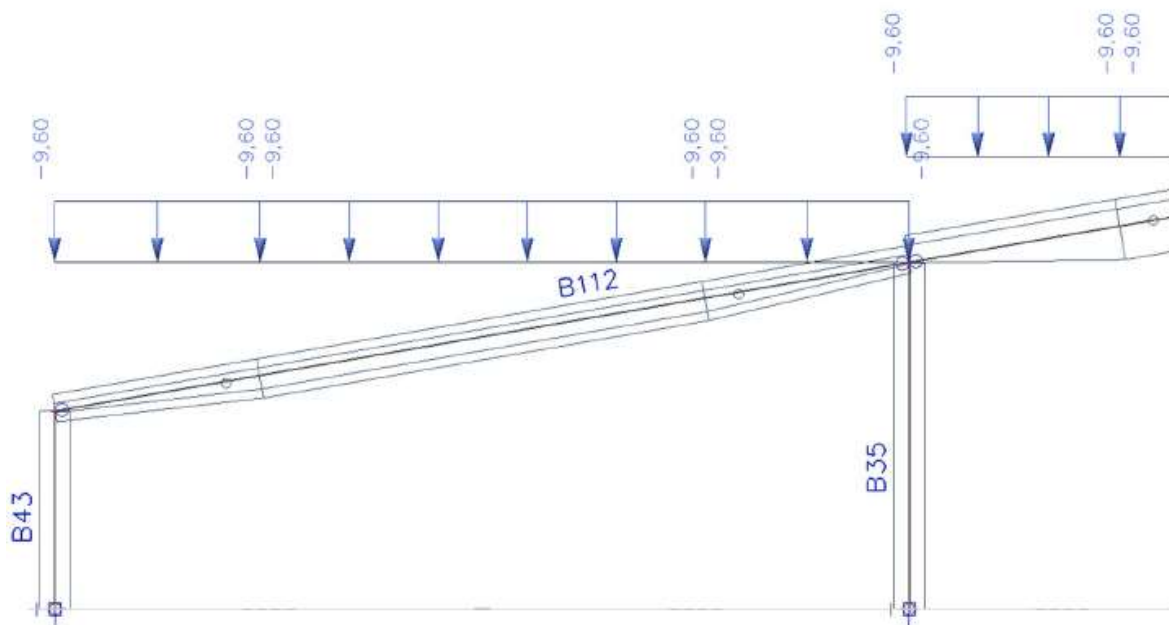
Obr.3.2 - Schéma řešené vazby

### 3.1 Zatěžovací stavy

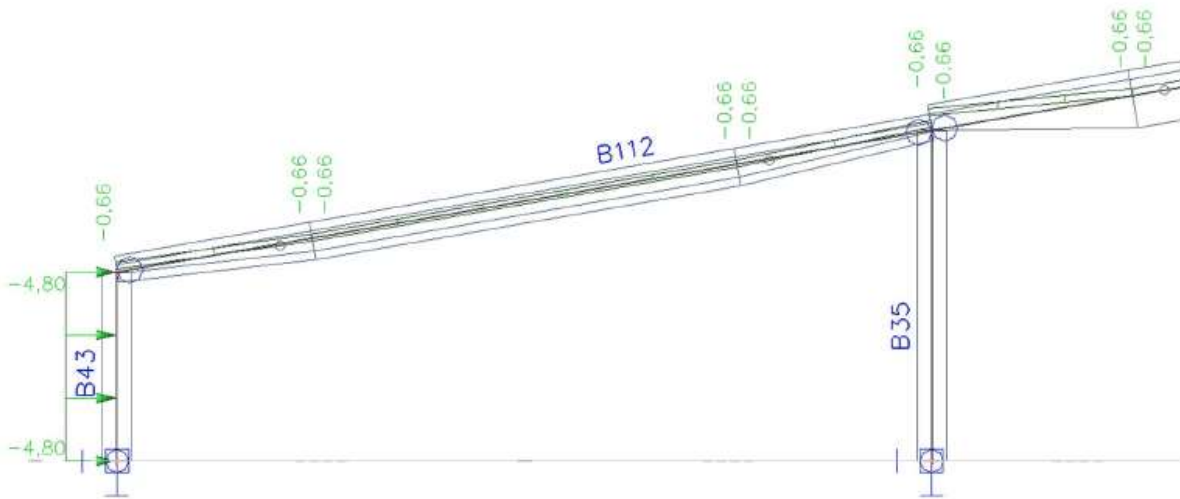
**Předpoklady:** - Zatěžovací stav 2; Stálé zatížení – vlastní tíha, je v ručním výpočtu zahrnut dle kapitoly 2.1.2. V automatizovaném výpočtu je vlastní tíha automaticky počítána výpočtovým softwarem.



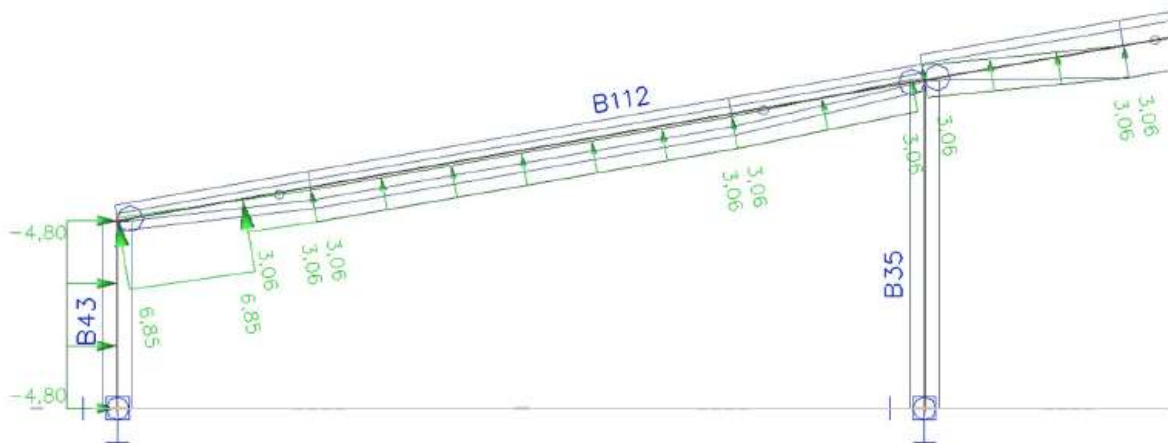
Obr.3.3 - Zatěžovací stav 3, Stálé zatížení – tíha střechy



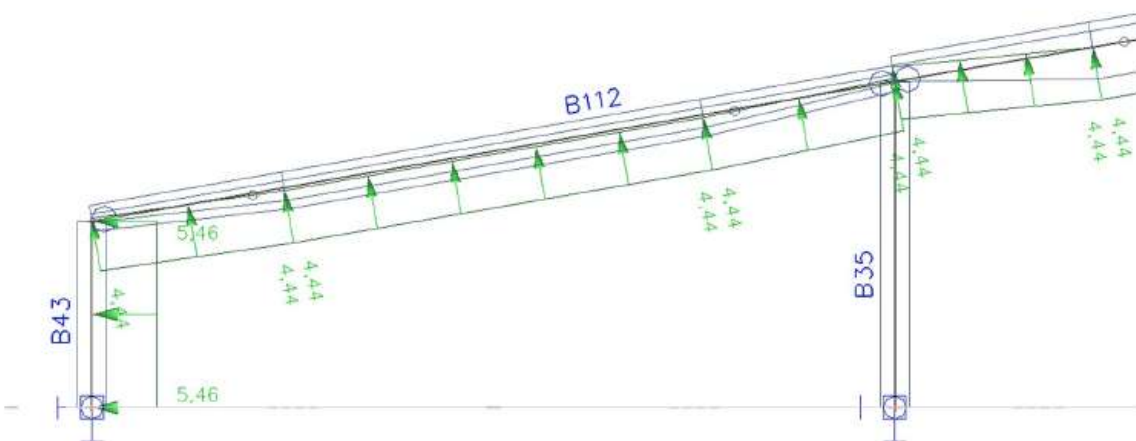
Obr.3.4 - Zatěžovací stav 4; Proměnné zatížení – sněh



Obr.3.5 - Zatěžovací stav 5; Proměnné zatížení – vítr příčný (tlak)



Obr.3.6 - Zatěžovací stav 6; Proměnné zatížení – vítr příčný (sání)



Obr.3.7 - Zatěžovací stav 7; Proměnné zatížení – vítr podélný (sání)



### 3.2 Ruční výpočet vnitřních sil

- Předpoklady:**
- Při ručním výpočtu vnitřních sil jsou zanedbány navazující konstrukce.
  - Do ručního výpočtu je uvažováno pouze tlakové zatížení od větru.
  - Součinitelé spolehlivosti uvažovány dle ČSN EN 1990 (73 0002) ed. 2. [11]

#### Vstupní hodnoty:

Rozpětí:  $l = 14 \text{ m}$

Návrhové hodnoty zatížení:

Vlastní tíha:  $g_{0d} := g_{0k} \cdot \gamma_g = 4,8 \cdot 1,35 = 6,48 \text{ kN/m}$

Ostatní stálé zatížení:  $g_{1d} := g_{1k} \cdot \gamma_g = 6 \cdot 1,35 = 8,1 \text{ kN/m}$

Stálé celkem:  $g_d := g_{0d} + g_{1d} = 6,48 + 8,1 = 14,58 \text{ kN/m}$

Proměnné:  $q_d := q_k \cdot \gamma_q = 10,26 \cdot 1,5 = 15,39 \text{ kN/m}$

Celkové:  $f_d := g_d + q_d = 14,58 + 15,39 = 29,97 \text{ kN/m}$

#### Výpočet vnitřních sil:

Vlastní tíha:  $M_{E0k} = \frac{1}{8} \cdot g_{0k} \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 4,8 \cdot 14^2 = 117,6 \text{ kNm}$

$$M_{E0d} = \frac{1}{8} \cdot g_{0d} \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 6,48 \cdot 14^2 = 158,76 \text{ kNm}$$

Ostatní stálé:  $M_{E1k} = \frac{1}{8} \cdot g_{1k} \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 6 \cdot 14^2 = 147 \text{ kNm}$

$$M_{E1d} = \frac{1}{8} \cdot g_{1d} \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 8,1 \cdot 14^2 = 198,45 \text{ kNm}$$

Proměnné:  $M_{EQk} = \frac{1}{8} \cdot q_k \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 10,26 \cdot 14^2 = 251,37 \text{ kNm}$

$$M_{EQd} = \frac{1}{8} \cdot q_d \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 15,39 \cdot 14^2 = 377,055 \text{ kNm}$$

Celkové zatížení (bez předpětí):  $M_{Ek} = \frac{1}{8} \cdot f_k \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 21,06 \cdot 14^2 = 515,97 \text{ kNm}$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 29,97 \cdot 14^2 = 734,265 \text{ kNm}$$

#### Častá kombinace MSP (bez předpětí):

$$M_{E\psi_1} = M_{E0k} + M_{E1k} + \psi_1 \cdot M_{EQk} = 117,6 + 147 + 0,2 \cdot 251,37 = 314,874 \text{ kNm}$$

#### Kvazistálá kombinace MSP (bez předpětí):

$$M_{E\psi} = M_{E0k} + M_{E1k} + \psi_1 \cdot M_{EQk} = 117,6 + 147 + 0 \cdot 251,37 = 264,6 \text{ kNm}$$

Posouvající síly u podpor MSP:  $V_{Ek} = \frac{1}{2} \cdot f_k \cdot l = 0,5 \cdot 21,06 \cdot 14 = 147,42 \text{ kN}$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot l = 0,5 \cdot 29,97 \cdot 14 = 209,79 \text{ kN}$$

### 3.3 Automatizovaný výpočet vnitřních sil

**Předpoklady:** - Při automatizovaném výpočtu vnitřních sil jsou zohledněny všechny navazující konstrukce, výpočet proveden v softwaru SCIA Engineer [16].

- Výsledkem výpočtu je obálka vnitřních sil nejneprůzračnějších kombinací zatížení.

- Výpočet byl proveden na kompletním modelu haly, v rámci přehlednosti výsledků a rozsahu této práce, bude dále zaměřeno pouze na řešený vazník B112.

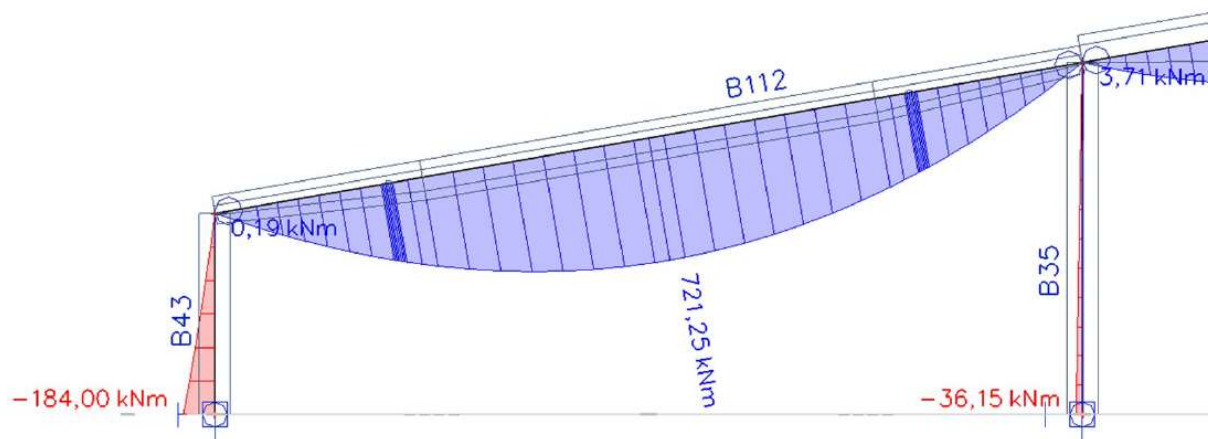
- Řešený vazník je modelován s náběhy, což byl předpokládán tvar železobetonového vazníku. Předpjatý vazník bude dále navržen bez náběhů.

S ohledem na uvažované statické schéma vazníku (prostý nosník) má tato změna na vnitřní síly zanedbatelný vliv daný pouze rozdílem vlastní tíhy. Síly získané z modelu jsou použitelné pro návrh vazníku s upravenou geometrií.

