

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**KONSTRUKCE KOUŘOVODU**

**STEEL CONSTRUCTION OF A FLUE**

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Vypracovala: Thu Huong Tranová

2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tranová** Jméno: **Thu Huong** Osobní číslo: **484615**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**  
Studijní program: **Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Konstrukce kouřovodu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Steel construction of a flue**

Pokyny pro vypracování:

Návrh nosné ocelové konstrukce kouřovodu (stěna a výztužný rám). Optimalizace konstrukčního systému a zastudena tvarovaných profilů rámu. Výkresová dokumentace konstrukce (řez kouřovodem a případné detaily). Technická zpráva (pouze k navržené části).

Seznam doporučené literatury

Návrh konstrukce bude proveden dle evropských norem. Tj. zejména využití částí ČSN ČSN EN 1993.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D. katedra ocelových a dřevěných konstrukcí FSv**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.5.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Ryáček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, ČSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**22.2.2024**

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené odborné literatury a odborného vedení vedoucího práce prof. Ing. Michal Jandery, Ph.D. Uvedla jsem veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20. 5. 2024

Thu Huong Tranová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu své bakalářské práce panu prof. Ing. Michalu Janderovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a za trpělivost, ochotu a čas, který mi věnoval při zpracování této práce. Nejvíce bych chtěla poděkovat své rodině za poskytnutí kvalitního zázemí pro mé studium a svým blízkým za duševní podporu.

## **Abstrakt**

Předmětem této bakalářské práce je statický návrh, posouzení a optimalizace nosných prvků výseku konstrukce kouřovodu z tenkostěnných zastudena tvarovaných profilů. První část obsahuje popis geometrie konstrukce, stanovení základních návrhových údajů objektu a zatížení působící na konstrukci. Poté je proveden návrh a posouzení příčně zatížených plechů na zatížení větrem a tlakem. Následně jsou ve výpočetním programu Scia Engineer vymodelovány varianty statických schémat rámu s návrhem ztužení, z nichž je vybrána jedna výsledná varianta, pro kterou je proveden ruční výpočet vybraných nosných prvků. Druhá část práce je zaměřená na optimalizaci konstrukčního systému pomocí programu vytvořeným autorkou práce. Cílem tohoto programu je návrh a posouzení prvků řešeného objektu v souladu s platnými normami ČSN EN. Výstupem z programu jsou seznamy vyhovujících profilů, na základě kterých je možné najít nejvíce vyhovující kombinaci nosných prvků z hlediska efektivity konstrukce.

### **Klíčová slova**

tenkostěnná konstrukce, ocelový rám, boulení, vnitřní síly, optimalizace

## **Abstract**

The subject of the present bachelor thesis is the static design, assessment and optimization of load-bearing elements of a section of a flue structure made of cold-formed thin-walled profiles. The first part includes a description of the geometry of the structure, determination of the basic design data of the object and the loads acting on the structure. Subsequently, the design and assessment of transversely loaded plates for wind and pressure loads are carried out. Furthermore, variants of static schemes of the frame with bracing designs are modelled in Scia Engineer software from which one final variant is selected, and the chosen load-bearing elements are manually calculated. The second part of the thesis focuses on optimizing the structural system using a program created by the author of this thesis. The goal of this program is to design and assess elements of the studied object in accordance with valid ČSN EN standards. The output of the program are lists of compliant profiles, based on which the most suitable combination of load-bearing elements in terms of structural efficiency is selected.

### **Keywords**

thin-walled structure, steel frame, buckling, internal forces, optimization

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**TECHNICKÁ ZPRÁVA**

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Vypracovala: Thu Huong Tranová

2024

# Obsah

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 1   | Základní charakteristika konstrukce ..... | 3 |
| 1.1 | Konstrukční řešení .....                  | 3 |
| 1.2 | Statické schéma.....                      | 3 |
| 2   | Zatížení .....                            | 3 |
| 2.1 | Stálé zatížení .....                      | 3 |
| 2.2 | Proměnné zatížení .....                   | 4 |
| 3   | Vnitřní síly .....                        | 4 |
| 4   | Prvky nosné konstrukce .....              | 4 |
| 5   | Výroba a montáž ocelové konstrukce .....  | 4 |
| 6   | Ochrana proti korozi .....                | 4 |
| 7   | Ochrana proti požáru .....                | 4 |
| 8   | Použité podklady pro zpracování.....      | 5 |
| 8.1 | Normy .....                               | 5 |
| 8.2 | Software .....                            | 5 |
| 8.3 | Další použité zdroje .....                | 5 |

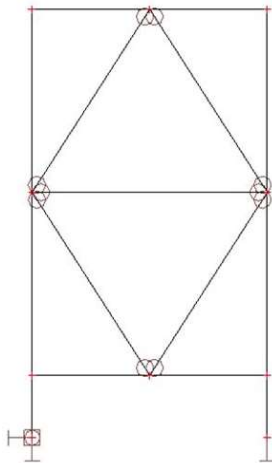
# 1 Základní charakteristika konstrukce

## 1.1 Konstrukční řešení

Řešená rámová konstrukce je součástí svazku čtyř ráků z tenkostěnných za studena tvarovaných profilů, které tvoří nosnou konstrukci pro výsek výměníku pro zpětné získávání tepla primárního vzduchu. Rám má celkovou výšku 5,65 m a šířku 3 m. Nosnou konstrukci rámu tvoří dva vodorovné nosníky o délce 3 m a dva sloupy o délce 4,7 m. Ztužení rámu zajišťují profily průřezu RO 33,7/2,9 a RO 42,4/5,6.

## 1.2 Statické schéma

Pro výpočet vnitřních sil je zvolena tato varianta statického schématu. Rámové rohy se uvažují jako tuhé a ztužující prutové prvky jsou připojeny kloubově.



## 2 Zatížení

Veškerá stálá a proměnná zatížení působící na konstrukci jsou součástí zadání. Pro porovnání je proveden kontrolní výpočet zatížení sněhem a větrem. Zatížení sněhem se uvažuje pro sněhovou oblast II, zatížení větrem je vypočteno pro větrnou oblast II s kategorií terénu III.

K výpočtu zatížení jsou využity normy:

ČSN EN 1991-1-3: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – zatížení sněhem  
ČSN EN 1991-1-4: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – zatížení větrem

Hodnoty zadaných i vypočtených zatížení jsou charakteristické, přepočet zatížení na návrhové hodnoty se provede vynásobením dílčím součinitelem bezpečnosti, pro stálá zatížení  $\gamma_G = 1,35$  a pro proměnná zatížení  $\gamma_Q = 1,50$ .

### 2.1 Stálé zatížení

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Vlastní tíha konstrukce:             | 7850 kg/m <sup>3</sup> |
| Vlastní tíha kanálů a příslušenství: | 0,9 kN/m               |
| Ostatní stálé od příslušenství:      | 11,2 kN/m              |
| Ostatní stálé od tepelné izolace:    | 0,6 kN/m               |



## 2.2 Proměnné zatížení

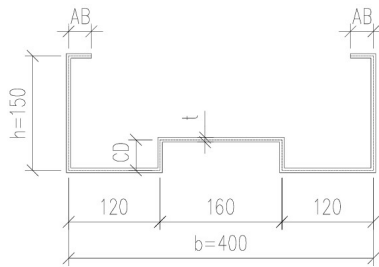
|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| Užitné provozní:          | 1,2 kN/m              |
| Ostatní užitné:           | 3,9 kN/m              |
| Sníh – sněhová oblast II: | 1,2 kN/m <sup>2</sup> |
| Vítr – větrná oblast II:  | 1,2 kN/m              |
| Přetlak:                  | 20,0 kN/m             |
| Podtlak:                  | 2,0 kN/m              |
| Teplota:                  | 205 °C                |

## 3 Vnitřní síly

Vnitřní síly jsou vypočteny v programu Scia Engineer 22.1.

## 4 Prvky nosné konstrukce

Nosné prvky pro řešenou rámovou konstrukci byly optimalizovány pomocí programu vytvořeným v rámci této bakalářské práce. Profily jsou navrženy s šířkou 400 mm, výškou 150 mm, třída oceli S235JR.



|                   |  |
|-------------------|--|
| Horní příčel P1:  | tloušťka 2,3 mm, AB = 45 mm, CD = 145 mm |
| Spodní příčel P2: | tloušťka 2,5 mm, AB = 45 mm, CD = 145 mm |
| Sloupy S1:        | tloušťka 2,4 mm, AB = 45 mm, CD = 145 mm |

## 5 Výroba a montáž ocelové konstrukce

Výroba a montáž rámové konstrukce nejsou předmětem této bakalářské práce. Pro konstrukci jsou navrženy prvky třídy S235JR.

## 6 Ochrana proti korozi

Protikorozní ochrana je navržena v souladu s ČSN EN ISO 12944 (1998). Protikorozní ochrana je provedena dílensky 1-2x základním nátěrem a 1-2x vrchním nátěrem. Tenkostěnné profily budou pozinkované.

## 7 Ochrana proti požáru

Ochrana proti požáru nosných konstrukcí není předmětem této bakalářské práce.

## 8 Použité podklady pro zpracování

### 8.1 Normy

|                 |                                 |
|-----------------|---------------------------------|
| ČSN EN 1991-1-1 | Obecná zatížení                 |
| ČSN EN 1991-1-3 | Zatížení sněhem                 |
| ČSN EN 1991-1-4 | Zatížení větrem                 |
| ČSN EN 1993-1-1 | Ocel                            |
| ČSN EN 1993-1-3 | Tenkostěnné prvky               |
| ČSN EN 1993-1-5 | Boulení stěn                    |
| ČSN EN 1993-1-7 | Ocelové deskostěnové konstrukce |

### 8.2 Software

TPC Mathcad  
SCIA Engineer 22.1  
AutoCAD 2024  
Microsoft Office Word  
Microsoft Office Excel

### 8.3 Další použité zdroje

- [1] ČSN EN 1991-1-1 (730035) Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: ČNI, 2003
- [2] ČSN EN 1991-1-3 (730035) Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná 5 zatížení – Zatížení sněhem*. Praha: ČNI, 2005
- [3] ČSN EN 1991-1-4 (730035): *Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: ČNI, 2007
- [4] ČSN EN 1993-1-1 (73 1401) Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006
- [5] ČSN EN 1993-1-3 (731401) Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Obecná pravidla – Doplnující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily*. Praha: ČNI, 2008.
- [6] ČSN EN 1993-1-5 (73 1401) Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Boulení stěn*. Praha: ČNI, 2008
- [7] ČSN EN 1993-1-7 (73 1401) Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Ocelové deskostěnové konstrukce*. Praha: ČNI, 2008
- [8] Ing. Sokol Z., Ph.D.; Prof. Ing. Wald F., CSc; *Ocelové konstrukce - Tabulky*; České vysoké učení technické v Praze, 2012
- [9] JANEČEK, Petr. *Modulová stavba z tenkostěnných ocelových profilů*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018.
- [10] MAREŠ, Vojtěch. *Statický přepočít plnostěnné ocelové mostní konstrukce v km 2,184 trati Pardubice Hradec Králové*. Diplomová práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2017.

[11] *Beginner's Guide to Python*. Online. Ww.python.org. 2023-08-29. Dostupné z: <https://wiki.python.org/moin/BeginnersGuide>. [cit. 2024-05-20].

[12] Lecture 11: Buckling of Plates and Sections. Online. 2013. Dostupné z: [https://ocw.mit.edu/courses/2-080j-structural-mechanics-fall-2013/345c462fe40421ea0f795bd35d2e4af1\\_MIT2\\_080JF13\\_Lecture11.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/2-080j-structural-mechanics-fall-2013/345c462fe40421ea0f795bd35d2e4af1_MIT2_080JF13_Lecture11.pdf). [cit. 2024-05-20].

[13] Vzper-klopeni-kombinace-clenene-pruty-MSP. Online. 2013. Dostupné z: <https://people.fsv.cvut.cz/~machacek/pomucky/Vzper-klopeni-kombinace-clenene-pruty-MSP.pdf>. [cit. 2024-05-20].

[14] VON BLOH, M.SC., Sonja. *Posouzení tenkostěnného C-profilu tvarovaného za studena podle EN 1993-1-3*. Online. DLUBAL.COM. Software pro navrhování a statické výpočty konstrukcí. 2020. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni/podpora/databaze-znalosti/001629>. [cit. 2024-05-20].

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**STATICKÝ VÝPOČET**

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Vypracovala: Thu Huong Tranová

# Obsah

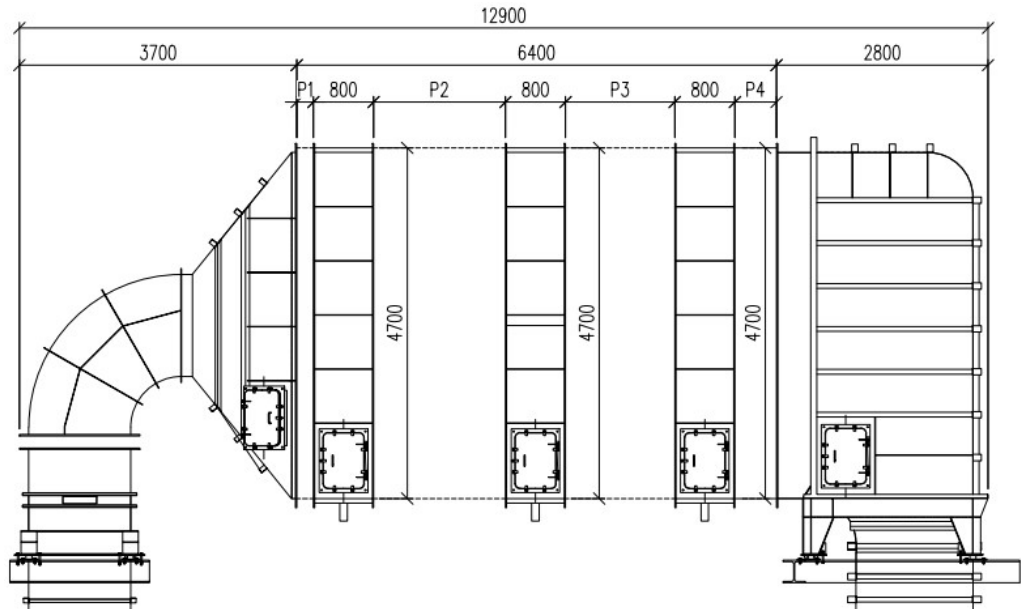
|  |    |
|--|----|
| 1. Popis objektu .....   | 1  |
| 2. Zatížení .....  | 2  |
| 2.1. Stálé zatížení.....   | 2  |
| 2.1.1. Vlatní tíha nosné konstrukce.....   | 2  |
| 2.1.2. Ostatní stálé zatížení.....   | 3  |
| 2.2. Proměnné.....   | 3  |
| 2.2.1. Zatížení užité.....   | 3  |
| 2.2.2. Zatížení sněhem.....  | 4  |
| 2.2.3. Zatížení větrem .....   | 4  |
| 2.2.4. Zatížení větrem pro nosné prvky s obdélníkovým průřezem.....                | 8  |
| 2.2.5. Porovnání ručního výpočtu zatížení větrem se zadanými hodnotami.....        | 9  |
| 2.2.5.1. Zadané zatížení větrem v podélném směru $w_x$ a příčném směru $w_y$ ..... | 9  |
| 2.2.5.2. Závěr pro kapitolu 2.2.3 a 2.2.4.....                                     | 9  |
| 2.3. Zatížení tlakem.....  | 10 |
| 2.3.1. Přetlak.....  | 10 |
| 2.3.1. Podtlak .....   | 10 |
| 2.4. Zatížení teplotou.....  | 10 |
| 2.5. Zatížení třením.....  | 10 |
| 2.6. Zatěžovací stavy.....   | 11 |
| 2.8. Kombinace zatížení.....   | 12 |
| 2.8.1. Dílčí součinitele spolehlivosti.....  | 12 |
| 2.8.2. Kombinační součinitele .....  | 12 |
| 2.8.3. Kombinace pro MSÚ (STR/GEO) - méně příznivá kombinace $z$ :.....            | 12 |
| 2.8.4. Charakteristická kombinace pro MSP .....                                    | 13 |
| 3. Příčné zatížené plechy.....   | 14 |
| 3.1. Posouzení nejvíce zatížených plechů.....                                      | 14 |
| 3.1.1. Vychýlení mimo rovinu.....  | 16 |
| 3.1.2. Vnitřní napětí.....   | 17 |
| 4. Varianty statických schémat.....  | 21 |
| 4.1. Návrhy statických schémat.....  | 21 |
| 4.2. Výběr statického schématu.....  | 21 |
| 4.2.1. Mezní hodnoty průhybů.....  | 21 |
| 4.2.2. Srovnání návrhů statických schémat .....                                    | 21 |
| 5. Návrh a posouzení horní příčle.....   | 22 |