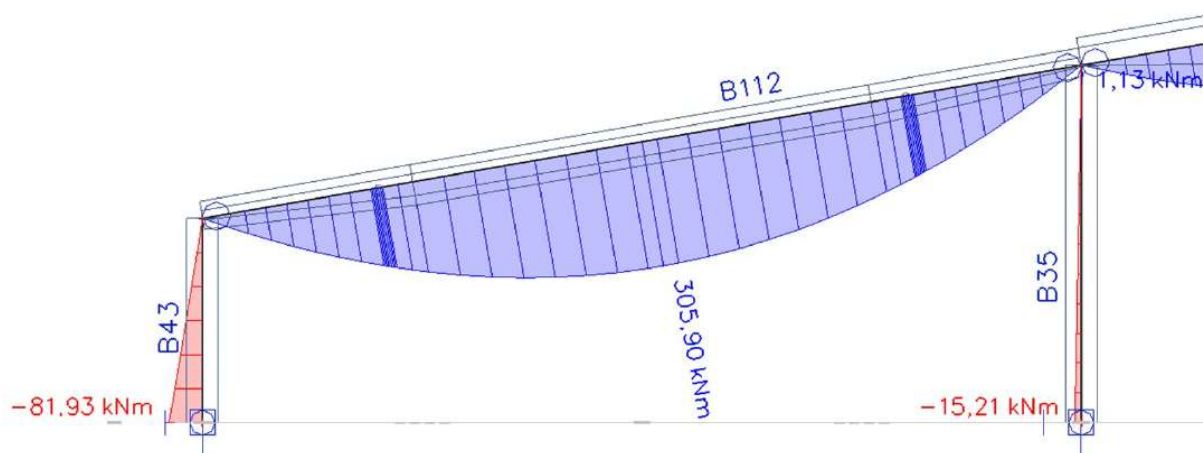
**Vnitřní síly:**



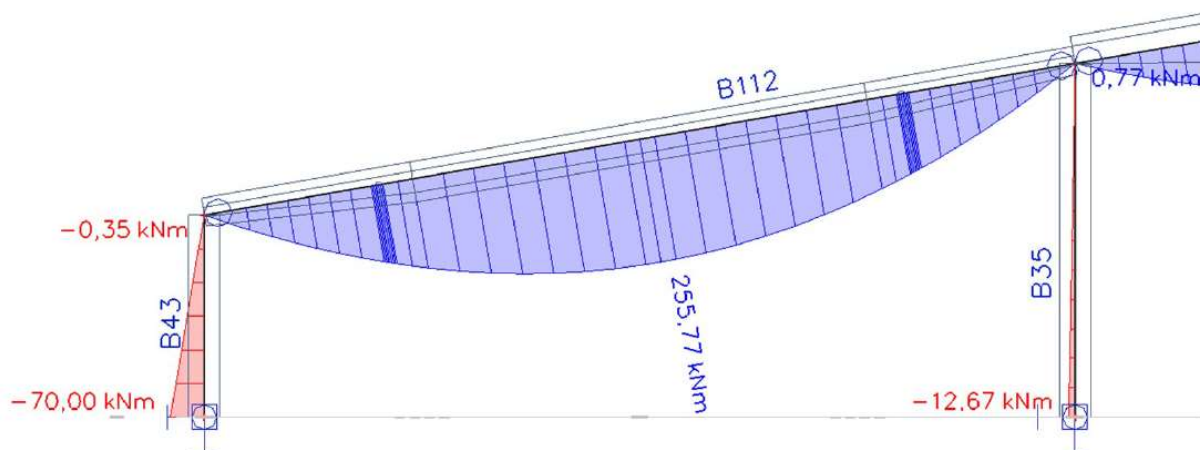
Obr.3.8 - Ohybový moment od charakteristického zatížení



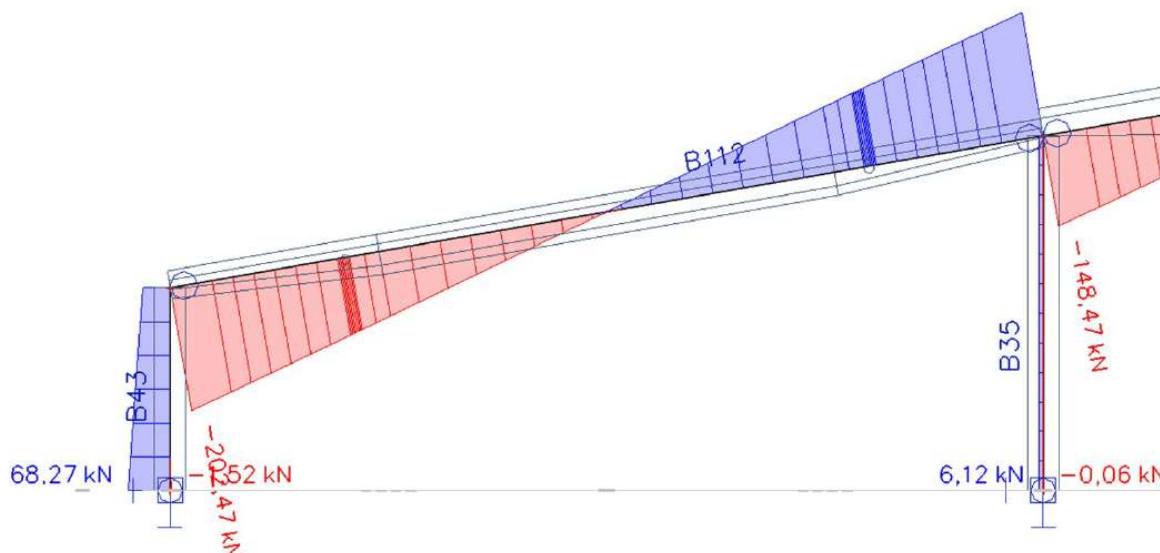
Obr.3.9 - Ohybový moment od návrhového zatížení



Obr.3.10 - Ohybový moment od časté kombinace zatížení



Obr.3.11 - Ohybový moment od kvazistálé kombinace zatížení



Obr.3.12 - Posouvající síly nad podporami od návrhového zatížení

### 3.4 Závěr

	Automatizovaný výpočet	Ruční výpočet	
$M_{Ek}$	506,41	515,97	[kN/m]
$M_{Ed}$	721,25	734,265	[kN/m]
$M_{E\psi 1}$	305,9	314,874	[kN/m]
$M_{E\psi 2}$	255,77	264,6	[kN/m]
$V_{Ek}$	±142,45	±147,42	[kN]
$V_{Ed}$	±202,95	±209,79	[kN]

Tab.3.1 - Srovnání výpočtu vnitřních sil

#### Závěr:

Vzhledem k povaze výsledků a velikosti jejich odchylky, se dále bude počítat s hodnotami napočítanými ručním výpočtem. Automatizovaně spočítané výsledky by se daly považovat za relevantnější, nicméně příkloněním se k ručně spočítaným výsledkům bude na straně bezpečnosti a vzhledem k velikosti odchylky se rozhodně nebude jednat o nevhodně předimenzování.

	Ruční výpočet	
$M_{Ek}$	515,97	[kN/m]
$M_{Ed}$	734,265	[kN/m]
$M_{E\psi 1}$	314,874	[kN/m]
$M_{E\psi 2}$	264,6	[kN/m]
$V_{Ek}$	±147,42	[kN]
$V_{Ed}$	±209,79	[kN]

Tab.3.2 – Finální hodnoty vnitřních sil

## 4 Materiálové charakteristiky

### 4.1 Beton

Třída betonu	$C50/60$
Charakteristická válcová pevnost v tlaku	$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$
Charakteristická krychelná pevnost v tlaku	$f_{ck,cube} = 60 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti materiálu	$\gamma_c = 1.5$
Návrhová pevnost betonu v tlaku	$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{50}{1.5} = 33,33 \text{ MPa}$
Střední pevnost betonu v tahu	$f_{ctm} = 4.1 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_{cm} = 37 \text{ GPa}$

### 4.2 Betonářská ocel

Třída betonářské oceli	$B500B$
Charakteristická mez kluzu	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti materiálu	$\gamma_s = 1.15$
Návrhová mez kluzu	$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 434,783 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_s = 200 \text{ GPa}$

### 4.3 Předpínací ocel

Typ předpínací oceli	$Y1770S7 - 15,7$
Charakteristická mez kluzu	$f_{pk} = 1770 \text{ MPa}$
Smluvní mez kluzu	$f_{p,01,k} = 1560 \text{ MPa}$
Průměr lana	$\varphi_p = 15.7 \text{ mm}$
Modul pružnosti	$E_p = 195 \text{ GPa}$
Plocha jednoho lana	$A_{p1} = 150 \text{ mm}^2$

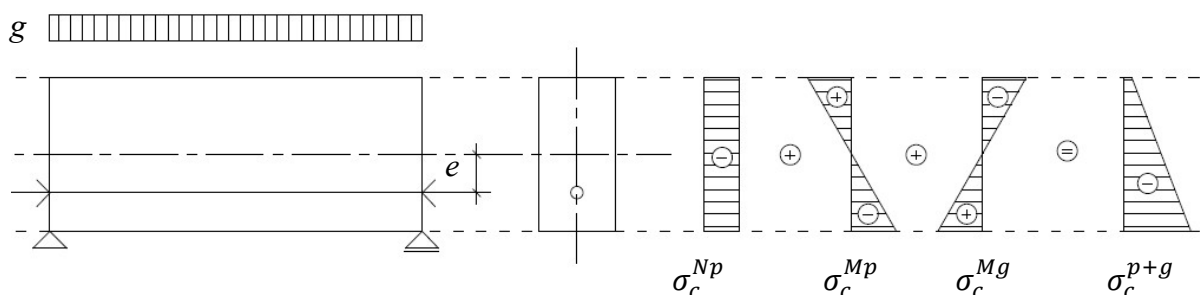
## 5 Návrh předpjatého vazníku

### 5.1 Úvod

Hlavní náplní této práce je návrh předpjatého vazníku haly. Varianta předpětí byla zvolena na základě požadavků investora, který si požádal o zvýšení podchodné výšky, tudíž snížení výšky vazníku. Následný statický výpočet provedený v rámci předmětu Projekt 2C ukázal, že pouhý železobetonový vazník nevyhoví hned z několika důvodů (nesplnění kritéria dlouhodobého průhybu, hraniční světlé vzdálenosti mezi pruty výztuže).

#### 5.1.1 Princip předpjatého betonu

Princip předpjatého betonu se odvíjí od toho, že beton přenáší lépe tlaková napětí a výztuž tahová. Výztuž je v takovém prvku napnutá a následně uvolněná a vnáší do betonu přídavná tlaková napětí, která v případě plného předpětí následně kompletně eliminují tahová napětí v prvku, což výrazně napomáhá betonu k přenosu velkých ohybových momentů.



Obr.5.1 - Rozložení napětí po mimostředně předpjatém průřezu.

### 5.2 Stanovení krytí

Vstupní hodnoty:	- Pevnostní třída betonu	C50/60
	- Životnost	50 let
	- Stupeň vlivu prostředí:	XC2
	- Průměr prutu (předpínací ocel)	$\varphi_p = 15,7 \text{ mm}$
	- Průměr prutu (betonářská ocel)	$\varphi_s = 16 \text{ mm}$
	- Konstrukční třída (předpínací ocel)	S3 ( $c_{min,dur,p} = 30 \text{ mm}$ )
	- Konstrukční třída (betonářská ocel)	S3 ( $c_{min,dur,s} = 20 \text{ mm}$ )

**Minimální krycí vrstva vzhledem k podmínkám soudržnosti**

$$c_{min,b,p} = 1,5 \cdot \varphi_p = 1,5 \cdot 15,7 = 23,55 \text{ mm}$$

$$c_{min,b,s} = 16 \text{ mm}$$

**Minimální krycí vrstva vzhledem k podmínkám prostředí**

$$c_{min,dur,p} = 30 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur,s} = 20 \text{ mm}$$

**Zvláštní požadavky (nerezová ocel, dodatečná ochrana)**

$$\Delta c_{dur,\gamma} = \Delta c_{dur,st} = \Delta c_{dur,add} = 0$$

**Minimální hodnota krytí**

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10\text{mm}\}$$

$$c_{min,p} = \max\{23,6; 30; 10\} = 30 \text{ mm}$$

$$c_{min,s} = \max\{16; 20; 10\} = 20 \text{ mm}$$

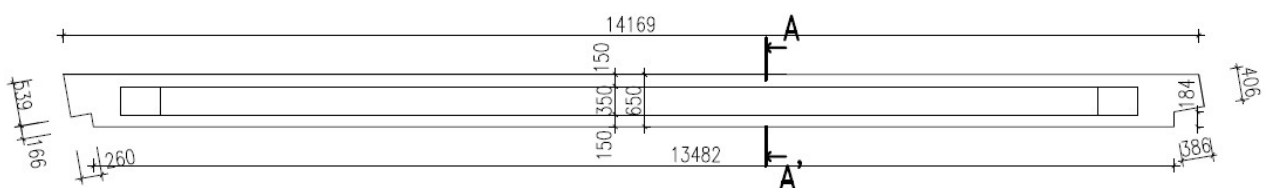
**Jmenovitá hodnota tloušťky betonové krycí vrstvy**

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

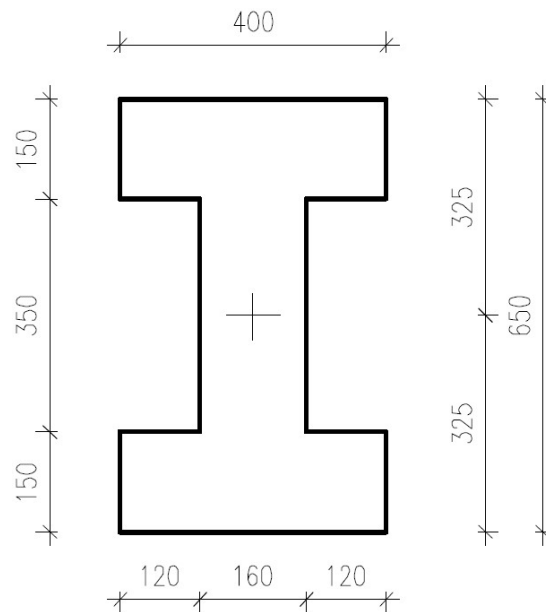
Přídavek pro návrhovou odchylku  $\Delta c_{dev} = 5 \text{ mm}$

$$c_{nom,p} = 30 + 5 = 35 \text{ mm}$$

$$c_{nom,s} = 20 + 5 = 25 \text{ mm}$$

**5.3 Geometrie a průřezové charakteristiky****5.3.1 Geometrie****Schéma:**

Obr. 5.2 - Tvar vazníku

**Řez A-A'**

Obr.5.3 - Řez vazníkem

**5.3.2 Průřezové charakteristiky**

- Předpoklady:**
- Výška průřezu je dána požadavkem investora na světlou výšku dostavby.
  - Průřezové charakteristiky vazníku jsou určeny v místě maximálního ohybového momentu (uprostřed) – tvar odpovídá řezu A-A'.
  - Výpočet průřezových charakteristik proběhl v příloze P.2.

**Plocha průřezu:**  $A_c = 176000 \text{ mm}^2$

**Poloha těžiště:**  $e_h = e_d = 0,325 \text{ m}$

**Moment setrvačnosti:**  $I_y = 8,297 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$

**Modul průřezu horní:**  $W_h = \frac{I_y}{e_h} = \frac{8,297 \cdot 10^9}{325} = 2,55 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

**Modul průřezu dolní:**  $W_d = \frac{I_y}{e_d} = \frac{8,297 \cdot 10^9}{325} = 2,55 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

**Horní hranice jádra průřezu:**  $j_h = \frac{W_h}{A_c} = \frac{2,55 \cdot 10^7}{176000} = 145,05 \text{ mm}$

**Dolní hranice jádra průřezu:**  $j_d = \frac{W_d}{A_c} = \frac{2,55 \cdot 10^7}{176000} = 145,05 \text{ mm}$



## 5.4 Návrh předpětí

### Časová osa

Předepnutí výztuže:	0 dní
Doba podržení napínacího napětí (korekce):	$t_{cor} = 5 \text{ min}$
Vnesení předpětí do betonu po:	$t_{p,0} = 1 \text{ dny}$
Skladování prvku:	$t_s = 24 \text{ dní}$
Doba ošetřování betonu	$t_0 = 7 \text{ dní}$
Přeprava prvku	$t_t = 25 \text{ dní}$
Stálé zatížení vneseno po:	$t'_g = 28 \text{ dní}$
Proměnné zatížení vneseno po:	$t'_q = 60 \text{ dní}$

### Rozdělení návrhových situací:

1. Vnesení předpětí do konstrukce – Působí pouze vlastní tíha konstrukce a předpětí.  
Ztráty předpětí – Okamžité.
2. Skladování prvku – Působí vlastní tíha konstrukce a předpětí.  
Ztráty předpětí – Krátkodobé.
3. Manipulace s prvkem – Působí vlastní tíha konstrukce a předpětí.  
Ztráty předpětí – Krátkodobé.
4. Montáž na stavbě – Působí vlastní tíha, předpětí, ostatní stálé a nahodilé montážní zatížení.  
Ztráty předpětí – Krátkodobé.
5. Konec životnosti – Působí veškeré zatížení.  
Ztráty předpětí – Dlouhodobé.

#### 5.4.1 Výpočet předpínacího napětí

Maximální napětí v předpínací výztuži během předpínání.

$$\sigma_{p0,max} = \min(0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k}) = \min(0,8 \cdot 1770; 0,9 \cdot 1560) = \min(1416; 1404)$$

$$\sigma_{p0,max} = 1404 \text{ MPa} = \sigma_{p,in} \rightarrow \text{Napínací napětí}$$

Maximální napětí v předpínací výztuži ihned po vnesení předpětí.

$$\sigma_{pa,max} = \min(0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k}) = \min(0,75 \cdot 1770; 0,85 \cdot 1560) =$$

$$\sigma_{pa,max} = \min(1327,5; 1402,5) = 1327,5 \text{ MPa}$$

## 5.4.2 Předběžný návrh předpínací síly

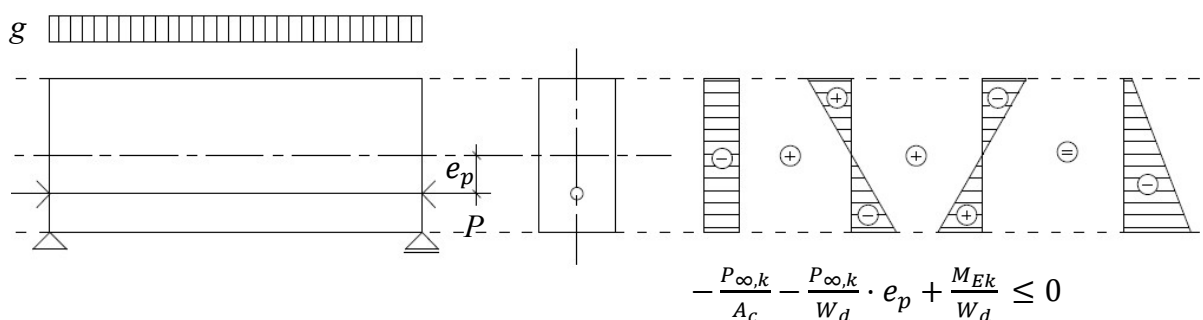
**Předpoklady** - Předpínací síla na konci životnosti v čase  $t_{p,\infty} \approx 50 \text{ let}$

- Vychází se z napětí ve spodních vláknech uprostřed vazníku.
- Stálé i nahodilé zatížení.
- Předpoklad dlouhodobých ztrát 25 %.
- Výztuž ve dvou řadách.

**Schéma:**



Obr.5.4 - Schéma vedení předpínací výztuže



Obr.5.5 - Rozložení napětí po mimostředně předpjatém průřezu – konec životnosti.

**Předpínací síla:**

Předpokládaná vzdálenost těžiště předpínací výztuže od těžiště průřezu:

$$e_p = 250 \text{ mm}$$

$$-\frac{P_{\infty,k}}{A_c} - \frac{P_{\infty,k}}{W_d} \cdot e_p + \frac{M_{Ek}}{W_d} \leq 0 \rightarrow P_{\infty,k} = \frac{\frac{M_{Ek}}{W_d}}{\left(\frac{1}{A_c} + \frac{e_p}{W_d}\right)} = \frac{\frac{515,97}{0,02553}}{\left(\frac{1}{0,176} + \frac{0,250}{0,02553}\right)} = 1306,07 \text{ kN}$$

**Odhad napětí v předpínací výztuži na konci životnosti:**

$$\sigma_{p,\infty} = 0,75 \cdot \sigma_{p0,max} = 0,75 \cdot 1404 = 1053 \text{ MPa}$$

### 5.4.3 Předběžný návrh rozmístění předpínací výztuže

Minimální plocha předpínací výztuže:

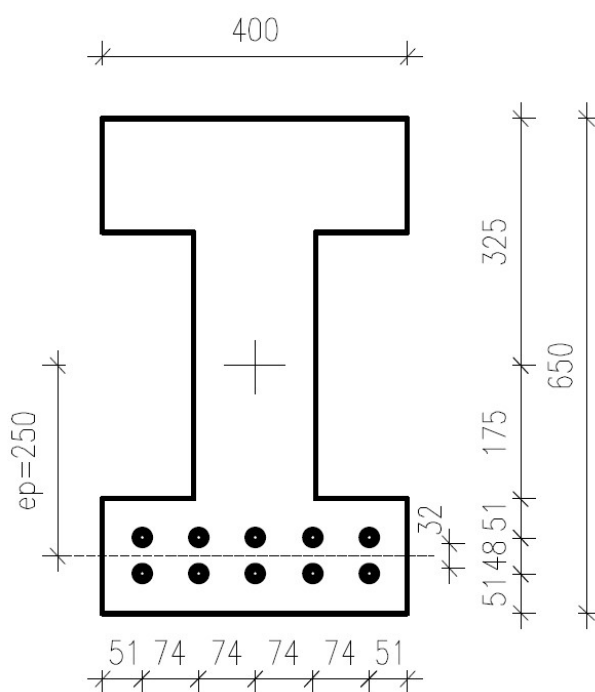
$$A_{p,req} = \frac{P_{\infty,k}}{\sigma_{p,\infty}} = \frac{1306,07}{1053000} = 0,001241 \text{ m}^2$$

Počet lan:

$$n_p = \frac{A_{p,req}}{A_{p1}} = \frac{1241}{150} = 8,27 \rightarrow \text{NÁVRH 10 Lan ve 2 řadách}$$

Maximální předpínací síla:

$$P_{max} = \sigma_{p0,max} \cdot A_p = 1404 \cdot (10 \cdot 150) = 2106000 \text{ N} = 2106,0 \text{ kN}$$



Obr. 5.6 – Předběžné schéma rozmístění předpínací výztuže.

**Poznámka** - Předběžný návrh předpětí pouze slouží jako základní vstupní hodnoty pro iterační výpočet předpětí v příloze P.2.

- Skutečné shrnutí návrhu včetně rozmístění předpínací výztuže a její separace bude obsaženo v závěru této kapitoly (5.9 Závěr).
- V dalších kapitolách bude počítáno se skutečným návrhem z přílohy P.2, ze které vyllynul návrh 8 lan ve 2 řadách a počáteční předpínací síla  $P_0 = 1550 \text{ kN}$

## 5.5 Výpočet ideálních průřezových charakteristik

**Předpoklady** - Výpočet proveden pro průřez v prostředku rozpětí ( $x = 7$  m).

**Pracovní součinitel:**

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195}{37} = 5,27$$

**Plocha ideálního průřezu:**

$$A_i(x) = A_c + A_p(x) \cdot \alpha_p = 176000 + 1200 \cdot 5,27 = 182324 \text{ mm}^2$$

**Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od spodního okraje:**

$$e_{d,i}(x) = \frac{A_c \cdot e_d + \alpha_p \cdot (A_p \cdot e_p)}{A_i} =$$

$$e_{d,i}(x) = \frac{176000 \cdot 325 + 5,27 \cdot (1200 \cdot 250)}{182324} = 322,4 \text{ mm}$$

**Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od spodního okraje:**

$$e_{h,i}(x) = h - e_{d,i} = 650 - 322,4 = 327,6 \text{ mm}$$

**Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od těžiště betonového průřezu:**

$$e_{i-c}(x) = e_d - e_{d,i} = 325 - 322,4 = 2,6 \text{ mm}$$

**Vzdálenost těžiště předpínací výztuže od těžiště ideálního průřezu:**

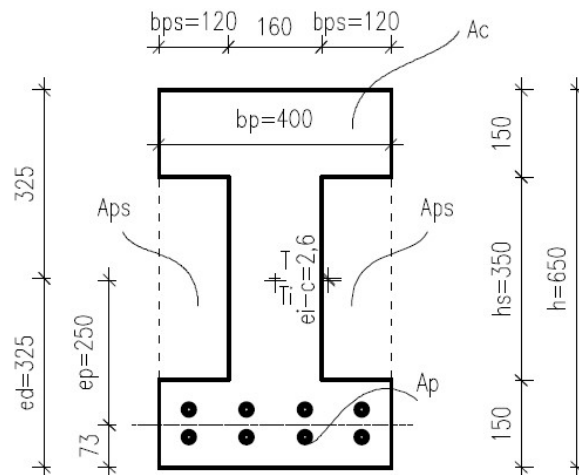
$$e_{p,i}(x) = e_p - e_{i-c} = 250 - 2,6 = 247,4 \text{ mm}$$

**Moment setrvačnosti ideálního průřezu:**

$$I_i(x) = \frac{1}{12} \cdot b_p \cdot h^3 + (b_p \cdot h \cdot e_{i-c}^2) - 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot b_{ps} \cdot h_s^3 - (b_{ps} \cdot h_s \cdot e_{i-c}^2) + \alpha_p \cdot (A_p \cdot e_{p,i})$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 400 \cdot 650^3 + (400 \cdot 650 \cdot 2,6^2) - 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 350^3 - (120 \cdot 350 \cdot 2,6^2) + 5,27 \cdot (1200 \cdot 247,4) =$$

$$I_i = 8685228672 \text{ mm}^4$$



Obr.5.7 - Ideální průřez.

## 5.6 Výpočet ztrát

**Předpoklady** - Hodnoty jsou vyčísleny v místě největšího ohybového momentu ( $x = 7$  m).

- Pro podrobný návrh předpětí a jeho separace po délce vazníku byla konstrukce posuzována v řezech á 1 m. Vyčíslení dalších sledovaných míst viz příloha P.2.

### 5.6.1 Okamžité ztráty

#### 5.6.1.1 Ztráta třením

Ztráta třením u předem předpjatých prvků nevzniká.

$$\Delta\sigma_{p0,x} = 0 \text{ MPa}$$

#### 5.6.1.2 Ztráta postupným napínáním

Řešená konstrukce není postupně napínána, tudíž tato ztráta nevznikne.

$$\Delta\sigma_{pep} = 0 \text{ MPa}$$

#### 5.6.1.3 Ztráta předpětí pokluzem

V řešené konstrukci ztráta pokluzem nevzniká.

$$\Delta\sigma_{pw} = 0 \text{ MPa}$$

#### 5.6.1.4 Ztráta přetvořením opěrného zařízení napínáním naráz

Výrobní ztráta projevující se u předem předpjatého betonu. Tuhost rozpěrného vodorovného prvku, který vzdoruje tahu předpínaných lan je natolik nízká, že dochází k deformaci.

**Předpoklady** - Deformace opěrného zařízení  $\Delta l = 5 \text{ mm}$ .

- Délka napínaných lan  $l_p = 20 \text{ m}$ .

$$\Delta\sigma_{pA} = -\frac{\Delta l}{l_p} \cdot E_p = -\frac{-0,005}{20} \cdot 195000 = -48,75 \text{ MPa}$$

#### 5.6.1.5 Ztráta předpětí vzniklá rozdílem teplot předpínací výztuže a opěrného zařízení

V okamžiku předpínání mají předpínací lana i opěrné zařízení stejnou teplotu. V důsledku proteplování betonu v rámci urychlování jeho tvrdnutí se zvýší teplota předpínací výztuže a většinou i opěrného zařízení. V důsledku změny teploty se změní délka mezi kotevními bloky opěrného zařízení i délka předpínací výztuže.

**Předpoklady** - Teplota opěrného zařízení  $T_A = 50^\circ$ , teplota výztuže  $T_p = 65^\circ$ .

- Souč. tep. roztažnosti opěrného zařízení a výztuže  $\alpha_A = \alpha_{pr} = 0,00001 \text{ K}^{-1}$ .

- Délka mezi kotevními bloky opěrného zařízení  $l_A = 28 \text{ m}$ .

- Délka napínaných lan  $l_p = 20 \text{ m}$ .

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pT} &= \frac{E_p}{l_p} \cdot \left( \alpha_A \cdot l_A \cdot (T_A - T_0) - \alpha_{pr} \cdot l_p \cdot (T_p - T_0) \right) = \\ &= \frac{195000}{20} \cdot \left( 0,00001 \cdot 28 \cdot (50 - 15) - 0,00001 \cdot 20 \cdot (65 - 15) \right) = -1,95 \text{ MPa} \end{aligned}$$

#### 5.6.1.6 Ztráta okamžitou relaxací výztuže

Určení relaxace závisí na několika faktorech – postup předpínání, kotvení a ztráty předpětí způsobené dalšími vlivy jako například teplota, ovlivněná ošetřováním betonu. Jelikož je relaxace předpínací výztuže negativní jev, bude dále snižována tzv. korekcí relaxace podržením napětí.

**1) Korekce podržením napětí  $t_{cor} = 5 \text{ min}$** 

**Předpoklady** - 2. třída relaxačního chování (lana s nízkou relaxací)

- Hodnota ztráty relaxací 1000 hodin po napnutí při teplotě 20°:  $\rho_{1000} = 2,5 \%$

- Doba podržení počátečního napětí  $t_{cor} = 5 \text{ min}$ .

- Počáteční předpínací síla  $P_0 = N_p = 1550 \text{ kN}$ .