|  |    |
|--|----|
| 5.1. Účinný průřez při tlaku.....                        | 24 |
| 5.1.1. Lokální boulení - výztuha AB.....                 | 24 |
| 5.1.2. Lokální boulení - pásnice .....                   | 24 |
| 5.1.3. Lokální boulení - stojina .....                   | 25 |
| 5.1.4. Distorzní vybočení - pásnice .....                | 26 |
| 5.1.5. Distorzní vybočení - stojina.....                 | 28 |
| 5.1.6. Účinný průřez v tlaku .....                       | 30 |
| 5.1.7. Posun těžišťové osy v tlaku.....                  | 31 |
| 5.2. Účinný průřez při kladném momentu kolem osy y.....  | 32 |
| 5.2.1. Účinky boulení - výztuha AB.....                  | 32 |
| 5.2.2. Účinky boulení - pásnice .....                    | 32 |
| 5.2.3. Účinky boulení - stojina část w1.....             | 33 |
| 5.2.4. Účinky boulení - stojina část w2.....             | 34 |
| 5.2.5. Účinky boulení - stojina část w3.....             | 34 |
| 5.2.6. Distorzní vybočení - stojina.....                 | 35 |
| 5.3. Účinný průřez při záporném momentu kolem osy y..... | 38 |
| 5.3.1. Lokální boulení - výztuha AB.....                 | 38 |
| 5.3.2. Účinky boulení - pásnice.....                     | 39 |
| 5.3.3. Distorzní vybočení - pásnice.....                 | 39 |
| 5.4. Vzpěr.....  | 42 |
| 5.4.2. Vzpěrnostní součinitele.....                      | 42 |
| 5.5. Vnitřní síly – posouzení MSÚ.....                   | 43 |
| 5.5.1. Posouzení MSÚ.....                                | 43 |
| 5.5.2. Posouzení MSP.....                                | 44 |
| 6. Optimalizace profilu příčle.....                      | 45 |
| 6.1. Účinný průřez v tlaku.....                          | 45 |
| 6.1.1. Lokální boulení - výztuha AB.....                 | 45 |
| 6.1.2. Lokální boulení - pásnice.....                    | 46 |
| 6.1.3. Lokální boulení - stojina.....                    | 46 |
| 6.1.4. Distorzní vybočení – pásnice.....                 | 47 |
| 6.1.5. Distorzní vybočení - stojina.....                 | 49 |
| 6.1.6. Účinný průřez v tlaku.....                        | 51 |
| 6.1.7. Posun těžišťové osy v tlaku.....                  | 51 |
| 6.2. Účinný průřez při kladném momentu kolem osy.....    | 52 |
| 6.2.1. Účinky boulení - výztuha AB.....                  | 52 |
| 6.2.2. Účinky boulení - pásnice.....                     | 52 |

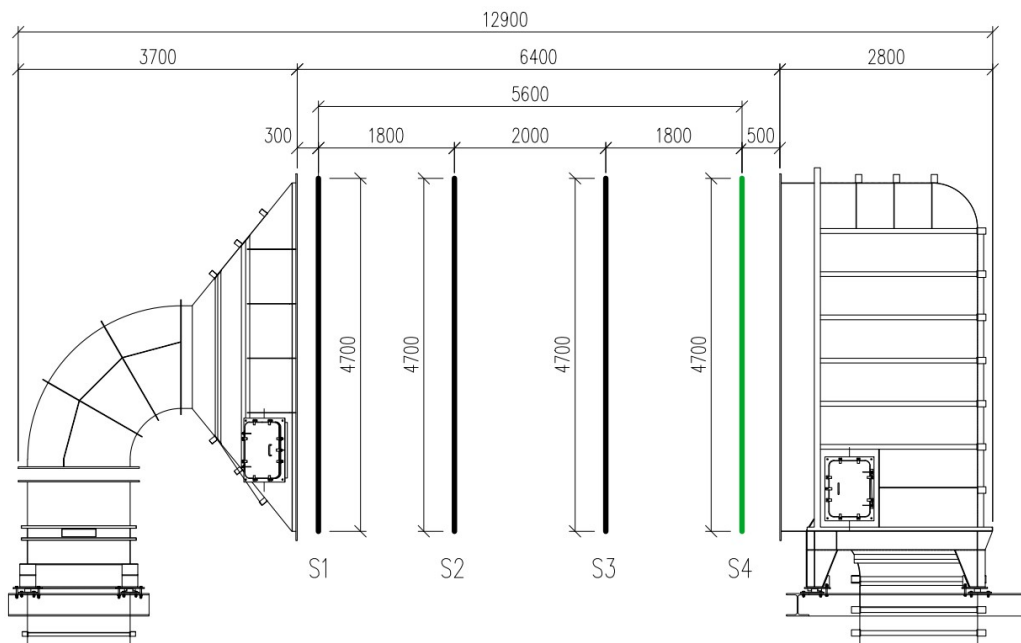
|  |    |
|--|----|
| 6.2.3. Účinky boulení - stojina část w1.....             | 53 |
| 6.2.4. Účinky boulení - stojina část w2.....             | 53 |
| 6.2.5. Účinky boulení - stojina část w3.....             | 54 |
| 6.2.6. Distorzní vybočení – pásnice.....                 | 55 |
| 6.2.7. Distorzní vybočení - stojina.....                 | 55 |
| 6.3. Účinný průřez při záporném momentu kolem osy y..... | 58 |
| 6.3.1. Lokální boulení - výztuha AB.....                 | 58 |
| 6.3.2. Účinky boulení - pásnice.....                     | 58 |
| 6.3.3. Účinky boulení - stojina část w1.....             | 59 |
| 6.3.4. Účinky boulení - stojina část w2.....             | 59 |
| 6.3.5. Účinky boulení - stojina část w3.....             | 60 |
| 6.3.6. Distorzní vybočení - pásnice.....                 | 61 |
| 6.3.7. Distorzní vybočení - stojina.....                 | 63 |
| 6.4. Vzpěr.....  | 66 |
| 6.4.2. Vzpěrnostní součinitele.....                      | 66 |
| 6.5. Vnitřní síly – posouzení MSÚ.....                   | 67 |
| 6.5.1. Posouzení MSÚ.....                                | 67 |
| 7. Program pro optimalizaci průřezu.....                 | 68 |
| 7.1. Zhodnocení průřezu.....                             | 68 |
| 7.2. Výběr finálních průřezů.....                        | 68 |
| 7.3. Mezní stav použitelnosti.....                       | 68 |
| 7.3.1. Horní příčel P1.....                              | 69 |
| 7.3.2. Spodní příčel P2.....                             | 69 |
| 7.3.3. Sloup S1.....                                     | 69 |
| 8. Návrh ztužidel.....                                   | 70 |
| 8.1. Profily diagonál.....                               | 70 |
| 8.2. Profil vodorovný.....                               | 70 |
| 9. Návrh prvků rámové konstrukce.....                    | 71 |
| 9.1. Rámová konstrukce.....                              | 71 |
| 9.2. Profily nosných prvků.....                          | 71 |
| 10. Závěr.....   | 73 |

# 1. POPIS OBJEKTU

Zkoumanou částí je výsek z výměníku trubkových svazků pro zpětné získávání tepla primárního vzduchu. Jedná se o svazek čtyř rámových konstrukcí z tenkostěnných zastudena tvarovaných profilů, které tvoří nosnou konstrukci a zajišťují stabilitu svazků. Rámy jsou široké 3,0 m a vysoké 4,7 m. Na řešeném výseku konstrukce výměníku jsou vyznačeny přehříváče vzduchu P1 - P4. Podrobněji bude řešen rám S4.



Obrázek 1 - Řešený výsek konstrukce



Obrázek 2 - Rámy v řešeném výseku



## 1.1. GEOMETRIE - ROZMĚRY RÁMŮ

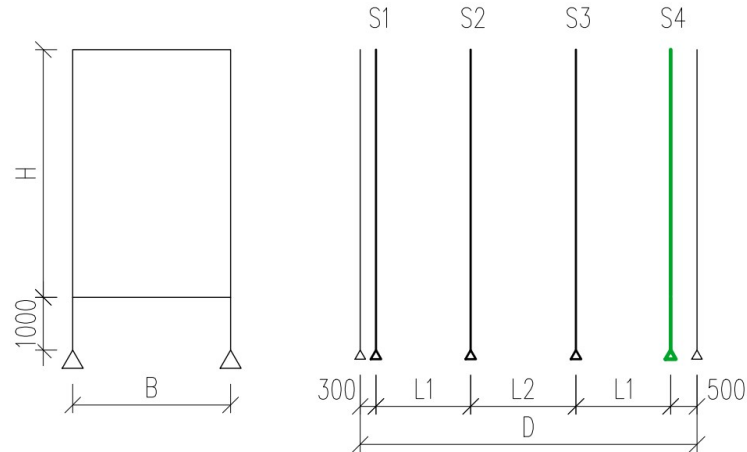
$B := 3.0 \text{ m}$  ... šířka rámu

$H := 4.7 \text{ m}$  ... výška rámu

$D := 6.4 \text{ m}$  ... délka řešeného úseku

$L_1 := 1.8 \text{ m}$  ... vzdálenost S1-S2 a S3-S4

$L_2 := 2.0 \text{ m}$  ... vzdálenost S2-S3



## 2. ZATÍŽENÍ

Předmětem práce není rozbor veškerého zatížení působící na konstrukci, pro zjednodušení výpočtu jsou uvažovaná zatížení zadaná, zatížení na rámy je liniové. Výpočet zatížení sněhem a větrem je proveden ručně a následně je porovnáno se zadanými hodnotami.

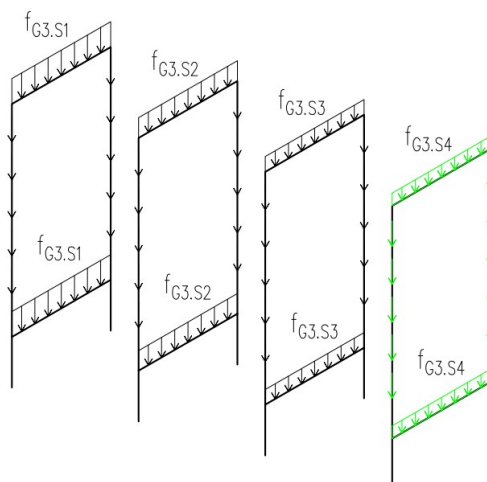
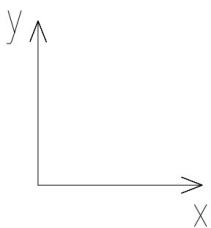
### 2.1. STÁLÉ ZATÍŽENÍ

#### 2.1.1. Vlastní tíha nosné konstrukce

Stálé zatížení vlastní tíhou nosné konstrukce  $G_1$  je automaticky vygenerováno programem SCIA Engineer.

Vlastní tíha kanálů a příslušenství nabývá jiných hodnot pro každý rám a je značeno s indexem  $G_2$ .

Souřadnicový systém



$$g_{G2.S1.k} := -2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

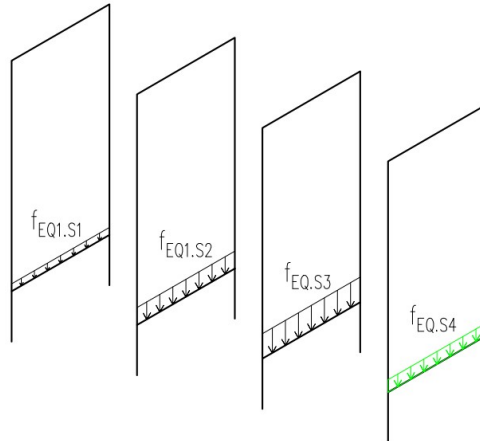
$$g_{G2.S2.k} := -1.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{G2.S3.k} := -1.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{G2.S4.k} := -0.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 2.1.2. Ostatní stálé zatížení

Ostatní stálé zatížení od příslušenství EQ1 je zahrnuto ve výpočtu tím, že vlastní tíha rámu je uvedena jako liniové zatížení vynásobené koeficientem 1,1. Na spodních částech rámu je uvažováno zatížení od systémů potrubí uvnitř rámu.



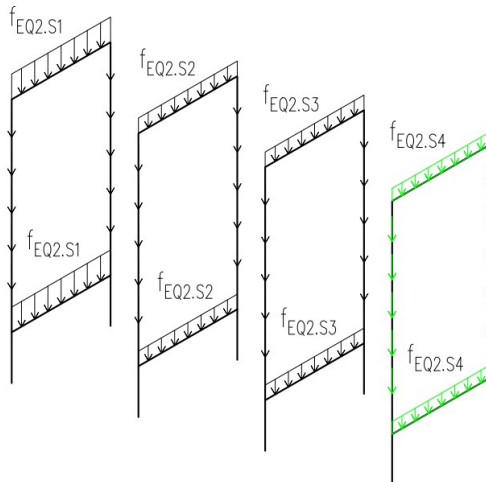
$$g_{EQ1.S1.k} := -1.8 \frac{kN}{m}$$

$$g_{EQ1.S2.k} := -20.4 \frac{kN}{m}$$

$$g_{EQ1.S3.k} := -24.7 \frac{kN}{m}$$

$$g_{EQ1.S4.k} := -11.2 \frac{kN}{m}$$

Kanály jsou chráněny tepelnou izolací EQ2.



$$g_{EQ2.S1.k} := -1.1 \frac{kN}{m}$$

$$g_{EQ2.S2.k} := -0.7 \frac{kN}{m}$$

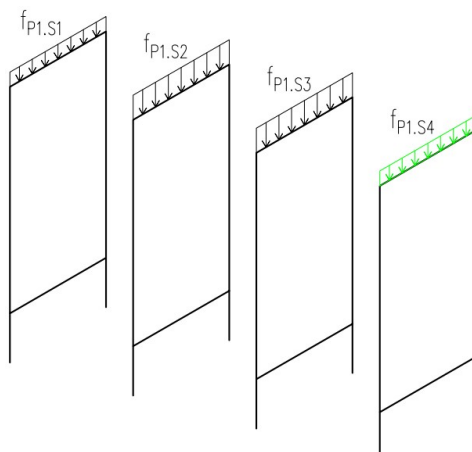
$$g_{EQ2.S3.k} := -0.7 \frac{kN}{m}$$

$$g_{EQ2.S4.k} := -0.6 \frac{kN}{m}$$

## 2.2. PROMĚNNÉ:

### 2.2.1. Zatížení užité

Provozní zatížení je uvažováno na horní straně kouřovodu, je značeno s indexem P1.



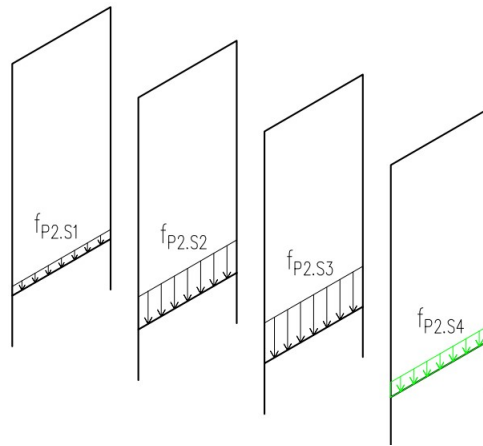
$$q_{P1.S1.k} := -1.2 \frac{kN}{m}$$

$$q_{P1.S2.k} := -2.0 \frac{kN}{m}$$

$$q_{P1.S3.k} := -2.0 \frac{kN}{m}$$

$$q_{P1.S4.k} := -1.2 \frac{kN}{m}$$

Ostatní užité zatížení zahrnuje zatížení od váhy médií v trubkách přehřívače, dále od prachu a sedimentů P2. Zatížení se liší pro každý rám v závislosti na počtu trubek v přehřívači. Celkové zatížení spočívá na spodním profilu rámu. Při převodu plošného zatížení na liniové se pro rámy S1 a S4 uvažovala zatěžovací šířka 1,4 m a pro rámy S2 a S3 zatěžovací šířka 2,0 m.



$$q_{P2.S1.k} := -1.0 \frac{kN}{m}$$

$$q_{P2.S2.k} := -6.9 \frac{kN}{m}$$

$$q_{P2.S3.k} := -8.5 \frac{kN}{m}$$

$$q_{P2.S4.k} := -3.9 \frac{kN}{m}$$

### 2.2.2. Zatížení sněhem

Zatížení sněhem P3 je vypočteno dle normy ČSN EN 1991-1-3.

$$\gamma_Q := 1.5$$

Sněhová oblast II

$$\mu_1 := 0.8$$

... tvarový součinitel zatížení sněhem

$$C_e := 1$$

... součinitel expozice pro normální typ krajiny

$$C_t := 1$$

... tepelný součinitel

$$s_k := 1.0 \frac{kN}{m^2}$$

... charakteristická hodnota zatížení pro sněhovou oblast II

Zatížení sněhem se určí ze vztahu:

$$s := \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0.8 \text{ kPa}$$

$$s_d := s \cdot \gamma_Q = 1.2 \frac{kN}{m^2}$$

### 2.2.3. Zatížení větrem

Zatížení větrem bude vypočteno dle normy ČSN 1991-1-3. Větrná oblast a kategorie terénu budou zadány.

Rozměry řešeného úseku:

$$B = 3 \text{ m} \quad H = 4.7 \text{ m} \quad D = 6.4 \text{ m} \quad (\text{šířka} \times \text{výška} \times \text{délka})$$

Větrná oblast: II

$$v_{b,0} := 22.5 \frac{m}{s}$$

... základní rychlost větru dle mapy větrných oblastí ČR

$$C_{dir} := 1.0$$

... součinitel směru větru

$$C_{season} := 1.0$$

... součinitel ročního období

## Základní rychlosti větru

$$v_b := C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} = 22.5 \frac{m}{s}$$

## Základní tlak větru

$$\rho_{vzduchu} := 1.25 \frac{kg}{m^3} \quad \dots \text{měrná hmotnost vzduchu}$$

$$q_b := \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzduchu} \cdot v_b^2 = 0.316 \text{ kPa}$$

## Kategorie terénu: III

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $z_0 := 0.05 \text{ m}$         | ... parametr drsnost terénu                |
| $z_{0,II} := 0.05 \text{ m}$    | ... parametr drsnosti terénu kategorie II  |
| $z_{min} := 10.3 \text{ m}$     | ... minimální výška                        |
| $z_{max} := 15.0 \text{ m}$     | ... maximální výška (zadáno)               |
| $z := z_{max} = 15.0 \text{ m}$ | ... celková výška objektu (zadáno)         |
| $c_{e,z1} := 2.6$               | ... součinitel expozice (odečteno z grafu) |
| $c_{e,z2} := 2.4$               | ... součinitel expozice (odečteno z grafu) |
| $c_0 := 1.0$                    | ... součinitel ortografie                  |
| $k_I := 1.0$                    | ... součinitel turbulence                  |

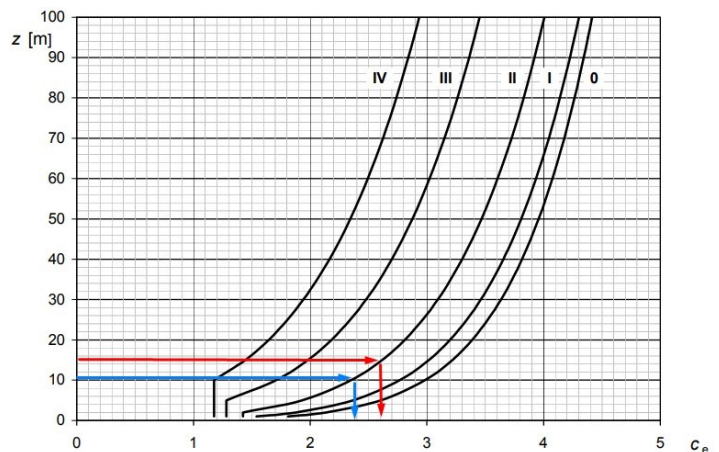
## Maximální dynamický tlak ve výšce $z \rightarrow q_b(z)$

### Zatížení větrem shora

$$q_{p,z1} := c_{e,z1} \cdot q_b \cdot c_0 \cdot k_I$$
$$q_{p,z1} = 0.823 \text{ kPa}$$

### Zatížení větrem zespona

$$q_{p,z2} := c_{e,z2} \cdot q_b \cdot c_0 \cdot k_I$$
$$q_{p,z2} = 0.759 \text{ kPa}$$



Pozn. Pro další výpočet se se uvažuje vyšší hodnota zatížení větrem

$$q_{p,z} := q_{p,z1} = 0.82 \text{ kPa}.$$

Vnější tlak větru:  $w_e = q_{p,z} \cdot c_{pe,10}$

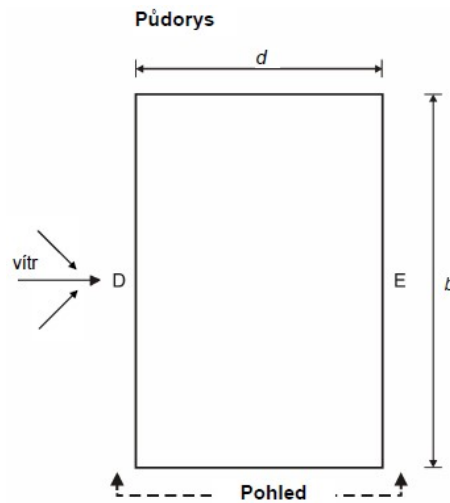
|             |                                      |
|-------------|--------------------------------------|
| $q_{p,z}$   | ... maximální dynamický tlak         |
| $z_e$       | ... referenční výška pro vnější tlak |
| $c_{pe,10}$ | ... součinitel vnějšího tlaku        |

## Podélný vítr - stěny

$$b_{1.stěna} := B = 3.0 \text{ m}$$

$$d_{1.stěna} := D = 6.4 \text{ m}$$

$$h_{stěna.1} := z_{max} = 15 \text{ m}$$

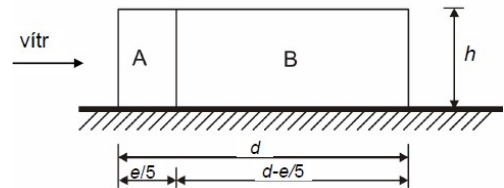


$$e_{1.stěna} := \min(b_{1.stěna}, 2 \cdot h_{stěna.1}) = 3.0 \text{ m}$$

$$\frac{e_{1.stěna}}{5} = 0.6 \text{ m}$$

$$d_{1.stěna} - \frac{e_{1.stěna}}{5} = 5.8 \text{ m}$$

Pohled pro  $e \geq d$



$$\frac{h_{stěna.1}}{d_{1.stěna}} = 2.34$$

Tab. výpočtu  $c_{pe}$   
pomocí interpolací z  
tabulkových čísel.

| pásmo | $q_p(z)$ | $c_{pe,10}$ | $w_e$ [kPa] |
|-------|----------|-------------|-------------|
| A     | 0.823    | -1.2        | -0.987      |
| B     | 0.823    | -1.12       | -0.921      |
| C     | -        | -           | -           |
| D     | 0.823    | 0.80        | 0.658       |
| E     | 0.823    | -0.57       | -0.466      |

Tlak podélného větru na stěnu

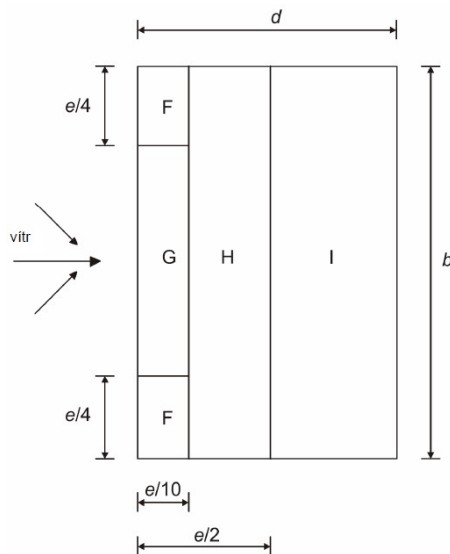
$$w_{e1.A} := q_{p.z} \cdot -1.2 = -0.987 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.B} := q_{p.z} \cdot -1.12 = -0.921 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.D} := q_{p.z} \cdot 0.80 = 0.658 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.E} := q_{p.z} \cdot -0.57 = -0.469 \text{ kPa}$$

## Podélný vítr - plochá střecha ( $\alpha < 5^\circ$ )



$$\frac{e_{1.stěna}}{10} = 0.3 \text{ m}$$

$$\frac{e_{1.stěna}}{4} = 0.75 \text{ m}$$

$$\frac{e_{1.stěna}}{2} = 1.5 \text{ m}$$

| pásmo | $q_p(z)$ | $c_{pe,10}$ | $w_e$ [kPa] |
|-------|----------|-------------|-------------|
| F     | 0.823    | -1.8        | -1.481      |
| G     | 0.823    | -1.2        | -0.987      |
| H     | 0.823    | -0.7        | -0.576      |
| I     | 0.823    | 0.2         | 0.165       |
|       |          | -0.2        | -0.165      |

Tlak podélného větru na střechu

$$w_{e1.F.1} := q_{p.z} \cdot -1.8 = -1.481 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.G.1} := q_{p.z} \cdot -1.2 = -0.987 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.H.1} := q_{p.z} \cdot -0.7 = -0.576 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.I.max.1} := q_{p.z} \cdot 0.20 = 0.165 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.I.min.1} := q_{p.z} \cdot -0.20 = -0.165 \text{ kPa}$$

### Podélný vítr - spodní strana

Zatížení větrem zespona konstrukce se spočte obdobně jako zatížení na plochou střechu.

$$b_{1.stěna} = 3.0 \text{ m} \quad d_{1.stěna} = 6.4 \text{ m}$$

$$h_{stěna.2} := z_{min} = 10.3 \text{ m} \quad q_{p.z2} = 0.76 \text{ kPa}$$

| pásno | $q_p(z)$ | $c_{pe,10}$ | $w_e$ [kPa] |
|-------|----------|-------------|-------------|
| F     | 0.823    | -1.8        | -1.481      |
| G     | 0.823    | -1.2        | -0.987      |
| H     | 0.823    | -0.7        | -0.576      |
| I     | 0.823    | 0.2         | 0.165       |
|       |          | -0.2        | -0.165      |

Tlak podélného větru na střechu

$$w_{e1.F.2} := q_{p.z} \cdot -1.8 = -1.481 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.G.2} := q_{p.z} \cdot -1.2 = -0.987 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.H.2} := q_{p.z} \cdot -0.7 = -0.576 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.I.max.2} := q_{p.z} \cdot 0.20 = 0.165 \text{ kPa}$$

$$w_{e1.I.min.2} := q_{p.z} \cdot -0.20 = -0.165 \text{ kPa}$$

### Příčný vítr - stěny

$$d_{2.stěna} := B = 3 \text{ m} \quad b_{2.stěna} := D = 6.4 \text{ m} \quad \frac{h_{stěna.1}}{d_{2.stěna}} = 5.0$$

$$e_{2.stěna} := \min(b_{2.stěna}, 2 \cdot h_{stěna.1}) = 6.4 \text{ m}$$

| pásno | $q_p(z)$ | $c_{pe,10}$ | $w_e$ [kPa] |
|-------|----------|-------------|-------------|
| A     | 0.823    | -1.2        | -0.987      |
| B     | 0.823    | -0.80       | -0.658      |
| C     | -        | -           | -           |
| D     | 0.823    | 0.80        | 0.658       |
| E     | 0.823    | -0.70       | -0.576      |

Tlak příčného větru na stěnu

$$w_{e2.A} := q_{p.z} \cdot -1.2 = -0.987 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.B} := q_{p.z} \cdot -0.8 = -0.658 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.D} := q_{p.z} \cdot -0.80 = -0.658 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.E} := q_{p.z} \cdot -0.7 = -0.576 \text{ kPa}$$

### Příčný vítr - plochá střecha ( $\alpha < 5^\circ$ )

| pásno | $q_p(z)$ | $c_{pe,10}$ | $w_e$ [kPa] |
|-------|----------|-------------|-------------|
| F     | 0.823    | -1.8        | -1.481      |
| G     | 0.823    | -1.2        | -0.987      |
| H     | 0.823    | -0.7        | -0.576      |
| I     | 0.823    | 0.2         | 0.165       |
|       |          | -0.2        | -0.165      |

Tlak příčného větru na střechu

$$w_{e2.F.1} := q_{p.z} \cdot -1.8 = -1.481 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.G.1} := q_{p.z} \cdot -1.2 = -0.987 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.H.1} := q_{p.z} \cdot -0.7 = -0.576 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.I1.1} := q_{p.z} \cdot 0.20 = 0.165 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.I2.1} := q_{p.z} \cdot -0.20 = -0.165 \text{ kPa}$$

### Příčný vítr - spodní strana

Zatížení větrem zespona konstrukce se spočte obdobně jako zatížení na plochou střechu.

$$b_{1.stěna} = 3.0 \text{ m} \quad d_{1.stěna} = 6.4 \text{ m}$$

$$h_{stěna.2} = 10.3 \text{ m} \quad q_{p.z2} = 0.76 \text{ kPa}$$

| pásno | $q_p(z)$ | $c_{pe,10}$ | $w_e$ [kPa] |
|-------|----------|-------------|-------------|
| F     | 0.823    | -1.8        | -1.481      |
| G     | 0.823    | -1.2        | -0.987      |
| H     | 0.823    | -0.7        | -0.576      |
| I     | 0.823    | 0.2         | 0.165       |
|       |          | -0.2        | -0.165      |

Tlak podélného větru na střechu

$$w_{e2.F.2} := q_{p.z} \cdot -1.8 = -1.481 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.G.2} := q_{p.z} \cdot -1.2 = -0.987 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.H.2} := q_{p.z} \cdot -0.7 = -0.576 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.I.max.2} := q_{p.z} \cdot 0.20 = 0.165 \text{ kPa}$$

$$w_{e2.I.min.2} := q_{p.z} \cdot -0.20 = -0.165 \text{ kPa}$$

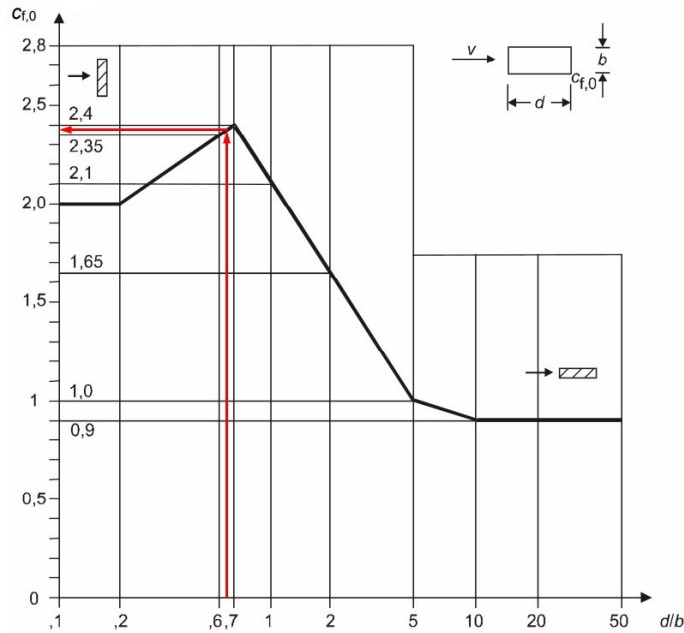
### 2.2.4. Zatížení větrem pro nosné prvky s obdélníkovým průřezem

Jako další variantu zatížení větrem na konstrukci je proveden výpočet dle normy ČSN 1991-1-3, kapitola 7.6. Součinitel síly pro nosné prvky s obdélníkovým průřezem a pro vítr vanoucí kolmo k čelní ploše je zjištěn podle vztahu níže:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda$$