Napětí v předpínací výztuži od předpínací pistole:

$$\sigma_{p0} = \frac{N_p}{A_p} = \frac{1550 \cdot 10^3}{1200} = 1291,67 \text{ MPa}$$

Poměr tahového napětí v předpínací výztuži ku pevnosti.

$$\mu_{cor} = \frac{\sigma_{p0}}{f_{pk}} = \frac{1291,67}{1770} = 0,73$$

$$\frac{\Delta\sigma_{p,cor}}{\Delta\sigma_p^+} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu_{cor}} \cdot \left(\frac{t_{cor}}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1 - \mu_{cor})} \cdot 10^{-5} =$$

$$\frac{\Delta\sigma_{p,cor}}{\Delta\sigma_p^+} = -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,73} \cdot \left(\frac{5}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1 - 0,73)} \cdot 10^{-5} = -0,0019$$

**2) Interval ( $t_{cor}$ ; 1 den)**

Napětí ve výztuži po započtení ztrát při předpínání:

$$\Delta\sigma_p^+ = \sigma_{p0} + \Delta\sigma_{pA} = 1291,67 - 48,75 = 1242,92 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{p,cor} = \frac{\Delta\sigma_{p,cor}}{\Delta\sigma_p^+} \cdot \Delta\sigma_p^+ = -0,0019 \cdot 1242,92 = -2,34 \text{ MPa}$$

Nové počáteční napětí:

$$\Delta\sigma_p^+ - \Delta\sigma_{p,cor} = 1242,92 + 2,34 = 1245,56 \text{ MPa}$$

$$\mu_{ST} = \frac{\Delta\sigma_p^+ - \Delta\sigma_{p,cor}}{f_{pk}} = \frac{1245,56}{1770} = 0,704$$

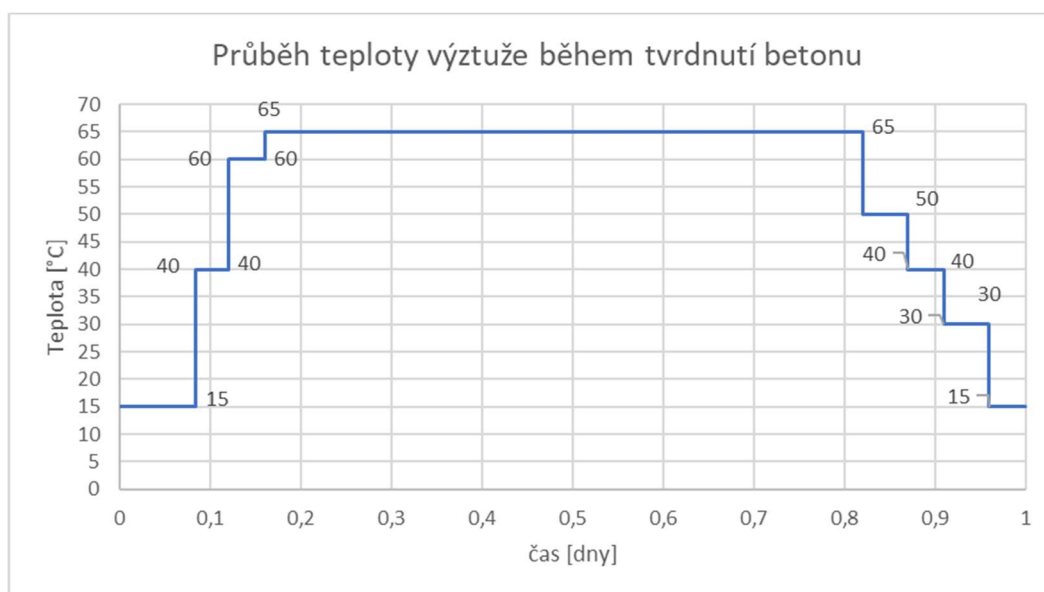
Určení doby relaxace ve výztuži při napětí vzniklé korekcí relaxace:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pr,j} &= -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu_{ST}} \left(\frac{t_e}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1 - \mu_{ST})} (\Delta\sigma_p^+ - \Delta\sigma_{p,cor}) 10^{-5} \\ &= -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,704} \cdot \left(\frac{t_e}{1000}\right)^{0,75(1 - 0,704)} \cdot 1254,56 \cdot 10^{-5} \rightarrow t_e = 0,555 \text{ hod} \end{aligned}$$

Ekvivalentní čas (s vlivem teploty):

Dochází k zrychlení relaxace během tepelného ošetřování betonu při současném zvyšování teploty předpínací výztuže, proto bude doba po napnutí zvětšena o ekvivalentní dobu  $t_{eq}$ , aby byl zahrnut tento účinek tepelného ošetřování. Schéma průběhu teploty je převzato z průvodce předmětem BL11 [8].

$$t_{eq,ST} = \frac{1,14^{T_{max}-2}}{T_{max} - 20} \cdot \sum (T_{\Delta t_i} - 20) \cdot \Delta t_i = 6788,67 \text{ hod}$$



Obr.5.8 - Průběh teploty výztuže během tvrdnutí betonu.

Výpočet ekvivalentní doby $t_{eq,ST}$						
Skutečný čas [hod]	Skutečný čas [dny]	$\Delta t_i$ [dny]	$T(\Delta t_i)$ [°C]	$(T(\Delta t_i)-20) \cdot \Delta t$	$t_{eq,i}$ [dny]	$t_{eq}$ [dny]
2	0,08	0,083	15	-0,42	0	0
1	0,13	0,042	40	0,83	6,73	6,73
1	0,17	0,042	60	1,67	13,47	20,20
16	0,83	0,667	65	30,00	242,45	262,66
1	0,88	0,042	50	1,25	10,10	272,76
1	0,92	0,042	40	0,83	6,73	279,49
1	0,96	0,042	30	0,42	3,37	282,86
1	1,00	0,042	15	-0,21	0,00	282,86
				$(T(\Delta t_i)-20) \cdot \Delta t < 0$		
$t_{eq}$ [s]					24439233,64	
$t_{eq,ST}$ [hod]					6788,67601	

Tab.5.1 - Výpočet ekvivalentní doby.



Fiktivní doba po napnutí:

$$t_a^+ = t_{p0} + t_{eq,ST} = 1 \cdot 24 + 6788,67 = 6812,68 \text{ hod}$$

$$\Delta t_a = t_a^+ - t_{cor} = 6812,68 - \left(\frac{5}{60}\right) = 6812,59 \text{ hod}$$

Ztráta krátkodobou relaxací:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{pr,ST} &= -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu_{ST}} \left(\frac{t_e + \Delta t_a}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1 - \mu_{ST})} (\Delta \sigma_p^+ - \Delta \sigma_{p,cor}) 10^{-5} - \Delta \sigma_{p,cor} = \\ &= -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,7} \cdot \left(\frac{0,55 + 6812,68}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1 - 0,7)} \cdot 1245,3 \cdot 10^{-5} + 2,34 = -16,9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

### 5.6.1.7 Ztráta předpětí okamžitým přetvořením betonu

Součinitel závisí na stáří betonu ( $t_0 = 24 \text{ hod}$ ), cement třídy CEM 42,5 R  $\rightarrow s = 0,2$ :

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left(s \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right)\right)} = e^{\left(0,2 \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{1}\right)^{0,5}\right)\right)} = 0,42$$

Modul pružnosti v čase vnesení předpětí ( $t_0 = 24 \text{ hod}$ ):

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm} \cdot \beta}{f_{cm}}\right)^{0,3} \cdot E_{cm} = \left(\frac{58 \cdot 0,42}{58}\right)^{0,3} \cdot 37 = 28,60 \text{ GPa}$$

$$v(x) = \frac{A_p(x) \cdot E_p(x)}{A_c(x) \cdot E_{cm}(t)} = \frac{1200 \cdot 195000}{176000 \cdot 28600} = 0,046$$

$$\Psi(x) = v \cdot \left(1 + \frac{A_c(x) \cdot e_p^2}{I_c(x)}\right) = 0,046 \cdot \left(1 + \frac{176000 \cdot 250^2}{8,3 \cdot 10^9}\right) = 0,11$$

Napětí ve výztuži těsně před vnesením předpínací síly:

$$\Delta \sigma_{p2} = \sigma_{p0} + \Delta \sigma_{pr,ST} + \Delta \sigma_{pT} + \Delta \sigma_{pA} = 1291,67 - 16,98 - 1,95 - 48,75 = 1223,99 \text{ MPa}$$

Ztráta předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu při předpínání:

$$\Delta \sigma_{pe} = -\frac{\Delta \sigma_{p2} \cdot \Psi}{1 + \Psi} = -\frac{1223,99 \cdot 0,11}{1 + 0,11} = -119,43 \text{ MPa}$$

Změna předpětí pružným přetvořením betonu při předpínání od vlastní tíhy:

$$\Delta\sigma_{peg} = \frac{M_{e0k}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{pi}(x) \cdot \frac{E_p}{E_{cm(t)}} = \frac{117,6 \cdot 10^6}{8,69 \cdot 10^9} \cdot 247,4 \cdot \frac{195000}{28600} = 22,84 \text{ MPa}$$

### 5.6.1.8 Posouzení napětí ve výztuži v okamžiku vnesení předpětí

**Okamžité ztráty celkem:**

$$\begin{aligned} \sum \Delta\sigma_{p2} &= \Delta\sigma_{peg0} + \Delta\sigma_{pe} + \Delta\sigma_{pr,ST} + \Delta\sigma_{pT} + \Delta\sigma_{pA} = \\ &= 22,84 - 119,43 - 16,98 - 1,95 - 48,75 = -164,27 \text{ MPa} \end{aligned}$$

**Napětí ve výztuži v okamžiku po vnesení předpětí do betonu:**

$$\Delta\sigma_{pa} = \sigma_{p0} + \sum \Delta\sigma_{p2} = 1291,67 - 164,27 = 1127,4 \text{ MPa}$$

**Posouzení napětí:**

$$\Delta\sigma_{pa} < \Delta\sigma_{pa,max}$$

$$\underline{1127,4 < 1326 \text{ [MPa]} \rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

### 5.6.2 Dlouhodobé ztráty

**Změna v předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu:**

Změna předpětí od účinků dlouhodobých zatížení (kvazistálé zatížení bez vlastní tíhy). Změna je uvažována pro modul pružnosti betonu v čase 28 dní.

$$\Delta\sigma_{peg1} = \frac{M_{E\psi2} - M_{E0k}}{I_i(x)} \cdot e_{pi}(x) \cdot \frac{E_p}{E_{cm(t)}} = \frac{(264,6 - 117,6) \cdot 10^6}{8,69 \cdot 10^9} \cdot 247,4 \cdot \frac{195000}{28600} =$$

$$\Delta\sigma_{peg1} = 28,55 \text{ MPa}$$

**Změna předpínací síly:**

$$\Delta P_{peg1} = \Delta\sigma_{peg1} \cdot A_p(x) = 28,55 \cdot 1200 = 34,26 \text{ kN}$$

#### 5.6.2.1 Ztráta předpětí dlouhodobou relaxací výztuže

Část této ztráty proběhla v předchozím intervalu (0; 24hod). Vyjádření proběhne stejně jako v předchozím časovém intervalu včetně využití ekvivalentního času. Následující ztráta tedy bude v intervalu  $(t_a^+; t_\infty) = (6812,68 \text{ hod}; 50\text{let} = 438000 \text{ hod})$ .

Napětí v předpínací výztuži ihned po okamžiku  $t_a^+$ :

$$\Delta\sigma_{p,i}^+ = \sigma_{pa} + \Delta\sigma_{peg1} = 1127,4 + 28,55 = 1155,95 \text{ MPa}$$

Doposud proběhlé relaxace:

$$\sum \Delta\sigma_{pr,j} = \Delta\sigma_{p,cor} + \Delta\sigma_{pr,ST} = -2,34 - 16,98 = -19,32 \text{ MPa}$$

$$\mu_{LT} = \frac{\Delta\sigma_{p,i}^+ - \Delta\sigma_{pr,j}}{f_{pk}} = \frac{1155,95 + 19,32}{1770} = 0,664$$

Ekvivalentní čas:

$$\Delta\sigma_{pr,j} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu_{LT}} \left( \frac{t_e}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1 - \mu_{LT})} (\Delta\sigma_{p,i}^+ - \Delta\sigma_{pr,j}) 10^{-5}$$

$$-19,32 = -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,66} \cdot \left( \frac{t_e}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1 - 0,66)} \cdot (1155,95 + 19,32) \cdot 10^{-5} \rightarrow$$

$$t_e = 30550,9 \text{ hod}$$

Ztráta relaxací v daném intervalu:

Interval:

$$\Delta t_i = t_\infty - t_a^+ = (50 \cdot 365 \cdot 24) - 6812,68 = 431187,32 \text{ hod}$$

Ztráta:

$$\Delta\sigma_{pr,LT} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu_{LT}} \left( \frac{t_e + \Delta t_i}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1 - \mu_{LT})} (\Delta\sigma_{p,i}^+ - \Delta\sigma_{pr,j}) 10^{-5} - \sum \Delta\sigma_{pr,j} =$$

$$-0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,664} \cdot \left( \frac{30550,9 + 431187,32}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1 - 0,664)} \cdot 1175,27 \cdot 10^{-5} + 19,32 =$$

$$\Delta\sigma_{pr,LT} = -18,98 \text{ MPa}$$

### 5.6.2.2 Ztráta předpětí smršťováním betonu

Vliv zvýšené teploty na stáří betonu v okamžiku zatížení předpětím:

Kvůli zvýšené teplotě během ošetřování betonu, je nutno uvažovat beton ve stáří jednoho dne, ekvivalentní stářím, které se spočte následujícím vztahem:

$$t_T = \sum e^{\left( \frac{4000}{(273 + T_{\Delta t_i})} - 13,65 \right)} \cdot \Delta t_i = 4,82 \text{ dní}$$

Úprava stáří betonu				
Skutečný čas [hod]	Skutečný čas [dny]	$\Delta t_i$ [dny]	$T(\Delta t_i)$ [°C]	$t_T$ [dny]
2	0,08	0,08	15	0,07
1	0,13	0,04	40	0,17
1	0,17	0,04	60	0,38
16	0,83	0,67	65	4,48
1	0,88	0,04	50	4,62
1	0,92	0,04	40	4,72
1	0,96	0,04	30	4,79
1	1,00	0,04	15	4,82

Tab.5.2 - Výpočet ekvivalentní doby.