Součinitel síly pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy a bez uvažování vlivu koncových vírů

$$c_{f,0} := 2.24$$



Délka průřezu

$$d := B = 3 \text{ m}$$

Výška průřezu

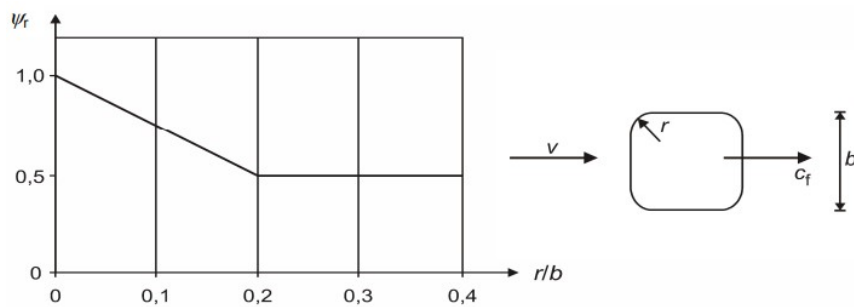
$$b := H = 4.7 \text{ m}$$

Poměr stran průřezu

$$\frac{d}{b} = 0.64$$

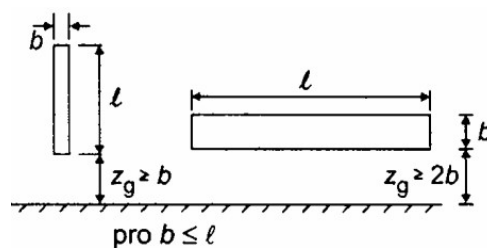
Redukční součinitel pro čtvercové průřezy se zaoblenými rohy

$$\Psi_r := 1$$



Součinitel koncového efektu pro prvky s volnými konci

$$\Psi_\lambda := 0.64$$

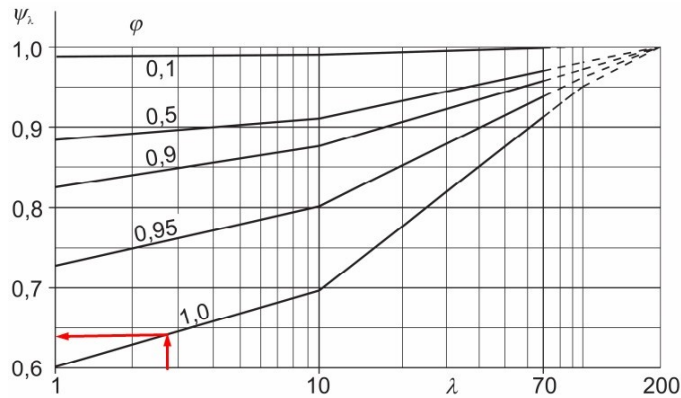


Délka konstrukce

$$l := D = 6.4 \text{ m}$$

Efektivní štíhlost

$$\lambda := \min\left(2 \frac{l}{b}, 70\right) = 2.72$$



Součinitel síly

$$c_f := c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda = 1.43$$

Zatížení větrem

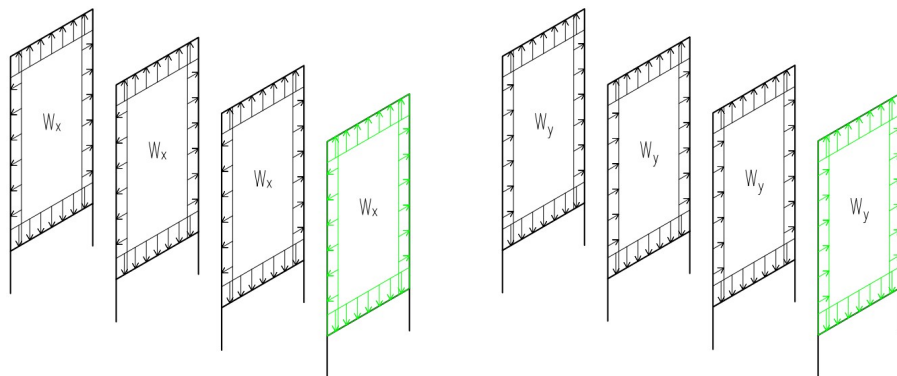
$$w_{obd} := q_{p,z} \cdot c_f \cdot 1.0 \text{ m} = 1.18 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## 2.2.5. Porovnání ručního výpočtu zatížení větrem se zadanými hodnotami

### 2.2.5.1. Zadané zatížení větrem v podélném směru $w_x$ a příčném směru $w_y$

$$w_x := -1.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$w_y := -1.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



### 2.2.5.2. Závěr pro kapitolu 2.2.3 a 2.2.4

Největší hodnoty plošného zatížení větrem pro stěny a střechu je prvně nutno převést na liniové zatížení a následně se porovnají se zadaným zatížením. Z přehledu zatížení v tabulkách níže vyplývá, že hodnoty vypočteného zatížení jsou menší než zadané hodnoty zatížení  $w$ .

| Podélný vítr |                      |                  |                  |
|--------------|----------------------|------------------|------------------|
| Oblast       | Zatížení             | Zatěžovací šířka | Liniové zatížení |
| [-]          | [kN/m <sup>2</sup> ] | [m]              | [kN/m']          |
| A            | 0.987                | 0.60             | 0.59             |
| F1           | 1.481                | 0.75             | 1.11             |
| F2           | 1.367                | 0.75             | 1.03             |

| Příčný vítr |                      |                  |                  |
|-------------|----------------------|------------------|------------------|
| Oblast      | Zatížení             | Zatěžovací šířka | Liniové zatížení |
| [-]         | [kN/m <sup>2</sup> ] | [m]              | [kN/m']          |
| A           | 0.987                | 0.60             | 0.59             |
| F1          | 1.481                | 0.75             | 1.11             |
| F2          | 1.367                | 0.75             | 1.03             |

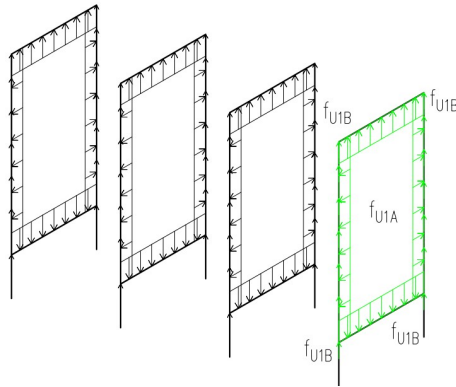
Hodnota zatížení větrem pro nosné prvky s obdélníkovým průřezem  $w_{obd}$  je též menší než zadané zatížení. V dalších výpočtech je vhodné uvažovat s větším zatížením  $w$ .



## 2.3. ZATÍŽENÍ TLAKEM

Liniové zatížení od přetlaku je uvažováno po šířce kanálů i na podporách rámových sloupů. Přetlak je značen s indexem U1, podtlak s indexem U2.

### 2.3.1. Přetlak



$$f_{U1A.k} := 20.0 \frac{kN}{m}$$

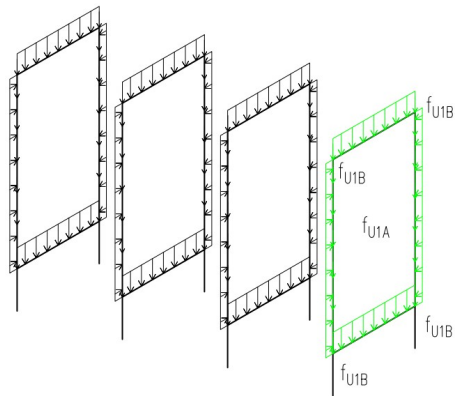
$$f_{U1B.S1.k} := 2.5 \frac{kN}{m}$$

$$f_{U1B.S2.k} := 0.3 \frac{kN}{m}$$

$$f_{U1B.S3.k} := 0.0 \frac{kN}{m}$$

$$f_{U1B.S4.k} := 0.5 \frac{kN}{m}$$

### 2.3.1. Podtlak



$$f_{U2A.k} := -2.0 \frac{kN}{m}$$

$$f_{U2B.S1.k} := 0.3 \frac{kN}{m}$$

$$f_{U2B.S2.k} := 0.0 \frac{kN}{m}$$

$$f_{U2B.S3.k} := 0.0 \frac{kN}{m}$$

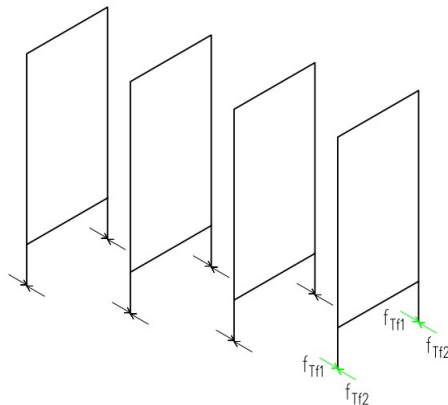
$$f_{U2B.S4.k} := 0.0 \frac{kN}{m}$$

## 2.4. ZATÍŽENÍ TEPLOTOU

Maximální teplota vzduchu v kanálu je 205 °C. Tato teplota je rozhodující pro materiálové vlastnosti, které musí být zohledněny při konstrukci objektu (snížená mez kluzu oceli).

## 2.5. ZATÍŽENÍ TŘENÍM

Při změnách teplot dochází k pohybům v ložiscích a k silám odpovídajícím hmotnosti konstrukce a koeficientu tření na povrchu ložiska.



$$f_{Tf1.S1} := 10 \text{ kN}$$

$$f_{Tf2.S1} := -10 \text{ kN}$$

$$f_{Tf1.S2} := 19 \text{ kN}$$

$$f_{Tf2.S2} := -19 \text{ kN}$$

$$f_{Tf1.S3} := 21 \text{ kN}$$

$$f_{Tf2.S3} := -21 \text{ kN}$$

$$f_{Tf1.S4} := 12 \text{ kN}$$

$$f_{Tf2.S4} := -12 \text{ kN}$$

## 2.6. ZATĚŽOVACÍ STAVY

1. zatěžovací stav
  - typ zatížení: stálé
  - název zatížení: **vlastní tíha nosné konstrukce (G1)**  
(automaticky generována programem Scia Engineer)
2. zatěžovací stav
  - typ zatížení: stálé
  - název zatížení: **vlastní tíha kanálů a příslušenství (G2)**
3. zatěžovací stav
  - typ zatížení: stálé
  - název zatížení: **ostatní stálé (EQ1)**
4. zatěžovací stav
  - typ zatížení: stálé
  - název zatížení: **tepelná izolace (EQ2)**
5. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné
  - název zatížení: **provozní užité (P1)**
6. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné
  - název zatížení: **ostatní užité (P2)**
7. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné
  - název zatížení: **sníh (P3)**
8. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné (vztah: výběrové zatížení)
  - název zatížení: **vítr podélný, zatížení ve směru x (Wx)**
9. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné (vztah: výběrové zatížení)
  - název zatížení: **vítr příčný, zatížení ve směru y (Wy)**
10. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné (vztah: výběrové zatížení)
  - název zatížení: **přetlak (U1)**
11. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné (vztah: výběrové zatížení)
  - název zatížení: **podtlak (U2)**
12. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné
  - název zatížení: **teplota (T)**
13. zatěžovací stav
  - typ zatížení: proměnné
  - název zatížení: **tření (Tf)**

## 2.8. KOMBINACE ZATÍŽENÍ

### 2.8.1. Dílčí součinitele spolehlivosti

|                           |  |
|---------------------------|--|
| $\gamma_{Gj.sup} := 1.35$ | ... stálá zatížení, nepříznivé působení    |
| $\gamma_{Gj.inf} := 1.0$  | ... stálá zatížení, příznivé působení      |
| $\gamma_{Q.1} := 1.5$     | ... proměnná zatížení, nepříznivé působení |
| $\gamma_{Q.1.0} := 0$     | ... proměnná zatížení, příznivé působení   |
| $\gamma_{Q.i} := 1.5$     | ... proměnná zatížení, nepříznivé působení |
| $\gamma_{Q.i.0} := 0$     | ... proměnná zatížení, příznivé působení   |

### 2.8.2. Kombinační součinitele

|                |   |
|----------------|---|
| $\psi_0 = 0.7$ | ... užité zatížení                                    |
| $\psi_0 = 0.5$ | ... zatížení sněhem                                   |
| $\psi_0 = 0.6$ | ... zatížení větrem, přetlakem, podtlakem             |
| $\xi = 0.85$   | ... redukční součinitel pro nepříznivá stálá zatížení |

### 2.8.3. Kombinace pro MSÚ (STR/GEO) - méně příznivá kombinace z:

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

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

$$\text{CO3: } 1,35 \cdot \text{ZS1} + 1,35 \cdot \text{ZS2} + 1,35 \cdot \text{ZS3} + 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS8} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS10}$$

$$\text{CO4: } 1,35 \cdot \text{ZS1} + 1,35 \cdot \text{ZS2} + 1,35 \cdot \text{ZS3} + 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS8} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS11}$$

$$\text{CO5: } 1,35 \cdot \text{ZS1} + 1,35 \cdot \text{ZS2} + 1,35 \cdot \text{ZS3} + 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS9} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS10}$$

$$\text{CO6: } 1,35 \cdot \text{ZS1} + 1,35 \cdot \text{ZS2} + 1,35 \cdot \text{ZS3} + 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS9} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS11}$$

$$\text{CO7: } \text{ZS1} + \text{ZS2} + \text{ZS3} + \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS8}$$

$$\text{CO8: } \text{ZS1} + \text{ZS2} + \text{ZS3} + \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS9}$$

$$\text{CO9: } \text{ZS1} + \text{ZS2} + \text{ZS3} + \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS10}$$

$$\text{CO10: } \text{ZS1} + \text{ZS2} + \text{ZS3} + \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS11}$$

$$\text{CO11: } 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS1} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS2} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS3} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS8} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS10}$$

$$\text{CO12: } 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS1} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS2} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS3} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS8} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS11}$$

$$\text{CO13: } 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS1} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS2} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS3} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS9} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS10}$$

$$\text{CO14: } 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS1} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS2} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS3} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS9} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS11}$$

$$\text{CO15: } 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS1} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS2} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS3} + 0,85 \cdot 1,35 \cdot \text{ZS4} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS5} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot \text{ZS6} + 1,5 \cdot \text{ZS8} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{ZS10}$$

- CO16:  $0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS1 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS2 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS3 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS4 +$   
 $+ 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS5 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS6 + 1,5 \cdot ZS8 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot ZS11$
- CO17:  $0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS1 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS2 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS3 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS4 +$   
 $+ 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS5 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS6 + 1,5 \cdot ZS9 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot ZS10$
- CO18:  $0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS1 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS2 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS3 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS4 +$   
 $+ 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS5 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS6 + 1,5 \cdot ZS9 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot ZS1$
- CO19:  $0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS1 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS2 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS3 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS4 +$   
 $+ 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS5 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot ZS8 + 1,5 \cdot ZS10$
- CO20:  $0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS1 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS2 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS3 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS4 +$   
 $+ 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS5 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot ZS8 + 1,5 \cdot ZS11$
- CO21:  $0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS1 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS2 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS3 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS4 +$   
 $+ 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS5 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot ZS9 + 1,5 \cdot ZS10$
- CO22:  $0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS1 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS2 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS3 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot ZS4 +$   
 $+ 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS5 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot ZS6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot ZS9 + 1,5 \cdot ZS11$

#### 2.8.4. Charakteristická kombinace pro MSP

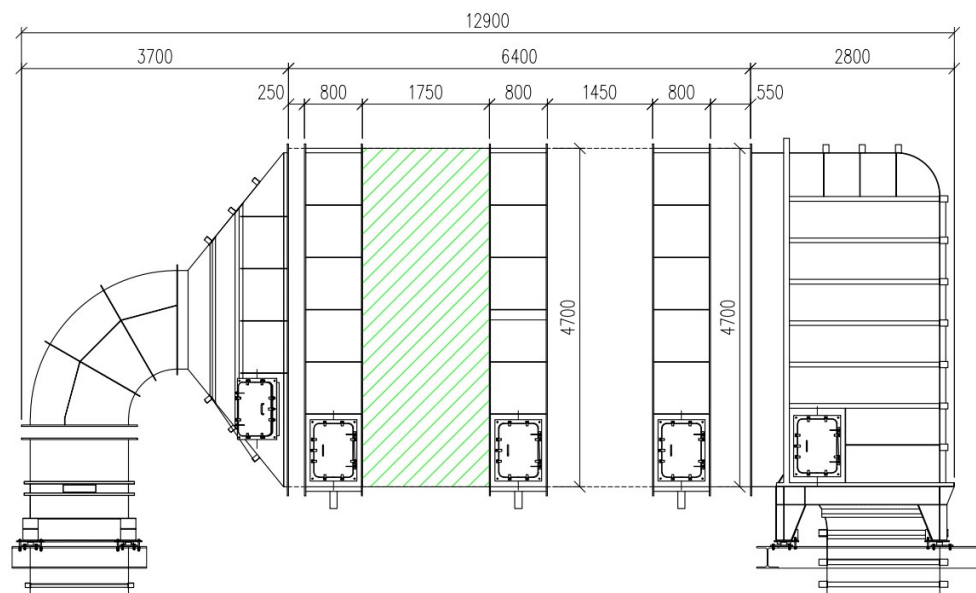
$$6.14b \quad \sum_{j \geq 1} G_{kj} + P + Q_{k_1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{ki}$$

- CO23:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + ZS6 + ZS8 + ZS10$
- CO24:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + ZS6 + ZS8 + ZS11$
- CO25:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + ZS6 + ZS9 + ZS10$
- CO26:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + ZS6 + ZS9 + ZS11$
- CO27:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + ZS6 + ZS10 + ZS11 + ZS13$
- CO28:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + ZS6 + ZS10 + ZS11 - ZS13$
- CO29:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + ZS6 + ZS9 + ZS10 + ZS11 + ZS13$
- CO30:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS5 + SS6 + ZS12 + ZS13$
- CO31:  $ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + 0,7 \cdot ZS5 + 0,7 \cdot ZS6 + ZS13$

### 3. PŘÍČNĚ ZATÍŽENÉ PLECHY

#### 3.1. POSOUZENÍ NEJVÍCE ZATÍŽENÝCH PLECHŮ

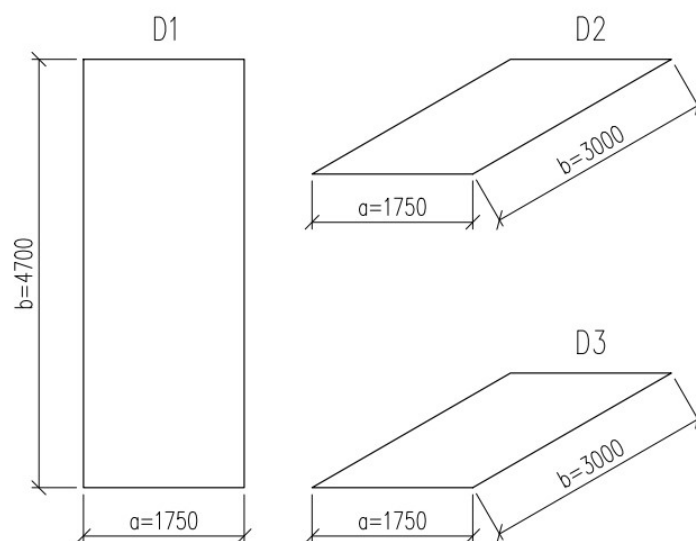
Plechý jsou posouzeny dle normy ČSN EN 1993-1-1 Ocelové deskostěnové konstrukce. Cílem této kapitoly je zjištění průhybu, vnitřního napětí nevyztužené desky obdélníkového tvaru na základě teorie velkého průhybu pro desky a ohybového a membránového napětí v nejvíce zatížené desce. Na základě popsaných zatížení v předchozí kapitole se předpokládá, že nejvíce zatížené desky budou ty, které se nacházejí ve vyznačené oblasti.



Obrázek 3 - Řešené příčně zatížené plechy

#### Geometrie plechů

- a ... menší strana desky
- b ... delší strana desky
- t ... zvolená tloušťka desky



#### Plech D1

$$a_{D1} := 1750 \text{ mm}$$

$$b_{D1} := 4700 \text{ mm}$$

$$t_{D1} := 6 \text{ mm}$$

#### Plech D2

$$a_{D2} := 1750 \text{ mm}$$

$$b_{D2} := 3000 \text{ mm}$$

$$t_{D2} := 6 \text{ mm}$$

#### Plech D3

$$a_{D3} := 1750 \text{ mm}$$

$$b_{D3} := 3000 \text{ mm}$$

$$t_{D3} := 8 \text{ mm}$$

### Plošné zatížení plechů (zadané)

Na plechy působí jejich vlastní tíha  $g_{0,k}$ , plošné zatížení od přetlaku  $U1$ , podtlaku  $U2$ , příčného větru  $w_y$ , dále zatížení od prachu sedimentů  $P2$  a od sněhu. Kombinace zatížení se pro jednotlivé plechy liší. Vstupní údaje pro posudek plechů jsou větší hodnoty z kombinací zatížení.

#### Plech D1 - vlastní tíha, přetlak, podtlak, příčný vítr

$$\rho_{ocel} := 7850 \frac{kg}{m^3}$$
$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$q_{k.U1.D1} := 7.0 \frac{kN}{m^2} \quad q_{k.wy.D1} := 0.6 \frac{kN}{m^2}$$
$$q_{k.U2.D1} := -1.0 \frac{kN}{m^2} \quad g_{0,k.D1} := \rho_{ocel} \cdot g \cdot t_{D1} = 0.46 \frac{kN}{m^2}$$

Kombinace zatížení pro plech D1

$$KZ1. \text{ Přetlak + příčný vítr (sání) : } \rightarrow q_{Ek.D1.1} := q_{k.U1.D1} + q_{k.wy.D1} = 7.6 \frac{kN}{m^2}$$
$$KZ2. \text{ Podtlak + příčný vítr (tlak) : } \rightarrow q_{Ek.D1.2} := -q_{k.U2.D1} + q_{k.wy.D1} = 1.6 \frac{kN}{m^2}$$

#### Plech D2 - vlastní tíha, přetlak, podtlak, sníh

$$q_{k.U1.D2} := 7.0 \frac{kN}{m^2} \quad q_{k.snih} := s = 0.8 \frac{kN}{m^2}$$
$$q_{k.U2.D2} := -1.0 \frac{kN}{m^2} \quad g_{0,k.D2} := \rho_{ocel} \cdot g \cdot t_{D2} = 0.46 \frac{kN}{m^2}$$

Kombinace zatížení pro plech D2

$$KZ1. \text{ Vlastní tíha + přetlak : } \downarrow q_{Ek.D2.1} := g_{0,k.D2} - q_{k.U1.D1} = -6.54 \frac{kN}{m^2}$$
$$KZ2. \text{ Vlastní tíha + podtlak + sníh : } \downarrow q_{Ek.D2.2} := g_{0,k.D2} - q_{k.U2.D1} + q_{k.snih} = 2.26 \frac{kN}{m^2}$$

#### Plech D3 - vlastní tíha, přetlak, podtlak, prach a sedimenty, příčný vítr

Poznámka: Zatížení od prachu a sedimentů  $P2$  je zadané jako liniové zatížení na každý rám a jejich hodnoty se liší. Pro výpočet je převedena největší hodnota liniového zatížení na rámu S3 se zatěžovací šířkou 2,0 m na plošné zatížení.

$$q_{k.U1.D3} := 7.0 \frac{kN}{m^2} \quad q_{k.P2.D3} := \frac{q_{P2.S3.k}}{2.0 m} = -4.25 \frac{kN}{m^2} \quad q_{k.wy.D3} := 0.6 \frac{kN}{m^2}$$
$$q_{k.U2.D3} := -1.0 \frac{kN}{m^2} \quad g_{0,k.D3} := \rho_{ocel} \cdot g \cdot t_{D3} = 0.62 \frac{kN}{m^2}$$

Kombinace zatížení pro plech D3

$$KZ1. \text{ Vlastní tíha + přetlak + prach a sedimenty + příčný vítr (sání) :}$$
$$\downarrow q_{Ek.D3.1} := g_{0,k.D3} + q_{k.U1.D3} - q_{k.P2.D3} + q_{k.wy.D3} = 12.47 \frac{kN}{m^2}$$
$$KZ2. \text{ Vlastní tíha + podtlak :}$$
$$\downarrow q_{Ek.D3.2} := g_{0,k.D3} + q_{k.U2.D3} = -0.38 \frac{kN}{m^2}$$

Závěr:

Nejvíce zatížený je spodní plech D3 o navržené tloušťce 8 mm. Posouzeny jsou i plechy D1 a D2 a tloušťce 6 mm.

### 3.1.1. Vychýlení mimo rovinu

Průhyb segmentu desky, který je zatížen rovnoměrným zatížením, se spočte dle vztahu:

$$w_k := 0.6 \frac{kN}{m^2}$$

$$w = k_w \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^4}{E \cdot t^3}$$

$k_w$  ... součinitel pro průhyb desky

$q_{Ed}$  ... návrhová hodnota zatížení rovnoměrně rozloženého po celém povrchu

$E$  ... Youngův modul pružnosti,  $E := 210 \text{ GPa}$

$$\gamma_Q = 1.5$$

Plech D1 - KZ1. Přetlak + příčný vítr (sání) :

$$\rightarrow q_{Ed.D1.1a} := 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.U1.D1} + 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.wy.D1} = 6.84 \frac{kN}{m^2}$$

$$\rightarrow q_{Ed.D1.1b} := 1.5 \cdot q_{k.U1.D1} + 1.5 \cdot q_{k.wy.D1} = 11.4 \frac{kN}{m^2}$$

Plech D2 - KZ1. Vlastní tíha + přetlak :

$$\downarrow q_{Ed.D2.1a} := 1.35 \cdot g_{0.k.D2} - 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.U1.D1} = -5.68 \frac{kN}{m^2}$$

$$\downarrow q_{Ed.D2.1b} := 1.0 \cdot g_{0.k.D2} - 1.5 \cdot q_{k.U1.D1} = -10.04 \frac{kN}{m^2}$$

$$\downarrow q_{Ed.D2.1c} := 0.85 \cdot 1.35 \cdot g_{0.k.D2} - 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.U1.D1} = -5.77 \frac{kN}{m^2}$$

$$\downarrow q_{Ed.D2.1d} := 0.85 \cdot 1.35 \cdot g_{0.k.D2} - 1.5 \cdot q_{k.U1.D1} = -9.97 \frac{kN}{m^2}$$

Plech D3 - KZ1. Vlastní tíha + přetlak + prach a sedimenty + příčný vítr (sání):

$$\downarrow q_{Ek.D3.1a} := 1.35 \cdot g_{0.k.D3} + 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.U1.D3} - 1.5 \cdot 0.7 \cdot q_{k.P2.D3} + 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.wy.D3}$$

$$q_{Ek.D3.1a} = 12.13 \frac{kN}{m^2}$$

$$\downarrow q_{Ek.D3.1b} := 1.0 \cdot g_{0.k.D3} + 1.5 \cdot q_{k.U1.D3} - 1.5 \cdot q_{k.P2.D3} + 1.5 \cdot q_{k.wy.D3}$$

$$q_{Ek.D3.1b} = 18.39 \frac{kN}{m^2}$$

$$\downarrow q_{Ek.D3.1c} := 0.85 \cdot 1.35 \cdot g_{0.k.D3} + 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.U1.D3} - 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.P2.D3} + 1.5 \cdot 0.6 \cdot q_{k.wy.D3}$$

$$q_{Ek.D3.1c} = 11.37 \frac{kN}{m^2}$$

$$\downarrow q_{Ek.D3.1d} := 0.85 \cdot 1.35 \cdot g_{0.k.D3} + 1.5 \cdot q_{k.U1.D3} - 1.5 \cdot q_{k.P2.D3} + 1.5 \cdot q_{k.wy.D3}$$

$$q_{Ek.D3.1d} = 18.48 \frac{kN}{m^2}$$

Návrhové zatížení na plechy

$$q_{Ed.D1} := \max(q_{Ed.D1.1a}, q_{Ed.D1.1b}) = 11.4 \frac{kN}{m^2}$$

$$q_{Ed.D2} := -\max(|q_{Ed.D2.1a}|, |q_{Ed.D2.1b}|, |q_{Ed.D2.1c}|, |q_{Ed.D2.1d}|) = -10.04 \frac{kN}{m^2}$$

$$q_{Ed.D3} := \max(q_{Ek.D3.1a}, q_{Ek.D3.1b}, q_{Ek.D3.1c}, q_{Ek.D3.1d}) = 18.48 \frac{kN}{m^2}$$

## MSP - Mezní hodnoty průhybu

$$L_{D1} := b_{D1} = 4.7 \text{ m}$$

$$L_{D2} := b_{D2} = 3.0 \text{ m}$$

$$L_{D3} := L_{D2} = 3.0 \text{ m}$$

$$\delta_{max.D1} \leq \frac{L}{100} \quad \rightarrow \quad \frac{L_{D1}}{100} = 47 \text{ mm}$$

$$\delta_{max.D2} \leq \frac{L}{100} \quad \rightarrow \quad \frac{L_{D2}}{100} = 30 \text{ mm}$$

$$\delta_{max.D2} \leq \frac{L}{100} \quad \rightarrow \quad \frac{L_{D3}}{100} = 30 \text{ mm}$$

Určení součinitele průhybu desky - interpolace z tabulek

**Table C.2: Coefficients  $k$**

|  |  |
|--|--|
|  | <b>Loading:</b><br>Uniformly distributed loading:  |
|  | <b>Boundary conditions:</b><br>FBC: All edges are simply supported.<br>MBC: All edges remain straight. Zero average direct stresses, zero shear stresses |
|  | <b>Parameters:</b><br>$Q = \frac{q_{Ed} \cdot a^4}{E t^4}$   |

$$\frac{b_{D1}}{a_{D1}} = 2.69 \quad Q_{D1} := \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^4}{E \cdot t_{D1}^4} = 392.86 \quad \rightarrow \quad k_{w.D1} := 0.0124$$

$$\frac{b_{D2}}{a_{D2}} = 1.71 \quad Q_{D2} := \frac{|q_{Ed.D2}| \cdot a_{D2}^4}{E \cdot t_{D2}^4} = 345.92 \quad \rightarrow \quad k_{w.D2} := 0.0118$$

$$\frac{b_{D3}}{a_{D3}} = 1.71 \quad Q_{D3} := \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^4}{E \cdot t_{D3}^4} = 201.52 \quad \rightarrow \quad k_{w.D3} := 0.0163$$

## Průhyb desky

$$w_{D1} := k_{w.D1} \cdot \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^4}{E \cdot t_{D1}^3} = 29.23 \text{ mm} < \frac{L_{D1}}{100} = 47 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{OK}$$

$$w_{D2} := k_{w.D2} \cdot \frac{|q_{Ed.D2}| \cdot a_{D2}^4}{E \cdot t_{D2}^3} = 24.49 \text{ mm} < \frac{L_{D2}}{100} = 30 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{OK}$$

$$w_{D3} := k_{w.D3} \cdot \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^4}{E \cdot t_{D3}^3} = 26.28 \text{ mm} < \frac{L_{D3}}{100} = 30 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{OK}$$

### 3.1.2. Vnitřní napětí

Ohybové napětí v segmentu desky

$$k_{\sigma_{bx}.D1} := 0.0596 \quad \sigma_{bx.Ed.D1} := k_{\sigma_{bx}.D1} \cdot \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^2}{t_{D1}^2} = 57.8 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{by}.D1} := 0.0176 \quad \sigma_{by.Ed.D1} := k_{\sigma_{by}.D1} \cdot \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^2}{t_{D1}^2} = 17.07 \text{ MPa}$$



$$k_{\sigma_{bx}.D2} := 0.0579 \quad \sigma_{bx.Ed.D2} := k_{\sigma_{bx}.D2} \cdot \frac{q_{Ed.D2} \cdot a_{D2}^2}{t_{D2}^2} = -49.44 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{by}.D2} := 0.0196 \quad \sigma_{by.Ed.D2} := k_{\sigma_{by}.D2} \cdot \frac{q_{Ed.D2} \cdot a_{D2}^2}{t_{D2}^2} = -16.74 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{bx}.D3} := 0.0804 \quad \sigma_{bx.Ed.D3} := k_{\sigma_{bx}.D3} \cdot \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^2}{t_{D3}^2} = 71.1 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{by}.D3} := 0.0274 \quad \sigma_{by.Ed.D3} := k_{\sigma_{by}.D3} \cdot \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^2}{t_{D3}^2} = 24.23 \text{ MPa}$$

### Membránová napětí v segmentu desky

$$k_{\sigma_{mx1}.D1} := 0.0230 \quad \sigma_{mx1.Ed.D1} := k_{\sigma_{mx1}.D1} \cdot \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^2}{t_{D1}^2} = 22.31 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{mx2}.D1} := 0.0258 \quad \sigma_{mx2.Ed.D1} := k_{\sigma_{mx2}.D1} \cdot \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^2}{t_{D1}^2} = 25.02 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{my1}.D1} := 0.0065 \quad \sigma_{my1.Ed.D1} := k_{\sigma_{my1}.D1} \cdot \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^2}{t_{D1}^2} = 6.3 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{my2}.D1} := -0.0051 \quad \sigma_{my2.Ed.D1} := k_{\sigma_{my2}.D1} \cdot \frac{q_{Ed.D1} \cdot a_{D1}^2}{t_{D1}^2} = -4.95 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{mx1}.D2} := 0.0272 \quad \sigma_{mx1.Ed.D2} := k_{\sigma_{mx1}.D2} \cdot \frac{q_{Ed.D2} \cdot a_{D2}^2}{t_{D2}^2} = -23.23 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{mx2}.D2} := 0.0361 \quad \sigma_{mx2.Ed.D2} := k_{\sigma_{mx2}.D2} \cdot \frac{q_{Ed.D2} \cdot a_{D2}^2}{t_{D2}^2} = -30.83 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{my1}.D2} := 0.0120 \quad \sigma_{my1.Ed.D2} := k_{\sigma_{my1}.D2} \cdot \frac{q_{Ed.D2} \cdot a_{D2}^2}{t_{D2}^2} = -10.25 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{my2}.D2} := -0.0112 \quad \sigma_{my2.Ed.D2} := k_{\sigma_{my2}.D2} \cdot \frac{q_{Ed.D2} \cdot a_{D2}^2}{t_{D2}^2} = 9.56 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{mx1}.D3} := 0.0328 \quad \sigma_{mx1.Ed.D3} := k_{\sigma_{mx1}.D3} \cdot \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^2}{t_{D3}^2} = 29.01 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{mx2}.D3} := 0.0434 \quad \sigma_{mx2.Ed.D3} := k_{\sigma_{mx2}.D3} \cdot \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^2}{t_{D3}^2} = 38.38 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{my1}.D3} := 0.0142 \quad \sigma_{my1.Ed.D3} := k_{\sigma_{my1}.D3} \cdot \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^2}{t_{D3}^2} = 12.56 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_{my2}.D3} := -0.0137 \quad \sigma_{my2.Ed.D3} := k_{\sigma_{my2}.D3} \cdot \frac{q_{Ed.D3} \cdot a_{D3}^2}{t_{D3}^2} = -12.12 \text{ MPa}$$