Obvod průřezu (hrany ve kterých dochází k vysychání):

$$u(x) = 2 \cdot b_p + 4 \cdot b_{ps} + 4 \cdot h_p + 2 \cdot h_s = 800 + 4 \cdot 120 + 4 \cdot 150 + 2 \cdot 350 = 2580 \text{ mm}$$

Náhradní rozměr průřezu:

$$h_0(x) = \frac{2 \cdot A_c(x)}{u} = \frac{2 \cdot 176000}{2580} = 136,43 \text{ mm}$$

Časová funkce vývoje smršťování:

$$\beta_{ds}(t, t_T) = \frac{t_\infty - t_T}{(t_\infty - t_T) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3(x)}} = \frac{(18250 - 4,82)}{(18250 - 4,82) + 0,04 \cdot \sqrt{136,43^3}} = 0,997$$

Součinitel poměrného smrštění zohledňující vlhkost (RH vnitřního prostředí 50 %):

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left(1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right) = 1,55 \cdot \left(1 - \left(\frac{50}{100}\right)^3\right) = 1,36$$

Základní poměrné přetvoření od smršťování vysycháním, uvažován cement třídy R – součinitelé závisí na druhu cementu:  $\alpha_{ds1} = 6$ ,  $\alpha_{ds2} = 0,11$ :

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[ (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm}}\right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} =$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[ (220 + 110 \cdot 6) \cdot e^{\left(-0,11 \cdot \frac{58}{10}\right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,36 = 0,00054$$

Poměrné přetvoření od smršťování vysycháním v čase  $t$ :

$$\varepsilon_{cd}(x, t) = k_h \cdot \beta_{as}(t, t_T) \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,95 \cdot 1 \cdot 0,00054 = 0,0005$$

hodnoty $k_h$ :	
$h_0(\text{mm})$	$k_h$
100	1
136,43	0,95
200	0,85
300	0,75
500	0,7

Tab.5.3 - Hodnoty  $k_h$ .

Koeficient autogenního smršťování:

$$\beta_{as}(t, t_t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t_\infty}} = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{18250}} = 1$$

Konečné poměrné přetvoření od autogenního smršťování:

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot (50 - 10) \cdot 10^{-6} = 0,0001$$

Poměrné přetvoření od autogenního smršťování v čase  $t$ :

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca,\infty} = 1 \cdot 0,0001 = 0,0001$$

Celkové poměrné přetvoření od smršťování:

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cd}(x, t) + \varepsilon_{ca}(t) = 0,0005 + 0,0001 = 0,0006$$

**Ztráta předpětí smršťováním betonu:**

$$\Delta\sigma_{ps}(x, t) = -\varepsilon_{cs}(t) \cdot E_p = -0,0006 \cdot 195000 = -117,96 \text{ MPa}$$

### 5.6.2.3 Ztráta předpětí dotvarováním betonu

Součinitel závisící na stáří betonu se zahrnutím úpravy stáří betonu vlivem zvýšené teploty

( $t_T = 4,82 \text{ dní}$ ), cement třídy CEM 42,5 R  $\rightarrow s = 0,2$ :

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left(s \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right)\right)} = e^{\left(0,2 \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{4,82}\right)^{0,5}\right)\right)} = 0,75$$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{58}} = 2,21$$

Součinitel vlivu pevnosti betonu:

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,7} = \left(\frac{35}{58}\right)^{0,7} = 0,70$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,2} = \left(\frac{35}{58}\right)^{0,2} = 0,90$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,5} = \left(\frac{35}{58}\right)^{0,5} = 0,78$$

Součinitel zohledňující vliv RH na základní součinitel dotvarování (RH prostředí 50 %):

$$\varphi_{RH} = \left(1 + \frac{\left(1 - \frac{RH}{RH_0}\right)}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1\right) \cdot \alpha_2 = \left(1 + \frac{\left(1 - \frac{50}{100}\right)}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot 0,7\right) \cdot 0,9 = 1,62$$

Stáří betonu s vlivem teploty na součinitel dotvarování:

$$t_0 = t_T \cdot \left(\frac{9}{2 + t_T^{1,2}} + 1\right)^\alpha = 4,82 \cdot \left(\frac{9}{2 + 4,82^{1,2}} + 1\right)^1 = 9,87 \text{ hod}$$

Vliv stáří betonu v čase vnesení zatížení na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 9,87^{0,2}} = 0,6$$

Základní součinitel dotvarování:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,62 \cdot 2,21 \cdot 0,6 = 2,12$$

Součinitel časového průběhu dotvarování po vnesení zatížení:

$$\beta_c(t; t_0) = \left(\frac{(t_\infty - t_T)}{(\beta_H + t_\infty - t_T)}\right)^{0,3} = \left(\frac{(18250 - 4,82)}{(398,88 + 18250 - 4,82)}\right)^{0,3} = 0,99$$

Součinitel zohledňující tvar a RH:

$$\beta_H = 1,5 \cdot (1 + (0,012 \cdot RH)^{18}) \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 < 1500 \cdot \alpha_3 = 1500 \cdot 0,78$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot (1 + (0,012 \cdot 50)^{18}) \cdot 136,43 + 250 \cdot 0,78 = 398,88 < 1170 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Součinitel dotvarování:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t; t_0) = 2,12 \cdot 0,99 = 2,11$$

**Napětí v betonu v úrovni předpínací výztuže vyvozené vlastní tíhou, počátečním předpětím a kvazi-stálými zatíženími**

$$\begin{aligned} \sigma_{c,QP}(x) &= -\frac{P_{ma} + \Delta P_{peg1}}{A_c(x)} - \frac{(P_{ma} + \Delta P_{peg1}) \cdot e_p^2}{I_c(x)} + \frac{M_{e\psi2}}{I_c(x)} \cdot e_p = \\ &= -\frac{(1352,88 + 34,26) \cdot 10^6}{176000} - \frac{(1352,88 + 34,26) \cdot 10^6}{8,3 \cdot 10^9} \cdot 250^2 + \frac{264,6}{8,3 \cdot 10^9} \cdot 250 = \end{aligned}$$

$$\sigma_{c,QP}(x) = -10,36 \text{ MPa}$$

**Ztráta dotvarování:**

$$\sigma_{cp}(x) = \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}(x) = \frac{195000}{37000} \cdot 2,11 \cdot (-10,36) = -115,08 \text{ MPa}$$

#### 5.6.2.4 Dlouhodobé ztráty celkem

Dlouhodobé ztráty s vlivem interakce mezi relaxací předpínací výztuže a objemovými změnami betonu:

$$\begin{aligned} \sigma_{p,c+s+r} &= -\frac{\left( |\varepsilon_{cs}(t) \cdot E_p| + 0,8 \cdot |\Delta\sigma_{pr,LT}| + \left| \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}(x) \right| \right)}{\left( 1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p(x)}{A_c(x)} \cdot \left( 1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot e_p^2 \right) \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)) \right)} = \\ &= -\frac{(117,96 + 0,8 \cdot 18,98 + 115,08)}{\left( 1 + \frac{195000}{37000} \cdot \frac{1200}{176000} \cdot \left( 1 + \frac{176000}{8,3 \cdot 10^9} \cdot 250^2 \right) \cdot (1 + 0,8 \cdot 2,11) \right)} = -202,71 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dlouhodobé ztráty bez zahrnutí interakce (pro hrubou kontrolu ztrát s vlivem interakce):

$$\sigma_{p,c+s+rLT} = \Delta\sigma_{cp} + \Delta\sigma_{ps} + \Delta\sigma_{pr,LT} = -115,08 - 117,96 - 18,98 = -252,02 \text{ MPa}$$

#### 5.6.2.5 Napětí ve výztuži na konci životnosti

Napětí ve výztuži na konci životnosti:

$$\sigma_{p\infty} = \sigma_{pa} + \Delta\sigma_{peg1} + \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 1127,4 + 28,55 - 202,71 = 953,24 \text{ MPa}$$

Síla ve výztuži na konci životnosti  $t_{\infty} = 50 \text{ let}$ :

$$P_{m\infty} = \sigma_{p\infty} \cdot A_p = 953,24 \cdot 1200 = 1143,89 \text{ kN}$$

## 5.7 Posouzení MSP

Posudky v textové části jsou vyčísleny pro průřez v polovině rozpětí. Posudky pro ostatní sledované průřezy viz příloha P.2.

### 5.7.1 Omezení napětí v předpínací výztuži

Uvažovaný moment od krátkodobého zatížení (zatížení od účinků krátkodobých proměnných zatížení), modul pružnosti betonu uvažován v čase 28 dní.:

$$M_{EQk}^- = M_{EQk} = \frac{1}{8} \cdot q_k \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 10,26 \cdot 14^2 = 251,37 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Změna napětí ve výztuži:

$$\Delta\sigma_{peg} = \frac{M_{EQk}^-}{I_i(x)} \cdot e_{p,i}(x) \cdot \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{251,37 \cdot 10^6}{8,69 \cdot 10^9} \cdot 247,4 \cdot \frac{195000}{37000} = 37,74 \text{ MPa}$$

Dolní charakteristická hodnota předpínací síly :

$$P_{k,ma,inf} = r_{inf} \cdot P_{ma}(x) = 0,95 \cdot 1352,88 = 1285,24 \text{ kN}$$

#### Posouzení:

Omezení napětí těsně po vnesení stálého a proměnného zatížení:

$$\sigma_{p\infty} + \Delta\sigma_{peg} - \sigma_{p,c+s+rLT} < k_5 \cdot f_{pk}$$

$$953,24 + 37,74 + 202,71 < 0,75 \cdot 1770$$

$$\underline{1193,69 < 1327,5 \text{ [MPa]} \rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

Omezení napětí na konci životnosti:

$$\sigma_{p\infty} + \Delta\sigma_{peg} < k_5 \cdot f_{pk}$$

$$953,24 + 37,74 < 0,75 \cdot 1770$$

$$\underline{990,97 < 1327,5 \text{ [MPa]} \rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$



## 5.7.2 Omezení napětí v betonu:

- Předpoklady:**
- Posouzení je provedeno v čase vnesení předpětí do betonu  $t_T$  a v čase na konci životnosti  $t_{\infty}$ .
  - Pro posouzení je uvažováno statické schéma prostý nosník podepřený na koncích, pokud není řečeno jinak.
  - Pro posouzení fázi přeprava, manipulace a montáž je uvažováno statické schéma nosník s převislými konci. Pro toto posouzení je uvažována pevnost betonu v tlaku a tahu po 5 dnech od betonáže, proto takové schéma nesmí nastat dříve než po 5 dnech.
  - Kombinace zatížení dle příslušných časových intervalů.
  - Posouzení napětí bude vyčísleno a shrnuto v závěru této kapitoly, následující vzorce jsou psány v obecném tvaru.

### 5.7.2.1 Posouzení napětí v čase po vnesení předpětí

#### Čas po vnesení předpětí, zatížení vlastní tíhou:

$$k_6 = 0,7$$

**Horní vlákna:**

$$\sigma_{h,E0k} = -\frac{P_{k,ma,inf}(x)}{A_i(x)} + \frac{P_{k,ma,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{hi} - \frac{M_{E0k}}{I_i(x)} \cdot e_{hi}(x) < k_6 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**Dolní vlákna:**

$$\sigma_{d,E0k} = -\frac{P_{k,ma,inf}(x)}{A_i(x)} - \frac{P_{k,ma,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{di} + \frac{M_{E0k}}{I_i(x)} \cdot e_{di}(x) < k_6 \cdot f_{ck}(t_T)$$

#### Čas po vnesení předpětí, kvazistálá kombinace zatížení:

$$k_2 = 0,45$$

**Horní vlákna:**

$$\sigma_{h,E0k} = -\frac{P_{k,ma,inf}(x)}{A_i(x)} + \frac{P_{k,ma,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{hi} - \frac{M_{E\psi_2}}{I_i(x)} \cdot e_{hi}(x) < k_2 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**Dolní vlákna:**

$$\sigma_{d,E0k} = -\frac{P_{k,ma,inf}(x)}{A_i(x)} - \frac{P_{k,ma,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{di} + \frac{M_{E\psi_2}}{I_i(x)} \cdot e_{di}(x) < k_2 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**Čas po vnesení předpětí, charakteristická kombinace zatížení:**

$$k_1 = 0,6$$

**Horní vlákna:**

$$\sigma_{h,E0k} = -\frac{P_{k,ma,inf}(x)}{A_i(x)} + \frac{P_{k,ma,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{hi} - \frac{M_{Ek}}{I_i(x)} \cdot e_{hi}(x) < k_1 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**Dolní vlákna:**

$$\sigma_{d,E0k} = -\frac{P_{k,ma,inf}(x)}{A_i(x)} - \frac{P_{k,ma,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{di} + \frac{M_{Ek}}{I_i(x)} \cdot e_{di}(x) < k_1 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**5.7.2.2 Posouzení napětí v čase na konci životnosti****Čas na konci životnosti, kvazistálá kombinace zatížení:**

$$k_2 = 0,45$$

**Horní vlákna:**

$$\sigma_{h,Ed} = -\frac{P_{k,m\infty,inf}(x)}{A_i(x)} + \frac{P_{k,m\infty,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{hi} - \frac{M_{E\psi 2}}{I_i(x)} \cdot e_{hi}(x) < k_2 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**Dolní vlákna:**

$$\sigma_{d,Ed} = -\frac{P_{k,m\infty,inf}(x)}{A_i(x)} + \frac{P_{k,m\infty,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{di} - \frac{M_{E\psi 2}}{I_i(x)} \cdot e_{di}(x) < k_2 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**Čas na konci životnosti, charakteristická kombinace zatížení:**

$$k_1 = 0,6$$

**Horní vlákna:**

$$\sigma_{h,E0k} = -\frac{P_{k,m\infty,inf}(x)}{A_i(x)} + \frac{P_{k,m\infty,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{hi} - \frac{M_{Ek}}{I_i(x)} \cdot e_{hi}(x) < k_1 \cdot f_{ck}(t_T)$$

**Dolní vlákna:**

$$\sigma_{d,E0k} = -\frac{P_{k,m\infty,inf}(x)}{A_i(x)} - \frac{P_{k,m\infty,inf}(x) \cdot e_{pi}(x)}{I_i(x)} \cdot e_{di} + \frac{M_{Ek}}{I_i(x)} \cdot e_{di}(x) < k_1 \cdot f_{ck}(t_T)$$

## 5.8 Posouzení MSÚ

**Předpoklady** - Posouzení mezního stavu únosnosti je provedeno pouze v čase  $t_{\infty}$ .

- Hodnoty jsou vyčísleny v místě největšího ohybového momentu ( $x = 7$  m).
- V posudku uvažována pouze neodseparovaná lana (separovaná jsou neúčinná).