### Celková napětí na zatíženém povrchu desky

$$\sigma_{mx.Ed.D1} := \max(\sigma_{mx1.Ed.D1}, \sigma_{mx2.Ed.D1}) = 25.02 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{my.Ed.D1} := \max(\sigma_{my1.Ed.D1}, \sigma_{my2.Ed.D1}) = 6.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{mx.Ed.D2} := -\max(|\sigma_{mx1.Ed.D2}|, |\sigma_{mx2.Ed.D2}|) = -30.83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{my.Ed.D2} := -\max(|\sigma_{my1.Ed.D2}|, |\sigma_{my2.Ed.D2}|) = -10.25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{mx.Ed.D3} := \max(\sigma_{mx1.Ed.D3}, \sigma_{mx2.Ed.D3}) = 38.38 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{my.Ed.D3} := \max(\sigma_{my1.Ed.D3}, \sigma_{my2.Ed.D3}) = 12.56 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Ed.D1.1} := -\sigma_{bx.Ed.D1} + \sigma_{mx.Ed.D1} = -32.78 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D1.1} := -\sigma_{by.Ed.D1} + \sigma_{my.Ed.D1} = -10.76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Ed.D2.1} := -\sigma_{bx.Ed.D2} + \sigma_{mx.Ed.D2} = 18.62 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D2.1} := -\sigma_{by.Ed.D2} + \sigma_{my.Ed.D2} = 6.49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Ed.D3.1} := -\sigma_{bx.Ed.D3} + \sigma_{mx.Ed.D3} = -32.72 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D3.1} := -\sigma_{by.Ed.D3} + \sigma_{my.Ed.D3} = -11.67 \text{ MPa}$$

### Celková napětí na nezatíženém povrchu desky

$$\sigma_{x.Ed.D1.2} := \sigma_{bx.Ed.D1} + \sigma_{mx.Ed.D1} = 82.82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D1.2} := \sigma_{by.Ed.D1} + \sigma_{my.Ed.D1} = 23.37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Ed.D2.2} := \sigma_{bx.Ed.D2} + \sigma_{mx.Ed.D2} = -80.27 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D2.2} := \sigma_{by.Ed.D2} + \sigma_{my.Ed.D2} = -26.98 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Ed.D3.2} := \sigma_{bx.Ed.D3} + \sigma_{mx.Ed.D3} = 109.49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D3.2} := \sigma_{by.Ed.D3} + \sigma_{my.Ed.D3} = 36.79 \text{ MPa}$$

### Ekvivalentní napětí

$$\sigma_{x.Ed.D1} := \max(\sigma_{x.Ed.D1.1}, \sigma_{x.Ed.D1.2}) = 82.82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D1} := \max(\sigma_{y.Ed.D1.1}, \sigma_{y.Ed.D1.2}) = 23.37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Ed.D2} := \max(\sigma_{x.Ed.D2.1}, \sigma_{x.Ed.D2.2}) = 18.62 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D2} := \max(\sigma_{y.Ed.D2.1}, \sigma_{y.Ed.D2.2}) = 6.49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Ed.D3} := \max(\sigma_{x.Ed.D3.1}, \sigma_{x.Ed.D3.2}) = 109.49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y.Ed.D3} := \max(\sigma_{y.Ed.D3.1}, \sigma_{y.Ed.D3.2}) = 36.79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq.Ed.D1} := \sqrt{\sigma_{x.Ed.D1}^2 + \sigma_{y.Ed.D1}^2 - \sigma_{x.Ed.D1} \cdot \sigma_{y.Ed.D1}} = 73.96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq.Ed.D2} := \sqrt{\sigma_{x.Ed.D2}^2 + \sigma_{y.Ed.D2}^2 - \sigma_{x.Ed.D2} \cdot \sigma_{y.Ed.D2}} = 16.37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq.Ed.D3} := \sqrt{\sigma_{x.Ed.D3}^2 + \sigma_{y.Ed.D3}^2 - \sigma_{x.Ed.D3} \cdot \sigma_{y.Ed.D3}} = 96.5 \text{ MPa}$$

### Smykové napětí

V konstrukci vzniká velmi malé smykové napětí, které lze zanedbat.

$$\tau_b := 0 \quad \tau_m := 0$$

### Závěr:

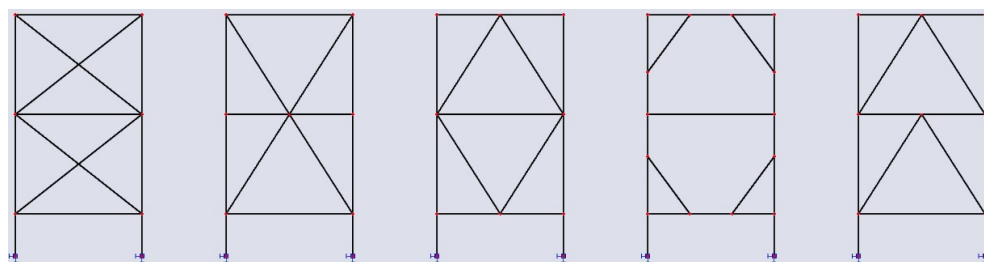
Pro posouzení zatížených plechů není rozhodující vnitřní napětí. Rozhodující pro posudek je průhyb desky, který se nejvíce blíží limitnímu průhybu u plechu D3.

## 4. VARIANTY STATICKÝCH SCHÉMAT

### 4.1. NÁVRHY STATICKÝCH SCHÉMAT

Nejpříznivější statické schéma konstrukce je vybráno z pěti uvedených návrhů. Prvně je v programu Scia Engineer předběžně zvolen tenkostěnný profil C o šířce 400 mm, výšce 150 mm a tloušťce 8 mm. Schémata budou posouzena dle zatěžovacích stavů pro MSP a MSÚ. V rámci MSP budou posouzeny limitní hodnoty svislého a vodorovného průhybu a pro MSÚ bude ověřeno maximální napětí v průřezech. Výstupy z programu budou uvedeny v příloze č. 2.

Při výběru statického schématu bude zohledněn požadavek na návrh ztužení tuhého rámu tak, aby umožnilo výhodné rozmístění svazků trubek přehříváče. Rám bude rozdělen do dvou polí s kloubově uloženými ztužujícími prvky.



varianta 1

varianta

varianta 3

varianta 4

varianta 5

### 4.2. VÝBĚR STATICKÉHO SCHÉMATU

#### 4.2.1. Mezní hodnoty průhybů

Svislý průhyb

$$B = 3 \text{ m}$$

$$\delta_{z,max} \leq \frac{B}{200} \rightarrow \delta_{lim,z} := \frac{B}{200} = 15 \text{ mm}$$

Vodorovný průhyb

$$H = 4.7 \text{ m}$$

$$\delta_{x,max} \leq \frac{H}{300} \rightarrow \delta_{lim,x} := \frac{H}{300} = 15.7 \text{ mm}$$

#### 4.2.2. Srovnání návrhů statických schémat

| Statické schéma | Použitý profil    | Svislý průhyb [mm] | Vodorovný průhyb [mm] | Max. napětí [MPa] |
|-----------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| 1. varianta     | C 400; 150; 8; 40 | 14.9               | 11.3                  | 357.0             |
|                 | RO 44.5X5.6       |                    |                       |                   |
| 2. varianta     | C 400; 150; 8; 40 | 13.5               | 10.1                  | 482.0             |
|                 | RO 44.5X5.6       |                    |                       |                   |
| 3. varianta     | C 400; 150; 8; 40 | 13.3               | 7.2                   | 199.4             |
|                 | RO 44.5X5.6       |                    |                       |                   |
| 4. varianta     | C 400; 150; 8; 40 | 13.4               | 8.3                   | 201.0             |
|                 | RO 44.5X5.6       |                    |                       |                   |
| 5. varianta     | C 400; 150; 8; 40 | 13.4               | 10.8                  | 199.2             |
|                 | RO 44.5X5.6       |                    |                       |                   |

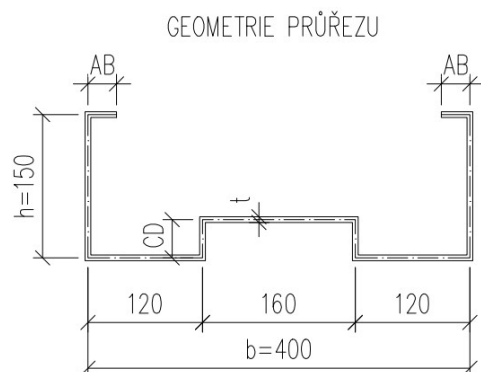
**Návrh rámové konstrukce je proveden ve variantě 3.**

Všechny varianty splní podmínku pro mezní průhyby, rozhodující pro výběr statického schématu jsou hodnoty napětí v průřezech.

## 5. NÁVRH A POSOUZENÍ HORNÍ PŘÍČLE

V první části je napsán program, který na základě zadané geometrie spočítá průřezové charakteristiky jednotlivých profilů a vygeneruje seznam profilů, jejichž moment únosnosti  $M_{Rd}$  je větší než ohybový moment odhadovaného profilu  $M_{Ed}$ .

Pro iteraci rozměrů průřezu jsou stanoveny tři proměnné - tloušťka  $t$ , rozměr  $AB$  a  $CD$ , výška  $h_1$  a šířka  $b_1$  jsou konstantní. Ze seznamu vyhovujících profilů je následně jeden vybraný profil posouzen na boulení dle normy ČSN EN 1993-1-5.



Konstantní rozměry:  $h_1 := 150 \text{ mm}$   
 $b_1 := 400 \text{ mm}$

Proměnné rozměry:  $t_1 := 2 \text{ mm}$   
 $AB := 30 \text{ mm}$   
 $CD := 40 \text{ mm}$

Poloměr zaoblení:  $r_1 := 3 \text{ mm}$

Obrázek 4 - Schéma geometrie průřezu

Materiálové vlastnosti

$f_y := 235 \text{ MPa}$  ... mez kluzu oceli S235  
 $E = 210 \text{ GPa}$  ... modul pružnosti

ČSN EN 1993-1-1  
 Tabulka 5.2

Zatřídění průřezu - pásnice

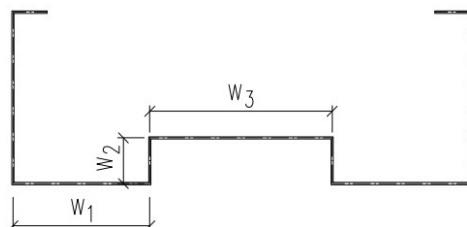
$c_{f1} := h_1 - 2 \cdot r_1 = 144 \text{ mm}$  ... uvažováno se zaoblením

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 1.0$$

$$\frac{c_{f1}}{t_1} = 72.0 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{pásnice třídy 4}$$

Zatřídění průřezu - stojina

Pozn.: Stojina se rozdělí na tři různé části, které jsou zatříděny jednotlivě.  
 Bude uvažováno se zaoblením  $r_1$ .



$b_{w1} := 120 \text{ mm}$      $c_{w1} := b_{w1} = 120 \text{ mm}$   
 $b_{w2} := 40 \text{ mm}$      $c_{w2} := b_{w2} = 40 \text{ mm}$   
 $b_{w3} := 160 \text{ mm}$      $c_{w3} := b_{w3} = 160 \text{ mm}$

$$\frac{c_{w1}}{t_1} = 60.0 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{stojina třídy 4}$$

$$\frac{c_{w2}}{t_1} = 20.0 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{stojina třídy 4}$$

$$\frac{c_{w3}}{t_1} = 80.0 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{stojina třídy 4}$$

$$b_{p,c} := AB = 30 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení - vnitřní poloměr ohnutí lze zanedbat, platí-li:

$$r \leq 5 \cdot t \quad \text{a zároveň} \quad r \leq 0.1 \cdot b_{p,c}$$

$$1) r_1 = 3 \text{ mm} \leq 5 \cdot t_1 = 10 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{OK}$$

$$2) r_1 = 3 \text{ mm} \leq 0.1 \cdot b_{p,c} = 3 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{OK}$$

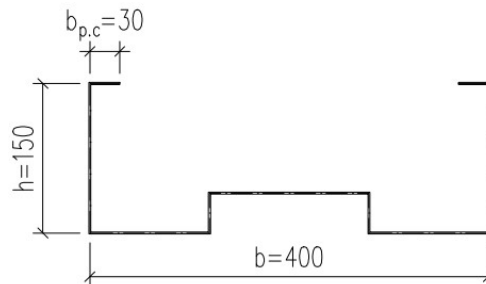
→ Obě podmínky jsou splněny - vnitřní poloměr ohnutí lze ve výpočtu zanedbat.

## 5.1. ÚČINNÝ PRŮŘEZ PŘI TLAKU

### 5.1.1. Lokální boulení - výztuha AB

Boulení průřezu je posuzováno dle normy ČSN EN 1993-1-5: Boulení stěn.

Při výpočtu je výztuha uvažována jako jednostranně podepřená stěna.



$$b_{p,c} = 30 \text{ mm}$$

$$b_{p,AB} := h_1 = 150 \text{ mm}$$

ČSN EN 1993-1-5  
Tab. 4.2  
Přečnickující tlačené  
části

$$\frac{b_{p,c}}{b_{p,AB}} = 0.2 \leq 0.35 \rightarrow k_{\sigma,AB} := 0.5$$

$$\psi_{AB} := 1.0 \quad \dots \text{ poměr koncových napětí pro rovnoměrný tlak po celé šířce}$$

$$k_{\sigma,AB} = 0.5 \quad \dots \text{ součinitel kritického napětí pro výztuhu}$$

Poměrná štíhlost výztuhy

$$\lambda'_{p,AB1} := \frac{\frac{b_{p,c}}{t_1}}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma,AB}}} = 0.747$$

Redukční součinitel pro jednostranně podepřené stěny

$$\lambda'_{p,AB1} \leq 0.748 \rightarrow \rho_{AB1} := 1.0 \rightarrow \text{výztuha AB neboulí}$$

Účinná šířka pro jednoduchou výztuhu

$$c_{eff,AB1} := \rho_{AB1} \cdot b_{p,c} = 30 \text{ mm}$$

### 5.1.2. Lokální boulení - pásnice

Pásnice je při výpočtu uvažována jako stěna s okrajovou výztuhou. Účinný průřez se uvažuje s plným podepřením výztuhou ( $K = \infty$ ).

ČSN EN 1993-1-5  
Tab. 4.1  
Vnitřní tlačené části

$$\psi_{f1} := \psi_{AB} = 1.0 \quad \dots \text{ poměr koncových napětí pro rovnoměrný tlak po celé šířce}$$

$$k_{\sigma,f1} := 4.0 \quad \dots \text{ součinitel kritického napětí pro pásnici}$$

Poměrná štíhlost pásnice

$$b_{p,f1} := h_1 = 150 \text{ mm}$$

$$\lambda'_{p,f1} := \frac{\frac{b_{p,f1}}{t_1}}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma,f1}}} = 1.32$$

Redukční součinitel pro oboustranně podepřené stěny, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$1) \rho_{f1} := \frac{\lambda'_{p,f1} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{f1})}{\lambda'_{p,f1}{}^2} = 0.631 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

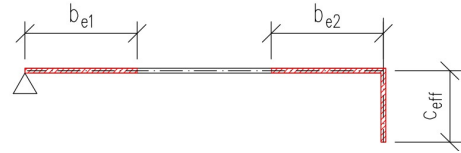
$$2) (3 + \psi_{f1}) = 4.0 > 0 \rightarrow \text{OK}$$

Účinná šířka pásnice

$$b_{eff,f1} := \rho_{f1} \cdot b_{p,f1} = 94.67 \text{ mm}$$

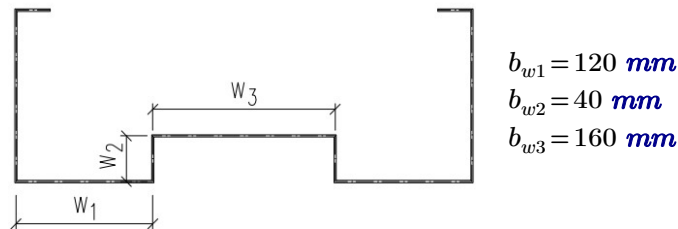
$$b_{e1,f1} := 0.5 \cdot b_{eff,f1} = 47.34 \text{ mm}$$

$$b_{e2,f1} := 0.5 \cdot b_{eff,f1} = 47.34 \text{ mm}$$



### 5.1.3. Lokální boulení - stojina

Vzhledem ke složitější geometrii průřezu se stojina rozdělí na tři různé části, které se na lokální boulení posoudí jednotlivě jako oboustranně podepřené stěny.



$$b_{w1} = 120 \text{ mm}$$

$$b_{w2} = 40 \text{ mm}$$

$$b_{w3} = 160 \text{ mm}$$

$$\psi_w := \psi_{f1} = 1.0 \quad \dots \text{ poměr koncových napětí pro rovnoměrný tlak po celé šířce}$$

$$k_{\sigma,w} := k_{\sigma,f1} = 4.0 \quad \dots \text{ součinitel kritického napětí pro stojinu}$$

Poměrná štíhlost stojiny

$$\lambda'_{p,w1} := \frac{\frac{b_{w1}}{t_1}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma,w}}} = 1.056$$

$$\lambda'_{p,w2} := \frac{\frac{b_{w2}}{t_1}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma,w}}} = 0.352$$

$$\lambda'_{p,w3} := \frac{\frac{b_{w3}}{t_1}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma,w}}} = 1.408$$

Redukční součinitel pro vnitřní tlačené části  $w_1, w_2, w_3$

$$1) w_1 \quad \dots \quad \lambda'_p > 0.673$$

$$\rho_{w1} := \frac{\lambda'_{p,w1} - 0.055 \cdot (3 + \psi_w)}{\lambda'_{p,w1}{}^2} = 0.75 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

$$(3 + \psi_w) = 4.0 > 0 \rightarrow \text{OK}$$



2)  $w_2 \dots \lambda'_p < 0.673 \rightarrow \rho_{w2} := 1.0 \rightarrow$  část stojiny  $w_2$  **neboulí**  
 $\rightarrow$  celá část je účinná

3)  $w_3 \dots \lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w3} := \frac{\lambda'_{p.w3} - 0.055 \cdot (3 + \psi_w)}{\lambda'_{p.w3}{}^2} = 0.599 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

$$(3 + \psi_w) = 4.0 > 0 \rightarrow \text{OK}$$

Účinná šířka stojiny

$$b_{eff.w1} := \rho_{w1} \cdot b_{w1} = 89.94 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1} := 0.5 \cdot b_{eff.w1} = 44.97 \text{ mm}$$

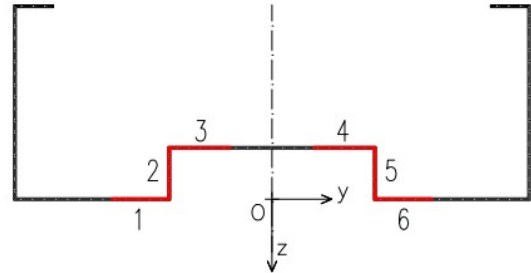
$$b_{e2.w1} := b_{e1.w1} = 44.97 \text{ mm}$$

$$b_{eff.w2} := \rho_{w2} \cdot b_{w2} = 40 \text{ mm}$$

$$b_{eff.w3} := \rho_{w3} \cdot b_{w3} = 95.86 \text{ mm}$$

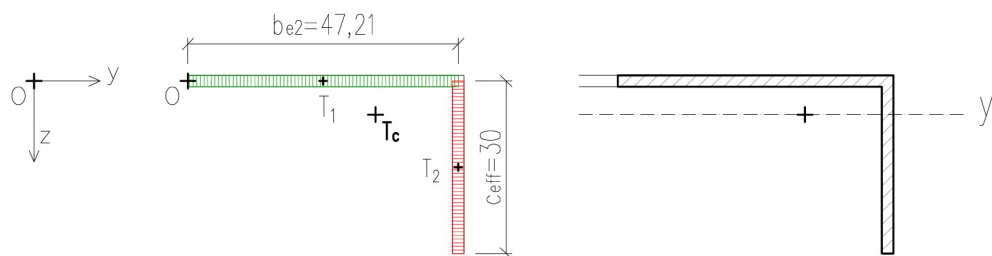
$$b_{e1.w3} := 0.5 \cdot b_{eff.w3} = 47.93 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3} := b_{e1.w3} = 47.93 \text{ mm}$$



#### 5.1.4. Distorzní vybočení - pásnice

Posouzení distorzního vybočení dle ČSN EN 1993-1-3: Tenkostěnné prvky je provedeno pro jednotlivé části průřezu. Pro výpočet distorzního vybočení je nutno zjistit pérovou tuhost výztuhy. Pro tlačenu pásnici s okrajovou výztuhou se předpokládá, že se okrajová výztuha chová jako tlačení prvek se spojitým částečným pružným podepřením a pérová tuhost výztuhy  $K$  se určí dle vztahu  $K = 'l'/\delta$ , který vyjadřuje deformaci výztuhy o jednotkové délce při působení jednotkového zatížení. Jednotková síla ' $l$ ' působí v těžišti účinného průřezu a vyvolává průhyb výztuhy  $\delta$ .



Účinná průřezová plocha

$$A_{1.f1} := b_{e2.f1} \cdot t_1 = 94.7 \text{ mm}^2$$

$$A_{2.AB1} := c_{eff.AB1} \cdot t_1 = 60 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.f1} := A_{1.f1} + A_{2.AB1} = 154.7 \text{ mm}^2$$

Těžiště účinné části průřezu

$$T1 = [y_1; z_1]$$

$$y_{1.f1} := \frac{b_{e2.f1}}{2} = 23.67 \text{ mm}$$

$$z_{1.f1} := 0 \text{ mm}$$

$$T2 = [y_2; z_2]$$

$$y_{2.AB1} := b_{e2.f1} = 47.34 \text{ mm}$$

$$z_{2.AB1} := \frac{c_{eff.AB1}}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$T_c = [y_c; z_c]$$

$$y_{c.f1} := \frac{y_{1.f1} \cdot A_{1.f1} + y_{2.AB1} \cdot A_{2.AB1}}{A_{s.f1}}$$

$$y_{c.f1} = 32.85 \text{ mm}$$

$$z_{c.f1} := \frac{z_{1.f1} \cdot A_{1.f1} + z_{2.AB1} \cdot A_{2.AB1}}{A_{s.f1}}$$

$$z_{c.f1} = 5.82 \text{ mm}$$

### Moment setrvačnosti

$$I_{s1.f1} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.f1} \cdot t_1^3 + b_{e2.f1} \cdot t_1 \cdot (z_{c.f1} - z_{1.f1})^2 = 3237 \text{ mm}^4$$

$$I_{s2.f1} := \frac{1}{12} \cdot t_1 \cdot c_{eff.AB1}^3 + t_1 \cdot c_{eff.AB1} \cdot (z_{2.AB1} - z_{c.f1})^2 = 9557.7 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.f1} := I_{s1.f1} + I_{s2.f1} = 12794.7 \text{ mm}^4$$

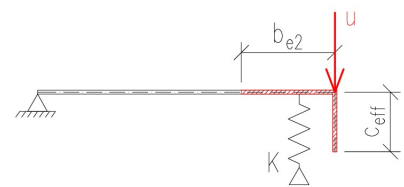
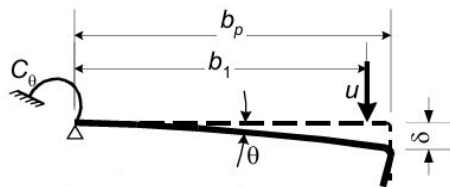
### Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)

Pozn.: V přesnějším výpočtu by se uvažovalo s jednotkovým zatížením "u" působícím v těžišti účinného průřezu výztuhy, to by znamenalo menší rameno sil a tím pádem příznivější hodnotu deformace. Těžiště účinného průřezu se v iteracích mění, proto se využije zjednodušená varianta řešení, kde je jednotkové zatížení umístěno na konci pásnice, kdy vyjde nepříznivější deformace, tzn. budeme se pohybovat na straně bezpečné a poloha těžiště účinného průřezu se nebude přepočítávat.

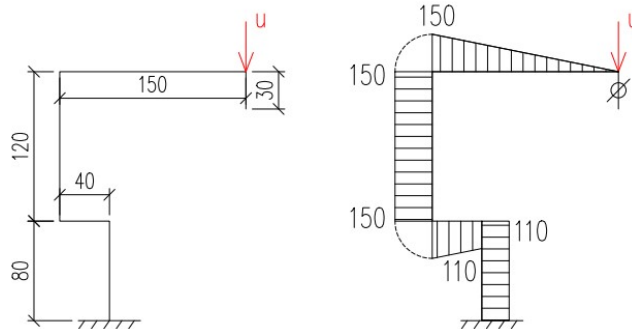
Dále je v normě ČSN EN 1993-1-3 uveden výpočet průhybu pro okrajovou výztuhu dle vztahu, kde se počítá s počáteční tuhostí:

$$\delta = \theta b_p + \frac{u b_p^3}{3} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{E t^3}$$

$$\text{kde } \theta = u b_p / C_\theta$$



Pro výpočet deformace na pásnici s okrajovou výztuhou se využije níže uvedený model, kde se bude uvažovat s počáteční tuhostí danou deformací na zbytku průřezu. Zatížení "u" bude 1 kN/m.



$$u := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\nu := 0.3$$

$$I_{f1} := \frac{1}{12} \cdot \frac{t_1^3}{(1-\nu^2)} = 0.73 \text{ mm}^3$$

$$M_{124} := \left( \frac{1}{3} \cdot h_1^2 \cdot h_1 + h_1^2 \cdot b_{w1} + (h_1 - CD)^2 \cdot \frac{b_{w3}}{2} \right) \cdot kN$$

$$M_3 := \left( \frac{1}{6} (h_1 \cdot (2 \cdot h_1 + (h_1 - CD)) + (h_1 - CD) \cdot (h_1 + 2 \cdot (h_1 - CD))) \right) \cdot CD \cdot kN$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$\delta_{f1} := \left( \frac{1}{E \cdot I_{f1}} \cdot (M_{124} + M_3) \right) \cdot \frac{1}{m} = 35.58 \text{ mm}$$

$$K_{f1} := \frac{u}{\delta_{f1}} = 0.028 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Pružné kritické napětí pro vybočení

$$\sigma_{cr.s.f1} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{f1} \cdot E \cdot I_{s.f1}}}{A_{s.f1}} = 112.36 \text{ MPa}$$

Poměrná štíhlost

$$f_{yb} := f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$\lambda'_{d.f1} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.f1}}} = 1.45$$

Redukční součinitel vzpěrnosti pro únosnost pro distorzní vybočení, kdy:  $\lambda'_d > 1.38$

$$\chi_{d.f1} := \frac{0.66}{\lambda'_{d.f1}} = 0.456 < 1.0$$

Redukovaná účinná plocha a tloušťka

$$A_{s.red.f1} := \chi_{d.f1} \cdot A_{s.f1} = 70.6 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.f1} := t_1 \cdot \frac{A_{s.red.f1}}{A_{s.f1}} = 0.91 \text{ mm}$$

### 5.1.5. Distorzní vybočení - stojina

Účinná průřezová plocha

$$b_{e2.w1} = 44.97 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3} = 47.93 \text{ mm}$$

$$A_{1.w} := b_{e2.w1} \cdot t_1 = 89.9 \text{ mm}^2$$

$$A_{2.w} := b_{eff.w2} \cdot t_1 = 80 \text{ mm}^2$$

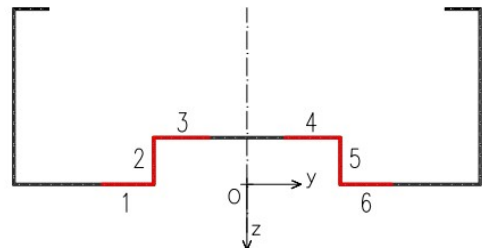
$$A_{3.w} := b_{e2.w3} \cdot t_1 = 95.9 \text{ mm}^2$$

$$A_{4.w} := A_{3.w} = 95.9 \text{ mm}^2$$

$$A_{5.w} := A_{2.w} = 80 \text{ mm}^2$$

$$A_{6.w} := A_{1.w} = 89.9 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.w} := 2 \cdot (A_{1.w} + A_{2.w} + A_{3.w}) = 531.6 \text{ mm}^2$$



### Těžiště účinné části průřezu

$$\begin{aligned}
 y_{1.w} &:= -\left(\frac{b_{w3}}{2} + \frac{b_{e2.w1}}{2}\right) = -102.49 \text{ mm} & z_{1.w} &:= 0 \text{ mm} \\
 y_{2.w} &:= -\frac{b_{w3}}{2} = -80 \text{ mm} & z_{2.w} &:= -\frac{b_{w2}}{2} = -20 \text{ mm} \\
 y_{3.w} &:= -\left(\frac{b_{w3}}{2} - \frac{b_{e2.w3}}{2}\right) = -56.04 \text{ mm} & z_{3.w} &:= -b_{w2} = -40 \text{ mm} \\
 y_{4.w} &:= -y_{3.w} = 56.04 \text{ mm} & z_{4.w} &:= z_{3.w} = -40 \text{ mm} \\
 y_{5.w} &:= -y_{2.w} = 80 \text{ mm} & z_{5.w} &:= z_{2.w} = -20 \text{ mm} \\
 y_{6.w} &:= -y_{1.w} = 102.49 \text{ mm} & z_{6.w} &:= z_{1.w} = 0 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$y_{c.w} := \frac{y_{1.w} \cdot A_{1.w} + y_{2.w} \cdot A_{2.w} + y_{3.w} \cdot A_{3.w} + y_{4.w} \cdot A_{4.w} + y_{5.w} \cdot A_{5.w} + y_{6.w} \cdot A_{6.w}}{A_{s.w}}$$

$$z_{c.w} := \frac{z_{1.w} \cdot A_{1.w} + z_{2.w} \cdot A_{2.w} + z_{3.w} \cdot A_{3.w} + z_{4.w} \cdot A_{4.w} + z_{5.w} \cdot A_{5.w} + z_{6.w} \cdot A_{6.w}}{A_{s.w}}$$

$$T_c = [y_c; z_c]$$

$$\text{Těžiště } T_{c.w} : \quad y_{c.w} = 0 \text{ mm} \quad z_{c.w} = -20.45 \text{ mm}$$

### Moment setrvačnosti

$$I_{s1.w} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w1} \cdot t_1^3 + b_{e2.w1} \cdot t_1 \cdot (z_{1.w} - z_{c.w})^2 = 37625.3 \text{ mm}^4$$

$$I_{s2.w} := \frac{1}{12} \cdot t_1 \cdot b_{eff.w2}^3 + t_1 \cdot b_{eff.w2} \cdot (z_{2.w} - z_{c.w})^2 = 10682.5 \text{ mm}^4$$

$$I_{s3.w} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w3} \cdot t_1^3 + b_{e2.w3} \cdot t_1 \cdot (z_{3.w} - z_{c.w})^2 = 36686.7 \text{ mm}^4$$

$$I_{s4.w} := I_{s3.w} = 36686.7 \text{ mm}^4$$

$$I_{s5.w} := I_{s2.w} = 10682.5 \text{ mm}^4$$

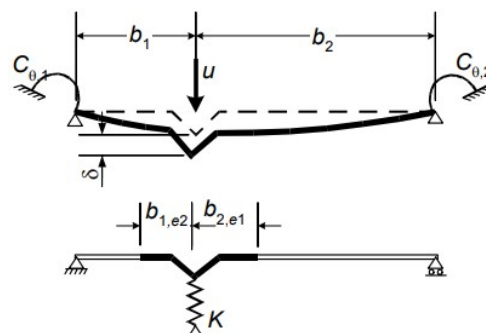
$$I_{s6.w} := I_{s1.w} = 37625.3 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.w} := 2 \cdot (I_{s1.w} + I_{s2.w} + I_{s3.w}) = 169989.2 \text{ mm}^4$$

### Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)

Pozn. Dle ČSN EN 1993-1-3: Tenkostěnné prvky lze pro vnitřní výztuhu jako konzervativní alternativu hodnot rotačních tuhostí C01 a C02 vzít nulu a průhyb  $\delta$  lze stanovit ze vztahu níže.

$$\delta = \frac{ub_1^2 b_2^2}{3(b_1 + b_2)} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3}$$



a) Skutečný systém

b) Náhradní systém

$$u = 1 \frac{kN}{m} \quad b_{1.w} := \frac{b_w^3}{2} = 80 \text{ mm} \quad b_{2.w} := b_{1.w} = 80 \text{ mm} \quad \nu = 0.3$$

$$\delta_w := \frac{u \cdot b_{1.w}^2 \cdot b_{2.w}^2}{3 \cdot (b_{1.w} + b_{2.w})} \cdot \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot t_1^3} \cdot \frac{1}{m} = 0.555 \frac{1}{m} \cdot mm$$

$$K_w := \frac{u}{\delta_w} \cdot \frac{1}{m} = 1.803 \frac{N}{mm^2}$$

Pružné kritické napětí pro vybočení a štíhlost

$$\sigma_{cr.s.w} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_w \cdot E \cdot I_{s.w}}}{A_{s.w}} = 954.45 \text{ MPa}$$

$$\lambda'_{d.w} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.w}}} = 0.496$$