### 5.8.1 Ohyb

Tahová síla v předpínací výztuži (= tlaková síla v betonu):

$$N_{pd} = n \cdot A_{p1} \cdot f_{pd} = 8 \cdot 150 \cdot 1356,52 = 1627,83 \text{ kN}$$

Výška tlačené oblasti:

$$x_c(x) = \frac{N_{pd}}{b_p \cdot \eta \cdot f_{cd}} = \frac{1627,83}{0,400 \cdot 1,0 \cdot 33333} = 122,09 \text{ mm}$$

Těžiště tlačené plochy k hornímu okraji:

$$t_{cc}(x) = \frac{x_c}{2} = \frac{122,09}{2} = 61,04 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil:

$$z(x) = e_{hi}(x) + e_{pi}(x) - t_{cc}(x) = 327,6 + 247,4 - 61,04 = 513,96 \text{ mm}$$

**Návrhový moment únosnosti:**

$$M_{Rd}(x) = N_{pd} \cdot z(x) = 1627,83 \cdot 0,514 = 836,63 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd(x)} > M_{Ed(x)}$$

$$\underline{836,63 > 734,27 \text{ [kN} \cdot \text{m]} \rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

### 5.8.2 Ověření zplastizování předpínací výztuže

Průřezový modul betonu k místu předpětí:

$$W_c^p(x) = \frac{I_c}{e_p} = \frac{8,296 \cdot 10^9}{250} = 33186666,7 \text{ mm}^3$$

Normálová síla v předpětí na konci životnosti:

$$N_{p-}(x) = P_{m\infty} = 1143,89 \text{ kN}$$

Statically určitý moment od předpětí:

$$M_{p-}(x) = N_{p-} \cdot e_p = 1143,89 \cdot 0,250 = 285,97 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Napětí v betonu v místě předpínací výztuže:

$$\sigma_c^p(x) = -\frac{N_p}{A_c} - \frac{M_p}{W_c^p} = -\frac{1627,83 \cdot 10^3}{176000} - \frac{285,97 \cdot 10^6}{33186666,7} = -15,11 \text{ MPa}$$

**Přetvoření betonu v místě předpínací výztuže:**

$$\varepsilon_c^p(x) = \frac{\sigma_c^p(x)}{E_{cm}} = -\frac{15,11}{37000} = -0,00041 = -0,41 \text{ ‰}$$

Základní napětí v předpínací výztuži:

$$\sigma_p^0 = \sigma_{p\infty} = 953,24 \text{ MPa}$$

**Přetvoření předpínací výztuže od samotného předpětí:**

$$\varepsilon_p^0(x) = \frac{\sigma_p^0}{E_p} = \frac{953,24}{195000} = 0,00488\% < \varepsilon_{py} = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1356,52}{195000} = 0,00695\%$$

$$\underline{4,88 \text{ ‰} < 6,95 \text{ ‰} \rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

**Přírůstek poměrného přetvoření předpínací výztuže od vnějšího zatížení:**

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_{cu}}{\lambda \cdot x} \cdot (d_p - x) = \frac{3,5}{0,8 \cdot 122,09} \cdot (650 - 75 - 122,09) = 16,2 \text{ ‰}$$

**Výsledné přetvoření v předpínací výztuži:**

$$\sum \varepsilon_p = \varepsilon_c^p + \varepsilon_p^0 + \Delta\varepsilon_p = 16,2 + 4,88 - 0,41 = 20,71 \text{ ‰}$$

$$\underline{20,71 > 6,95 \text{ [‰]} \rightarrow \text{VÝZTUŽ ZPLASTIZUJE}}$$

### 5.8.3 Posouzení smyk

**Předpoklady** - Posouzení v počátku předpětí na mezi únosnosti v čase  $t_\infty$  (konec životnosti).

Posouvající síla:

$$V_{Ed} = 205,6 \text{ kN}$$

Napětí od předpětí:

$$\sigma_{cp} < 0,2 \cdot f_{cd} = 0,2 \cdot 33,333 = 6,666 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{pd}}{A_c} = \frac{406,96 \cdot 10^3}{260000} = 1,57 \text{ MPa}$$

$$\underline{1,57 < 6,666 \text{ [MPa]} \rightarrow \text{Dále uvažována hodnota } 1,57 \text{ MPa}}$$

Smykové napětí:

$$d_p = e_h + e_p = 325 + 226 = 551 \text{ mm}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{551}} = 1,6$$

$$\tau_{cp} = k \cdot \frac{V_{Ed}}{A_c} = 1,6 \cdot \frac{205,6 \cdot 10^3}{260000} = 1,27 \text{ MPa}$$

**Posouzení:**

Limitní tlakové napětí v betonu:

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd} - 2 \cdot \sqrt{f_{ctd} \cdot (f_{ctd} + f_{cd})} = 33,3 - 2 \cdot \sqrt{33,3 \cdot (1,93 + 33,3)} = 16,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} < \sigma_{c,lim}$$

$$\underline{1,57 < 16,83 \text{ [MPa]} \rightarrow \text{Pro výpočet únosnosti použít následující vzorec:}}$$

Únosnost betonu ve smyku:

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} = \sqrt{1,93^2 + 1,57 \cdot 1,93} = 2,6 \text{ MPa}$$

$$\tau_{cp} < f_{cvd}$$

$$\underline{1,27 < 2,6 \text{ [MPa]} - \text{VYHOVUJE}}$$

V prvku stačí navrhnout pouze konstrukční smykovou výztuž.

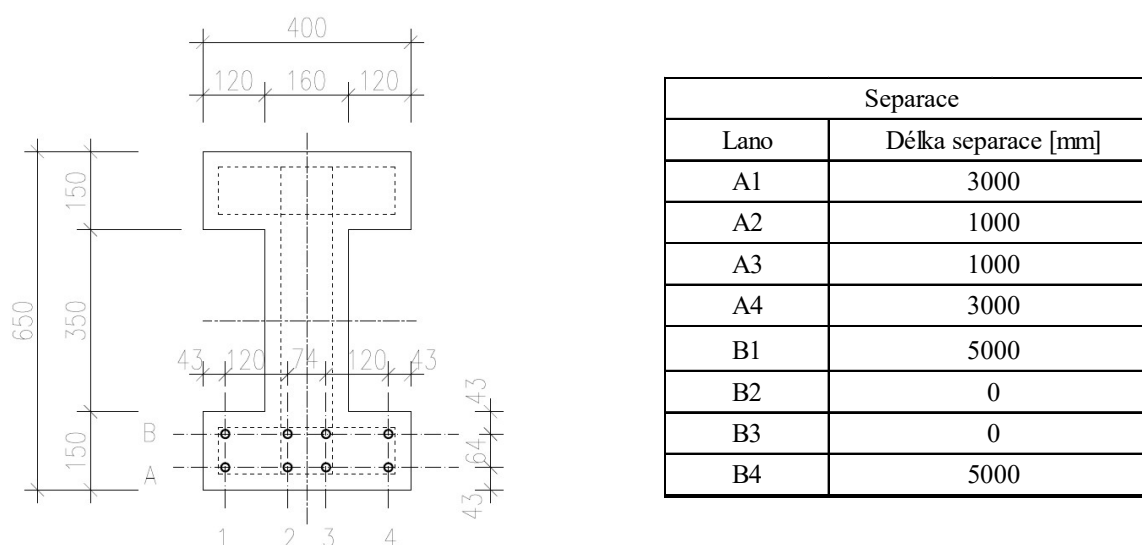
## 5.9 Závěr

Kompletní výpočet předpětí v příloze P.2. Pro výpočet předpětí byl sestaven Excel [15], který umožnil navrhnout konstrukci iteračním výpočtem tak, aby splnila veškeré požadavky ve všech průřezech nosníku.

### 5.9.1 Schéma lan a jejich separace

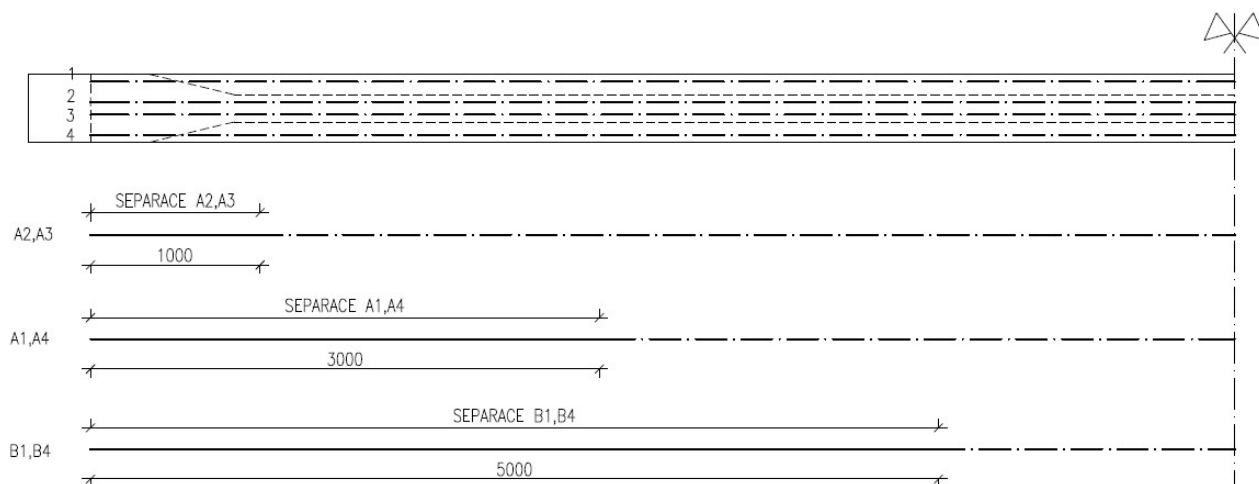
Zrušení soudržnosti mezi předpínací výztuží a betonem (separace) se provede pomocí vložení částí lan do PE trubky s mazivem.

**Řez:**



Obr.5.9 - Navrhnuté rozmístění lan a jejich separace - řez.

**Půdorys:**



Obr.5.10 - Navrhnuté rozmístění lan a jejich separace – půdorys.

### 5.9.2 Shrnutí posouzení napětí

Následující posudek se týká pouze 4 řezů prvku a to jsou 2 řezy na začátku předpětí a 2 řezy v polovině rozpětí, celé posouzení je pak v příloze P.2. Posouzení je rozděleno do dvou tabulek, první se týká statického schématu prostý nosník podepřený na koncích, druhé se týká manipulační, skladovací a dopravní fáze, kde statické schéma odpovídá nosníku s převislými konci délky 1500 mm.

**Předpoklady** - Pro posouzení v čase vnesení předpětí je uvažována pevnost betonu v tlaku i tahu po 1 dni po betonáži se zohledněním vlivu zvýšené teploty.

- Pro posouzení manipulační, skladovací a dopravní fáze uvažována pevnost betonu po 5 dnech, proto statické schéma nosníku s převislými konci může nastat až 5 dní po betonáži!

- Pro posouzení v čase konec životnosti je uvažována charakteristická pevnost betonu v tlaku i tahu ve staří 28 dní.

- Pro kvazistálá zatížení je požadováno plné předpětí (vyloučení tahu). Pro dočasné návrhové situace a pro charakteristické zatížení je dovolen vznik tahových napětí nepřekračujících okamžitou pevnost betonu v tahu (omezené předpětí)

- Legenda: zelená – vyhovuje, žlutá – v průřezu vznikají tahová napětí menší než okamžitá pevnost betonu v tahu.

Napětí [MPa]	B	C	H	I	Podmínka:	
	Poč. předpětí			Střed	TLAK	TAH
$x=$	0,14	1	6	7		
<b>Prostý nosník podepřený na koncích</b>						
<u>Čas po vnesení předpětí, vlastní tíha:</u>						
Horní vlákna:	1,15	1,45	0,60	0,51	17,21	1,74
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
Dolní vlákna	-3,76	-8,83	-14,57	-14,49	17,21	1,74
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
<u>Čas po vnesení předpětí, k-s kombinace:</u>						
Horní vlákna:	0,95	-0,05	-4,83	-5,04	11,06	1,74
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
Dolní vlákna	-3,56	-7,35	-9,22	-9,03	11,06	1,74
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
<u>Čas po vnesení předpětí, charak. kombinace:</u>						
Horní vlákna:	0,60	-2,62	-14,12	-14,52	14,75	1,74
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
Dolní vlákna	-3,21	-4,80	-0,08	0,30	14,75	1,74
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
<u>Čas na konci životnosti, k-s kombinace:</u>						
Horní vlákna:	0,77	-0,47	-5,61	-5,80	22,50	4,10
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
Dolní vlákna	-3,03	-5,75	-6,28	-6,12	22,50	4,10
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
<u>Čas na konci životnosti, charak. kombinace:</u>						
Horní vlákna:	0,42	-3,04	-14,89	-15,28	30	4,10
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
Dolní vlákna	-2,68	-3,21	2,86	3,21	30	4,10
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		

Tab.5.4 - Posouzení napětí (prostý nosník).

Napětí [MPa]	B	C	H	I	Podmínka:	
	Poč. předpětí			Střed	TLAK	TAH
$x=$	0,14	1	6	7		
<b>nosník s převislými konci</b>						
<u>Sklad, manipulace, doprava - vlastní tíha:</u>						
Horní vlákna:	1,31	2,67	2,18	2,07	30,89	3,12
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		
Dolní vlákna	-3,94	-10,18	-16,62	-16,53	30,89	3,12
Posouzení:	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE		

Tab.5.5 - Posouzení napětí (nosník s převislými konci).

Stanovené podmínky jsou splněny. Pro kvazistálé zatížení jsou všechny průřezy plně tlačené, pro ostatní posuzované stavy nevzniká nikde tahové napětí překračující okamžitou tahovou pevnost betonu.

Jedinou výjimkou je průřez u podpory, kde při kvazistálém zatížení vzniká tah v horních vláknech. Tato skutečnost nemá žádný vliv na únosnost, použitelnost ani trvanlivost nosníku. Daný průřez není rozhodující z hlediska únosnosti, nadměrnému rozevření případných trhlin bude bráněno konstrukční podélnou výztuží. Posudek lze proto považovat za vyhovující.



## 6 Návrh oblasti uložení

### 6.1 Úvod

Oblast, které se bude týkat tato kapitola se běžně označuje jako „D-oblast“, neboli oblast diskontinuit. V těchto částech navrhovaného prvku nelze počítat s lineárním průběhem napětí, proto je při posouzení této oblasti použita metoda příhradové analogie (Strut and Tie model).

**Předpoklady** - Příhradové modely jsou modelovány pomocí softwaru CAST [18].

- Pro návrh zvolen ověřený model A. [2]
- Pro model A uvažováno 100% zatížení a velikost vodorovné reakce v uložení vzniklé vlivem imperfekcí uložení se bude rovnat 20% velikosti svislé reakce.
- Prvek bude vyztužen minimálně konstrukční výztuží doporučenou dle normy pro D – oblasti:  $A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c$ .

#### 6.1.1 Maximální návrhové napětí

Poissonovo číslo:

$$\nu' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - \frac{50}{250} = 0,8$$

Vliv příčného tahového namáhání:

- $\nu_1 = 1,0$  Styčník CCC (čistě tlačný)
- $\nu_2 = 0,85$  Styčník CCT (styčník s jedním táhlem)
- $\nu_3 = 0,75$  Styčník CTT (styčník s více táhly)
- $\nu_4 = 0,6$  Vzpěra v tažené oblasti

Styčník CCC:

$$\sigma_{Rd,CCC} = \nu_1 \cdot \nu' \cdot f_{cd} = 1 \cdot 0,8 \cdot 33,333 = 26,67 \text{ MPa}$$

Styčník CCT:

$$\sigma_{Rd,CCT} = \nu_2 \cdot \nu' \cdot f_{cd} = 0,85 \cdot 0,8 \cdot 33,333 = 22,67 \text{ MPa}$$

Styčník CTT:

$$\sigma_{Rd,CTT} = \nu_3 \cdot \nu' \cdot f_{cd} = 0,75 \cdot 0,8 \cdot 33,333 = 20 \text{ MPa}$$

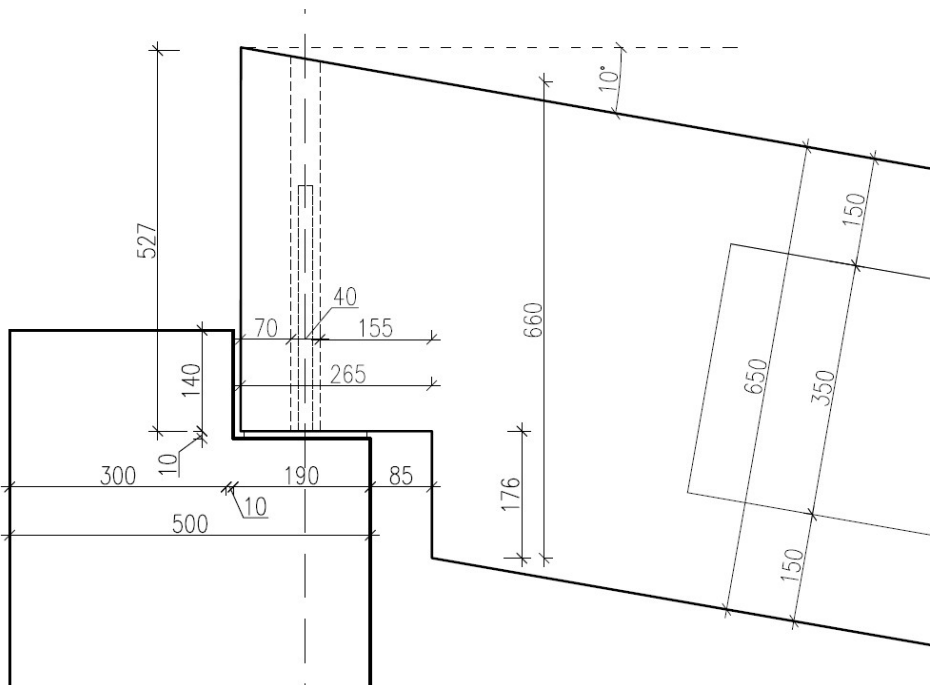
Vzpěra v tažené oblasti:

$$\sigma_{Rd,STR} = \nu_4 \cdot \nu' \cdot f_{cd} = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 33,333 = 16 \text{ MPa}$$

## 6.2 Geometrie oblasti diskontinuit

**Předpoklady** - Vazník b112 je uložen přes pryžové ložisko 170x290 mm na přilehlý sloup.

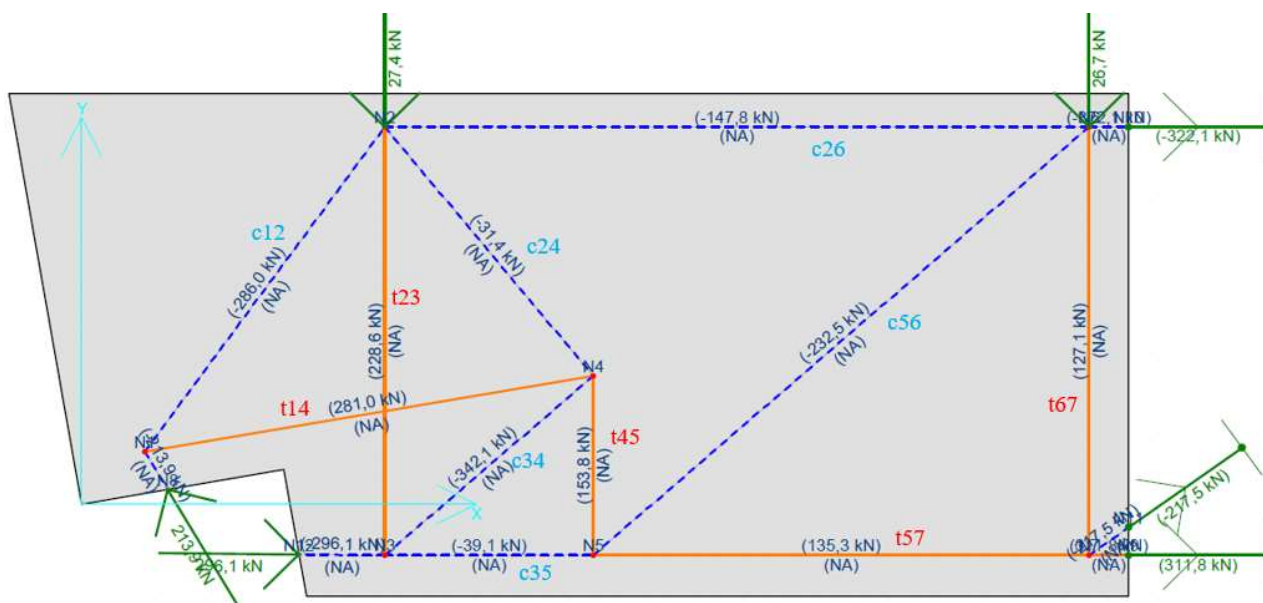
Součástí sloupu jsou trny o průměru 20 mm, na které se vazník osadí.



Obr.6.1 - Geometrie uložení.

## 6.3 Model náhradní příhradoviny

**Předpoklady** - Výpočtový program CAST [18] neumí nadefinovat předpínací sílu ve výztuži, proto je do modelu zadána náhradní síla ve směru této výztuže.



Obr.6.2 - Model náhradní příhradoviny – model A.

## 6.4 Návrh a posouzení

**Předpoklady** - Do výpočtu uvažována předpínací síla, reakce a vnější zatížení (*Obr. Model náhradní příhradoviny*).

### 6.4.1 Vzpěry

**Předpoklady** - Pro posouzení vzpěr použito maximální napětí  $\sigma_{Rd,CCC} = 26,67 \text{ MPa}$ .

- Vzhledem k umístění táhla t57, a to v místě předpínací síly, bude vypočtená tahová síla zanedbána. Výpočtový program neumí nadefinovat takovou předpínací sílu, ale vzhledem k vyhovujícím posudkům napětí z předchozí kapitoly, lze s jistotou předpokládat, že v této oblasti žádné tahy nebudou, případně takové, které zachytí předpínací výztuž.

Minimální tloušťka vzpěry:

$$a_{min} = \frac{F_{Ed}}{b \cdot \sigma_{Rd,max}}$$

Napětí ve vzpěře:

$$\sigma_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{b_i \cdot a_{des}}$$

Návrh vzpěr							
Prvek	$F_{Ed}$ [kN]	$\sigma_{Rd,max}$ [MPa]	$b_i$ [mm]	$a_{min}$ [mm]	$a_{des}$ [mm]	$\sigma_{Ed}$ [MPa]	Využití [%]
c12	286	26,67	400	26,8125	70	10,214	38,30
c24	31,4	26,67	400	2,94375	40	1,963	7,36
c26	147,8	26,67	400	13,85625	40	9,238	34,64
c34	342,1	26,67	400	32,07188	70	12,218	45,82
c35	39,1	26,67	160	9,164063	40	6,109	22,91
c56	232,5	26,67	400	21,79688	40	14,531	54,49

Tab.6.1 - Návrh vzpěr.

## 6.4.2 Táhla

Požadovaná plocha výztuže:

$$A_{s,req} = \frac{F_{Ed}}{f_{yd}}$$

Minimální tloušťka táhla:

$$a_{min} = 2 \cdot c + n \cdot \varphi + (n - 1) \cdot s$$

Prvek	$F_{Ed}$ [kN]	$A_{s,req}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [mm]	vrstvy m [- ]	počet n [ks]	$A_{s,prov}$ [mm <sup>2</sup> ]	$a_{min}$ [mm]	$a_{des}$ [mm]	Využití [%]
t14	281	646,3	16	2	2	804,25	122	122	80,36
t23	228,6	525,78	10	2	4	628,32	210	210	83,68
t45	153,8	353,74	10	2	3	471,24	160	160	75,07
t57	Tuto sílu pobere předpínací výztuž								
t67	127,1	292,33	10	2	3	471,24	160	160	62,03

Tab.6.2 - Návrh táhel.

### 6.4.2.1 Kotvení tahové výztuže:

Táhlo t14 (smyčky  $\varphi$  16 mm):

Zakotvení smyčky u styčníku 1:

Napětí ve výztuži:

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot f_{yd} = \frac{646,3}{804,25} \cdot 434,783 = 349,39 \text{ MPa}$$

Návrhová kotevní délka:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,73 = 6,14 \text{ MPa}$$

$$\eta_1 = 1 \rightarrow \text{Dobré podmínky}$$

$$\eta_2 = 1 \rightarrow \varphi < 32 \text{ mm}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{\varphi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{16}{4} \cdot \frac{349,39}{6,14} = 228 \text{ mm}$$

$$l_{b,min} = \max(0,3 \cdot l_{b,rqd}; 10 \cdot \varphi; 100 \text{ mm}) = \max(0,3 \cdot 228; 10 \cdot 16; 100 \text{ mm}) = 160 \text{ mm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 0,7 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 228 = 159,6 \text{ mm} > l_{b,min} = 160 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 = 0,7$$

$$\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot \frac{c_{nom} - \varphi}{\varphi} = 1 - 0,15 \cdot \frac{25 - 3 \cdot 16}{16} = 1,2 \rightarrow 1$$

$$\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 1$$

$$l_{bd} = 160 \text{ mm}$$

Smyčky  $\varphi 16$  je nutné protáhnout 160 mm od vnitřního líce ložiska (viz 6.4.4).

Minimální poloměr zakřivení prutu (smyčky):

$$a_b = c_{nom,s} + \varphi_{tř} + \frac{\varphi}{2} = 25 + 10 + \frac{16}{2} = 43 \text{ mm}$$

$$\varphi_{m,min} = \frac{F_{bt}}{f_{cd}} \cdot \left( \frac{1}{a_b} + \frac{1}{2 \cdot \varphi} \right) = \frac{0,804 \cdot (\pi \cdot 8^2 \cdot 434,782)}{33,3} \cdot \left( \frac{1}{43} + \frac{1}{2 \cdot 16} \right) = 115 \text{ mm}$$

$$\varphi_m = 120 \text{ mm}$$

Zakotvení u styčnicku 4:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 1,0 \cdot 2,73 = 4,3 \text{ MPa}$$

$$\eta_1 = 0,7 \rightarrow \text{Špatné podmínky}$$

$$\eta_2 = 1 \rightarrow \varphi < 32 \text{ mm}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{\varphi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{16}{4} \cdot \frac{349,39}{4,3} = 325 \text{ mm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 325 > l_{b,min} = 160 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 1$$

Smyčky  $\varphi 16$  je nutné protáhnout 325 mm za styčnick 4 (viz 6.4.4).

### 6.4.3 Konstrukční svislá a vodorovná výztuž ozubu

#### Tlačená diagonála c12:

Vznikající příčné tahy:

$$T = 2 \cdot 0,22 \cdot C_{12} = 2 \cdot 0,22 \cdot 286 = 125,84 \text{ kN}$$

$$T_H = 125,84 \cdot \sin(44^\circ) = 87,42 \text{ kN}$$

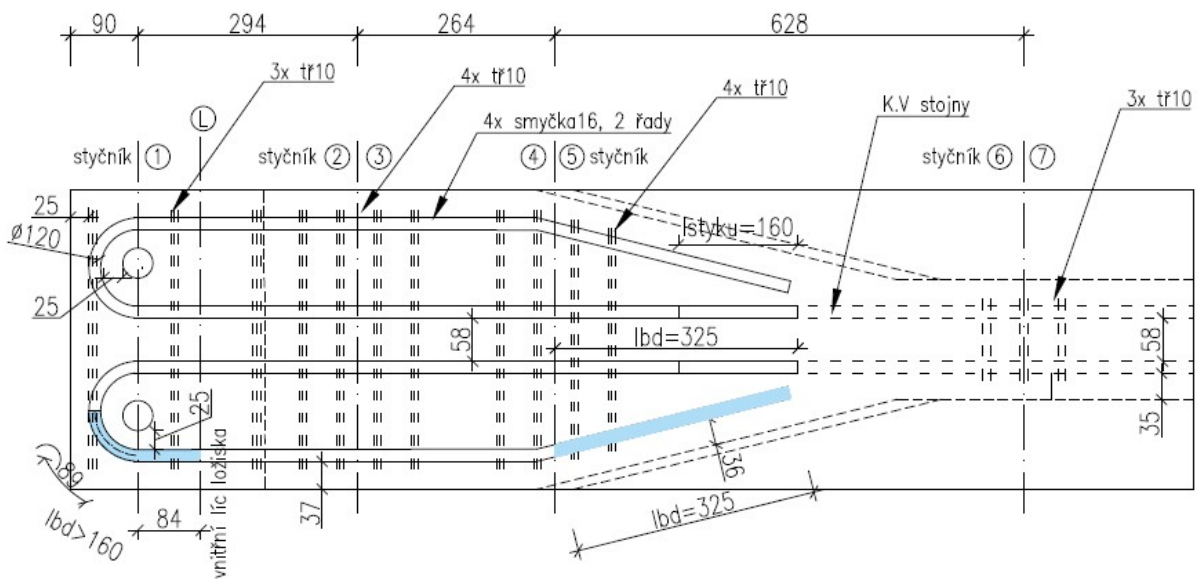
$$T_V = 125,84 \cdot \cos(44^\circ) = 90,52 \text{ kN}$$

Výztuž:

$$A_{s,req,H} = \frac{T_H}{f_{yd}} = \frac{87420}{434,782} = 201,06 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{NÁVRH } 2 \times 2\phi 16; A_{s,prov,H} = 802 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,req,V} = \frac{T_V}{f_{yd}} = \frac{90520}{434,782} = 208,20 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{NÁVRH } 3 \times 2\phi 10; A_{s,prov,H} = 471 \text{ mm}^2$$

### 6.4.4 Schéma vyztužení a kotevních délek



Obr. 6.3 - Spodní líc oblasti uložení.

## 7 Návrh manipulačních úchytů

### 7.1 Návrh

**Předpoklady** - Úhel závěsu je uvažován  $30^\circ$ .

- Materiál úchytu: ocel 11 373,  $f_{yk} = 205 \text{ MPa}$ .
- Z hlediska bezpečnosti byla celková tíha dílce vyčíslena z jednotné plochy průřezu nad podporou, která je větší než plocha např. v polovině rozpětí.
- Počet uvažovaných úchytů  $n = 2 \text{ ks}$  a jejich průměr  $d_s = 28 \text{ mm}$ .
- Pro stanovení zatížení od tření dílce s formou je uvažován součinitel  $q_{adh} = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ , který vychází z předpokladu, že je použita olejem ošetřená ocelová forma.

Průřezová plocha jedné větve oka:

$$A_s = \pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{28}{2}\right)^2 = 615,75 \text{ mm}^2$$

Charakteristická tíha dílce:

$$F_k = A_c \cdot \gamma_{con} \cdot L_n = 0,26 \cdot 25 \cdot 14,17 = 92,11 \text{ kN}$$

Kontaktní plocha mezi betonem a formou:

$$A_f = b_p \cdot L_n = 400 \cdot 14700 = 5668000 \text{ mm}^2$$

Zatížení od tření dílce s formou:

$$F_{adh} = q_{adh} \cdot A_f = 1 \cdot 5,668 = 5,67 \text{ kN}$$

**Manipulační síla při uvolňování prvku z formy:**

$$N_{Ed} = 1,3 \cdot \frac{\gamma_G}{n \cdot \cos(\beta)} \cdot (F_k + F_{adh}) = 1,3 \cdot \frac{1,35}{2 \cdot \cos(30)} \cdot (92,11 + 5,67) = 99,07 \text{ kN}$$

**Manipulační síla obecná:**

$$N_{Ed} = 1,8 \cdot \frac{\gamma_G \cdot \gamma_{man}}{n \cdot \cos(\beta)} \cdot F_k = 1,8 \cdot \frac{1,35 \cdot 1}{2 \cdot \cos(30)} \cdot 92,11 = 129,22 \text{ kN}$$

Dále uvažována síla  $N_{Ed} = 129,22 \text{ kN}$

**Návrhová tahová síla:**

$$N_{Ed1} = \frac{0,6 \cdot N_{Ed}}{\cos(0,5 \cdot \beta + 30^\circ)} = \frac{0,6 \cdot 129,22}{\cos(0,5 \cdot 29^\circ + 30^\circ)} = 108,7 \text{ kN}$$

Součinitel Kappa pro zohlednění vlivu velikosti profilu na tahovou únosnost:

$$K = 0,05 \cdot d_s + 0,3 = 0,05 \cdot 18 + 0,3 = 1,2 \leq 1$$

Dále uvažován součinitel kappa  $K = 1$

**7.2 Posouzení**

1. Podmínka spolehlivosti:

$$N_{Ed1} < N_{Ed}$$

$$\underline{108,7 < 129,22 \text{ [kN]} \rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

2. Podmínka spolehlivosti:

$$N_{Ed1} < K \cdot A_s \cdot f_{yd} = 1 \cdot 615,75 \cdot 178,26$$

$$\underline{108,7 < 109,76 \text{ [kN]} \rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

**7.3 Kotevní délky**

**Předpoklady** - Vztah pro výpočet hodnoty  $l_{bd}$  převzat z tabulky kotevních délek pro beton C20/25 a vyšší.

Kotevní délka:

$$l_b \geq l_{bd} = d_s \cdot 30 = 28 \cdot 30 = 840 \text{ mm}$$

Hloubka větve oka:

$$l_s \geq 0,5 \cdot l_b = 0,5 \cdot 840 = 420 \text{ mm}$$

Minimální vodorovné kotvení:

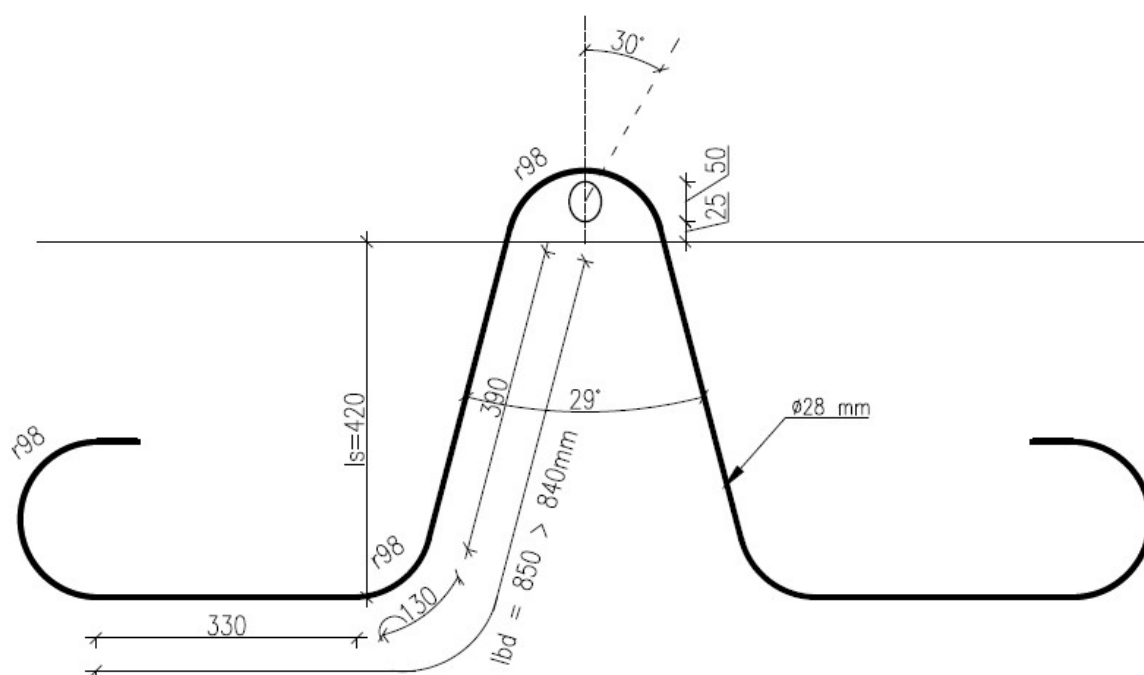
$$10 \cdot d_s = 10 \cdot 28 = 280 \text{ mm}$$

**Poloměr ohýbání:**

$$\varphi > 16 \text{ mm} \rightarrow d = 7 \cdot \varphi = 7 \cdot 28 = 196 \text{ mm}$$



## 7.4 Schéma úchytu



Obr.6.4 - Návrh manipulačního úchytu.

## 8 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a posoudit předpjatý vazník dostavby výrobní haly. Pro stanovení hodnot vnitřních sil byl sestrojen MKP model celé výrobní haly. Výsledky byly dále porovnány a vyhodnoceny s ručním výpočtem.

Samotným návrhem předpjatého vazníku bylo vyhověno požadavkům investora a návrh i posouzení proběhly zdárně. Nosník vyhověl všem požadavkům na použitelnost i únosnost ve všech posuzovaných stádiích.

Posouzení oblasti uložení vazníku, tzv. oblasti diskontinuit proběhlo pomocí softwaru CAST. V tomto programu byl sestrojen ověřený model příhradové analogie, ale vzhledem k absenci možnosti nadefinování předpínací síly do modelu je výsledný model lehce zkreslen. Nicméně předpínací síla byla nahrazena vnějším zatížením ve směru předpínací síly a vzhledem k vyhovění posudkům napětí samotného předpětí lze považovat návrh za vyhovující.

# Literatura

## Publikace

- [1] NAVRÁTIL Jaroslav. Předpjaté betonové konstrukce. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008.
- [2] KOHOUTKOVÁ Alena, PROCHÁZKA Jaroslav, ŠMEJKAL Jiří. Modelování a vyztužování betonových prvků. České technika – nakladatelství ČVUT, Thákurova 1, 160 41 Praha 6, 2013.
- [3] NILSON H. Arthur, DARWIN David, DOLAN W. Charles. Design of concrete structures, 14th edition. Published by McGraw-Hill, 2010.
- [4] FOGLAR Marek, FRANTOVÁ Michaela, JIŘÍČEK Pavel. Betonové konstrukce 3, Navrhování betonových konstrukcí na MSP, úvod do předpjátého betonu. České technika – nakladatelství ČVUT, Thákurova 1, 160 41 Praha 6, 2011.
- [5] ZICH Miloš, BAŽANT Zdeněk. Montované betonové konstrukce. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2018.
- [6] BÍLÝ Petr. Úvod do navrhování poruchových oblastí ŽB konstrukcí metodou příhradové analogie. [online].  
Dostupné z:  
<http://people.fsv.cvut.cz/www/bilypet1/vyuka/YMVB/YMVB02.pdf>
- [7] PROCHÁZKA Jaroslav, ŠTEFAN Radek. Požární spolehlivost betonových a zděných konstrukcí (133PSBZ). [online]. Praha: České vysoké učení technické.  
Dostupné z:  
<http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/vyuka/133PSBZ.html>
- [8] NAVRÁTIL Jaroslav, ZICH Miloš. Předpjatý beton, průvodce předmětem BL11, modul P01. [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2006.  
Dostupné z:  
[http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BL11-Predpjaty%20Beton/BL11-Predpjaty\\_beton\\_pruvodce\\_%2B\\_priklad\\_vaznice\\_predem\\_predpjate.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BL11-Predpjaty%20Beton/BL11-Predpjaty_beton_pruvodce_%2B_priklad_vaznice_predem_predpjate.pdf)

## Normy a technické předpisy

- [9] ČSN EN 1991-1-1 (73 0035). Eurokód 1 Zatížení konstrukcí - Část 1-1 Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha 2004.
- [10] ČSN EN 1991-1-3 (73 0035) ed. 1 Eurokód 1 Zatížení konstrukcí - Část 1-3 Obecná zatížení - Zatížení sněhem. Praha 2005.
- [11] ČSN EN 1990 (73 0002) ed. 2 - Eurokód Zásady navrhování konstrukcí. Praha 2015.
- [12] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) ed. 2 Z\_00. Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha 2016.

## Podklady výrobce

- [13] KINGSPAN a.s. Kingspan izolační panely. [online].  
Dostupné z:  
<https://www.kingspan.com/cz/cs-cz/produkty/izolacni-sendvicove-panely/ke-stazeni>
- [14] VOELSTALPINE Profilform s.r.o. Technický manuál, konstrukční systémy Metsec pro sekundární ocelové konstrukce – střešní vaznice. [online].  
Dostupné z:  
<http://www.voestalpine.com/profilform-cz/cs/downloads/>

## Software

- [15] MICROSOFT, Microsoft Excel [2019].
- [16] SCIA ENGINEER, verze 19.1 [2019]
- [17] AUTODESK, AutoCAD 2018 [2018]
- [18] TJHIN, Tjen a KUCHMA, Daniel. CAST – Computer Aided Strut and Tie. University of Illinois. [2007]
- [19] PTC Mathcad Prime 5.0.0.0 [2019]
- [20] IDEA StatiCA, 10.1 [2020]

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1 - Skladba střešního pláště</i> .....	[8]
<i>Obr. 1.2 - Členění haly</i> .....	[9]
<i>Obr. 2.1 - Geometrie ve směru osy x (vlevo); geometrie ve směru osy y (vpravo)</i> .....	[10]
<i>Obr. 3.1 - Řešený vazník</i> .....	[14]
<i>Obr. 3.2 - Schéma řešené vazby</i> .....	[14]
<i>Obr. 3.3 - Zatěžovací stav 3, Stálé zatížení – tíha střechy</i> .....	[15]
<i>Obr. 3.4 - Zatěžovací stav 4; Proměnné zatížení – sníh</i> .....	[15]
<i>Obr. 3.5 - Zatěžovací stav 5; Proměnné zatížení – vítr příčný (tlak)</i> .....	[16]
<i>Obr. 3.6 - Zatěžovací stav 6; Proměnné zatížení – vítr příčný (sání)</i> .....	[16]
<i>Obr. 3.7 - Zatěžovací stav 7; Proměnné zatížení – vítr podélný (sání)</i> .....	[16]
<i>Obr. 3.8 - Ohybový moment od charakteristického zatížení</i> .....	[18]
<i>Obr. 3.9 - Ohybový moment od návrhového zatížení</i> .....	[18]
<i>Obr. 3.10 - Ohybový moment od časté kombinace zatížení</i> .....	[19]
<i>Obr. 3.11 - Ohybový moment od kvazistálé kombinace zatížení</i> .....	[19]
<i>Obr. 3.12 - Posouvající síly nad podporami od návrhového zatížení</i> .....	[19]
<i>Obr. 5.1 - Rozložení napětí po mimostředně předpjatém průřezu</i> .....	[22]
<i>Obr. 5.2 - Tvar vazníku</i> .....	[23]
<i>Obr. 5.3 - Řez vazníkem</i> .....	[24]
<i>Obr. 5.4 - Schéma vedení předpínací výztuže</i> .....	[26]
<i>Obr. 5.5 - Rozložení napětí po mimostředně předpjatém průřezu – konec životnosti</i> .....	[26]
<i>Obr. 5.6 – Předběžné schéma rozmístění předpínací výztuže</i> .....	[27]
<i>Obr. 5.7 - Ideální průřez</i> .....	[29]
<i>Obr. 5.8 - Průběh teploty výztuže během tvrdnutí betonu</i> .....	[31]
<i>Obr. 5.9 - Navrhnuté rozmístění lan a jejich separace - řez</i> .....	[46]
<i>Obr. 5.10 - Navrhnuté rozmístění lan a jejich separace – půdorys</i> .....	[46]
<i>Obr. 6.1 - Geometrie uložení</i> .....	[50]
<i>Obr. 6.2 - Model náhradní příhradoviny – model A</i> .....	[50]
<i>Obr. 6.3 - Spodní líc oblasti uložení</i> .....	[54]
<i>Obr. 6.4 - Návrh manipulačního úchytu</i> .....	[57]

## Seznam tabulek

<i>Tab.2.1 - Zatížení větrem (směr x) .....</i>	<i>[10]</i>
<i>Tab.2.2 - Zatížení větrem (směr y) .....</i>	<i>[10]</i>
<i>Tab.2.3 - Zatížení sedlové střechy.....</i>	<i>[11]</i>
<i>Tab.2.4 - Zatížení podlahy.....</i>	<i>[11]</i>
<i>Tab.2.5 - Zatížení předpjatého vazníku.....</i>	<i>[12]</i>
<i>Tab.3.1 - Srovnání výpočtu vnitřních sil .....</i>	<i>[20]</i>
<i>Tab.3.2 - Finálních vnitřních sil.....</i>	<i>[20]</i>
<i>Tab.5.1 - Výpočet ekvivalentní doby .....</i>	<i>[31]</i>
<i>Tab.5.2 - Výpočet ekvivalentní doby .....</i>	<i>[36]</i>
<i>Tab.5.3 - Hodnoty <math>k_h</math> .....</i>	<i>[37]</i>
<i>Tab.5.4 - Posouzení napětí (prostý nosník).....</i>	<i>[48]</i>
<i>Tab.5.5 - Posouzení napětí (nosník s převislými konci).....</i>	<i>[48]</i>
<i>Tab.6.1 - Návrh vzpěr.....</i>	<i>[52]</i>
<i>Tab.6.2 - Návrh táhel .....</i>	<i>[52]</i>

## Seznam příloh

- P.1. Zatížení větrem – MS Excel*
- P.2. Statické výpočty – MS Excel*

## Seznam výkresů

- 1. Výkres výztuže + výkres tvaru*
- 2. Výkres předpínací výztuže*