Redukční součinitel pro distorzní vybočení, kdy:  $\lambda'_d < 0.65$

$$\chi_{d.w} := 1.0$$

Účinná plocha a tloušťka

$$A_{s.red.w} := \chi_{d.w} \cdot A_{s.w} = 531.6 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.w} := t_1 \cdot \frac{A_{s.red.w}}{A_{s.w}} = 2.0 \text{ mm}$$

### 5.1.6. Účinný průřez v tlaku

$$c_{eff.AB1} = 30 \text{ mm}$$

$$b_{e1.f1} = 47.34 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f1} = 47.34 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1} = 44.97 \text{ mm}$$

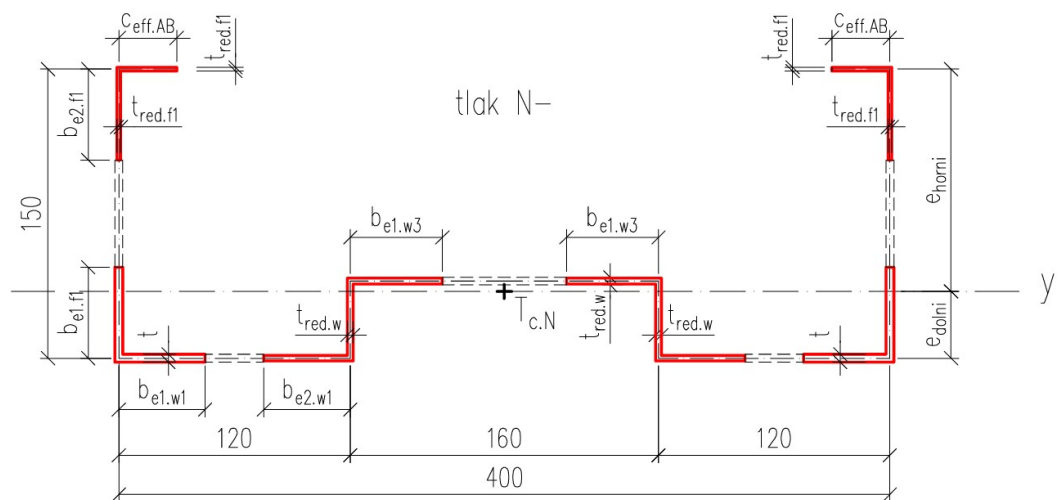
$$b_{e2.w1} = 44.97 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3} = 47.93 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3} = 47.93 \text{ mm}$$

$$t_{red.f1} = 0.91 \text{ mm}$$

$$t_{red.w} = 2 \text{ mm}$$



Obrázek 5 - Účinný průřez v tlaku, profil 1

Posunutá těžiště a moment setrvačnosti efektivního průřezu

$$z_{Tc.t} := 33.09 \text{ mm}$$

$$I_{y.c.t} := 2020102.9 \text{ mm}^4$$

### Efektivní plocha účinného průřezu

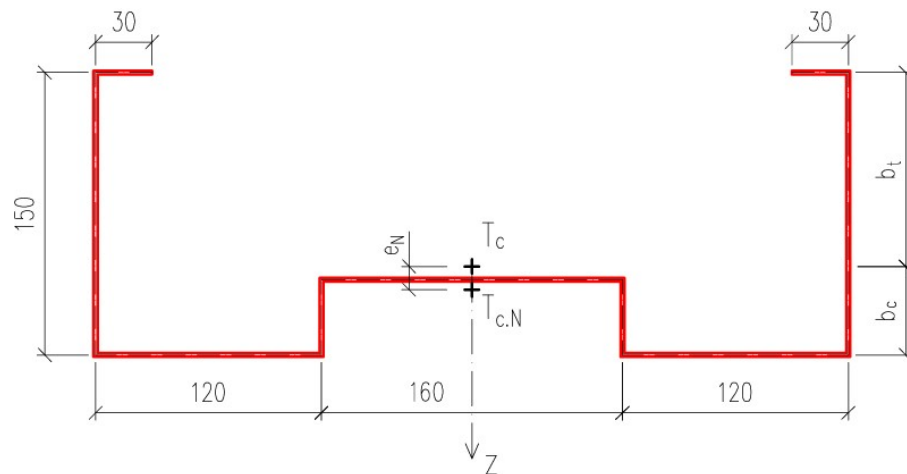
$$A_{eff.red.t} := t_{red.f1} \cdot 2 \cdot (c_{eff.AB1} + b_{e2.f1}) + t_{red.w} \cdot 2 \cdot (b_{e2.w1} + b_{eff.w2} + b_{e1.w3})$$

$$A_{eff.t1} := t_1 \cdot 2 \cdot (b_{e1.f1} + b_{e2.w1})$$

$$A_{eff.t} := A_{eff.red.t} + A_{eff.t1} = 1042 \text{ mm}^2$$

### 5.1.7. Posun těžišťové osy v tlaku

V případě, že poloha těžiště účinného průřezu není shodná s polohou těžiště plného průřezu je nutno v důsledku posunu těžišťové osy při posouzení kombinace tlaku a ohybu zahrnout přídavný moment dle vztahu  $\Delta M_{y.Ed} = e_N \cdot N_{Ed}$ , kde  $e_N$  je vzdálenost těžišťové osy plného průřezu od těžiště posunuté osy účinného průřezu ve směru osy z.



Obrázek 6 - Posun těžišťové osy v tlaku, profil 1

$$A_c := 1680 \text{ mm}^2$$

... plocha plně účinného průřezu

$$I_{y.c} := 4082759 \text{ mm}^4$$

... moment setrvačnosti plně účinného průřezu

$$z_{Tc} := 47 \text{ mm}$$

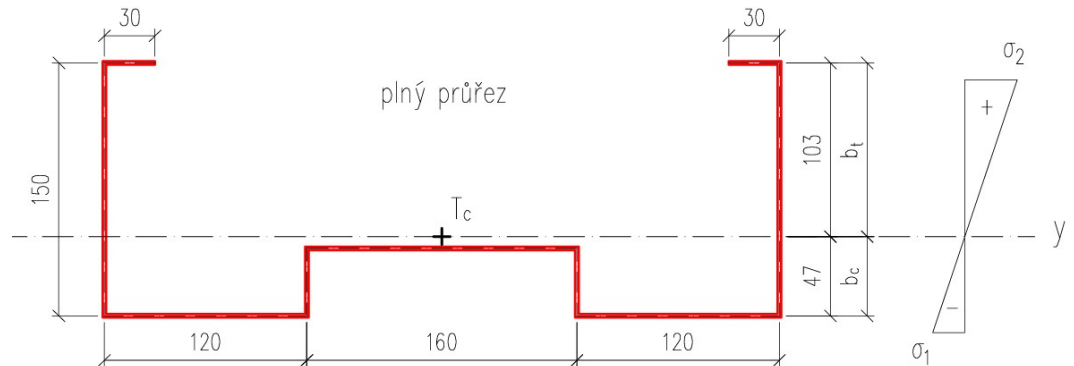
... z-ová souřadnice plně účinného průřezu

$$\Delta e_N := z_{Tc} - z_{Tc.t} = 13.9 \text{ mm}$$

... posun těžišťové osy účinného průřezu

## 5.2. ÚČINNÝ PRŮŘEZ PŘI KLADNÉM MOMENTU KOLEM OSY Y

Průřez při kladném ohybovém momentu se posoudí obdobně jako průřez v tlaku. Z posouzení průřezu na účinky lokálního boulení a případného distorzního vybočení se určí redukovaná plocha a tloušťka profilu. Následně je vypočten moment setrvačnosti a průřezový modul účinného průřezu. Tlačená stojina je opět rozdělena na tři části, které se posoudí jednotlivě.



Obrázek 7 - Plně účinný průřez při kladném momentu, profil 1

### 5.2.1. Účinky boulení - výztuha AB

Výztuha se nachází v tažené části průřezu a k boulení nedochází.

### 5.2.2. Účinky boulení - pásnice

Pásnice je tažená i tlačená. V tažené části nedochází k redukci účinného průřezu, v tlačené části k redukci dojít může, tzn. je nutno ověřit účinky boulení na pásnici dle ČSN EN 1993-1-5, Tabulka 4.1.

$$b_{c.f.m1} := z_{Tc} = 47 \text{ mm}$$

$$b_{f.m1} := h_1 = 150 \text{ mm}$$

$$b_{t.f.m1} := h_1 - b_{c.f.m1} = 103 \text{ mm}$$

Poměr koncových napětí

$$\psi_{f.m1} := \frac{b_{t.f.m1}}{-b_{c.f.m1}} = -2.191$$

Součinitel kritického napětí pro:  $-1 > \psi > -3$

$$k_{\sigma.f.m1} := 5.98 \cdot (1 - \psi_{f.m1})^2 = 60.9$$

Poměrná štíhlost pásnice

$$\lambda'_{p.f.m1} := \frac{b_{f.m1}}{t_1} \cdot \frac{1}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma.f.m1}}} = 0.338$$

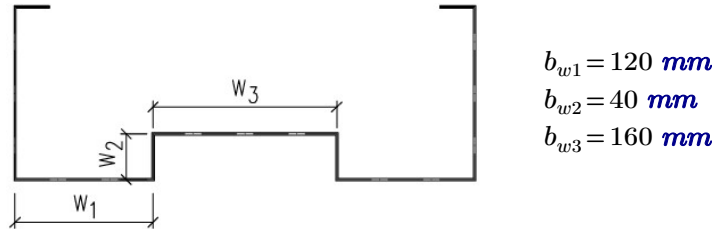
$$t_1 = 2.0 \text{ mm}$$

Redukční součinitel, kdy:  $\lambda'_p \leq 0.673$

$$\rho_{f.m1} := 1.0 \quad \rightarrow \quad \text{pásnice neboun}$$

### 5.2.3. Účinky boulení - stojina část $w_1$

Celá část stojiny je v tlačené části průřezu, redukci účinného průřezu lze provést obdobně jako v kapitole "5.1. Účinný průřez v tlaku" s rozdílem, že se hodnota tlakového napětí neuvažuje rovnou mezi kluzu  $\sigma = f_y = 235 \text{ MPa}$ , ale je dopočtena pomocí poměru koncových napětí u pásnice  $\psi_{f.m1}$ .



Poměrná štíhlost dané části stojiny je vypočtena dle ČSN 1993-1-5 dle vztahu:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}}$$

kde  $\sigma_{com.Ed}$  je největší návrhové tlakové napětí v dané části  
 $\gamma_{M0} := 1.0$

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí pro rovnoměrné rozdělení napětí

$$\psi_{w1.m1} := 1.0 \quad \rightarrow \quad k_{\sigma.w1.m1} := 4.0$$

Redukovaná poměrná štíhlost

$$b_{w1} = 120 \text{ mm} \quad \sigma_{com.Ed.w1} := \frac{f_y}{\psi_{f.m1}} = -107.23 \text{ MPa}$$

$$\lambda'_{p.w1.red.m1} := \lambda'_{p.w1} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{com.Ed.w1}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 0.71 > 0.673$$

Redukční součinitel boulení, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w1.m1} := \frac{\lambda'_{p.w1.red.m1} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w1.m1})}{\lambda'_{p.w1.red.m1}^2} = 0.969 \quad \rightarrow \quad \text{část stojiny } w_1 \text{ boulí}$$

Redukovaná účinná šířka stojiny

$$b_{eff.w1.m1} := \rho_{w1.m1} \cdot b_{w1} = 116.32 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1.m1} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.m1} = 58.16 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.m1} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.m1} = 58.16 \text{ mm}$$



#### 5.2.4. Účinky boulení - stojina část $w_2$

Hodnota napětí ve spodních tlačných vláknech je rovna hodnotě napětí u průřezu pásnice  $\sigma_{com.Ed.w1}$  a napětí v horních vláknech  $\sigma_{com.Ed.w2}$  je dopočteno.

$$\sigma_{com.Ed.1.w2.m1} := \sigma_{com.Ed.w1} = -107.23 \text{ MPa}$$

$$b_{w2} = 40 \text{ mm}$$

$$\sigma_{com.Ed.2.w2.m1} := \frac{\sigma_{com.Ed.1.w2.m1}}{b_{w2}} \cdot (|b_{w2} - z_{Tc}|) = -18.77 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{com.Ed.w2.m1} := \min(\sigma_{com.Ed.1.w2.m1}, \sigma_{com.Ed.2.w2.m1}) = -107.23 \text{ MPa}$$

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí

$$\psi_{w2.m1} := \frac{\sigma_{com.Ed.2.w2.m1}}{\sigma_{com.Ed.1.w2.m1}} = 0.18 \quad \rightarrow \quad 1 > \psi > 0$$

$$k_{\sigma.w2.m1} := \frac{8.2}{(1.05 + \psi_{w2.m1})} = 6.69$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{p.w2.red.m1} := \lambda'_{p.w2} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{com.Ed.w2.m1}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 0.24 < 0.673$$

Redukční součinitel boulení, kdy:  $\lambda'_p \leq 0.673$

$$\rho_{w2.m1} := 1.0 \quad \rightarrow \quad \text{část stojiny neboulí}$$

Celá část průřezu je účinná

$$b_{eff.w2.m1} := \rho_{w2.m1} \cdot b_{w2} = 40 \text{ mm}$$

#### 5.2.5. Účinky boulení - stojina část $w_3$

Hodnota napětí v průřezu je rovna hodnotě napětí v horních vláknech tlačného průřezu stojiny  $w_2$ .

$$\sigma_{com.Ed.w3.m1} := \sigma_{com.Ed.2.w2.m1} = -18.77 \text{ MPa}$$

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí pro rovnoměrné rozdělení napětí

$$\psi_{w3.m1} := 1.0 \quad \rightarrow \quad k_{\sigma.w3.m1} := 4.0$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{p.w3.red.m1} := \lambda'_{p.w3} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{com.Ed.w3.m1}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 0.40 < 0.673$$

Redukční součinitel, kdy:  $\lambda'_p \leq 0.673$

$$\rho_{w3.m1} := 1.0 \quad \rightarrow \quad \text{část stojiny neboulí}$$

Celý průřez je účinný, pro účely výpočtu se průřez rozdělí na dvě účinné části

$$b_{eff.w3.m1} := \rho_{w3.m1} \cdot b_{w3} = 160 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.m1} := 0.5 \cdot b_{eff.w3.m1} = 80 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.m1} := 0.5 \cdot b_{eff.w3.m1} = 80 \text{ mm}$$

### 5.2.6. Distorzní vybočení - stojina

Účinná průřezová plocha

$$A_{1.w.m1} := b_{e2.w1.m1} \cdot t_1 = 116.3 \text{ mm}^2$$

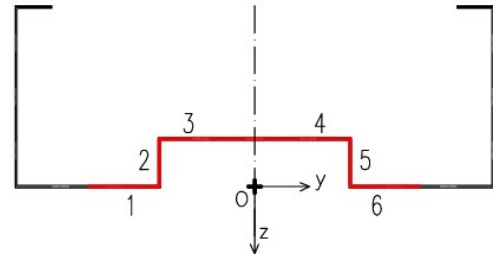
$$A_{2.w.m1} := b_{eff.w2.m1} \cdot t_1 = 80 \text{ mm}^2$$

$$A_{3.w.m1} := b_{e2.w3.m1} \cdot t_1 = 160 \text{ mm}^2$$

$$A_{4.w.m1} := A_{3.w.m1} = 160 \text{ mm}^2$$

$$A_{5.w.m1} := A_{2.w.m1} = 80 \text{ mm}^2$$

$$A_{6.w.m1} := A_{1.w.m1} = 116.32 \text{ mm}^2$$



$$A_{s.w.m1} := 2 \cdot (A_{1.w.m1} + A_{2.w.m1} + A_{3.w.m1}) = 712.64 \text{ mm}^2$$

Těžiště účinné části průřezu

$$y_{1.w.m1} := -\left(\frac{b_{w3}}{2} + \frac{b_{e2.w1.m1}}{2}\right) = -109.08 \text{ mm} \quad z_{1.w.m1} := 0 \text{ mm}$$

$$y_{2.w.m1} := -\frac{b_{w3}}{2} = -80 \text{ mm} \quad z_{2.w.m1} := -\frac{b_{w2}}{2} = -20 \text{ mm}$$

$$y_{3.w.m1} := -\left(\frac{b_{w3}}{2} - \frac{b_{e2.w3.m1}}{2}\right) = -40 \text{ mm} \quad z_{3.w.m1} := -b_{w2} = -40 \text{ mm}$$

$$y_{4.w.m1} := -y_{3.w.m1} = 40 \text{ mm} \quad z_{4.w.m1} := z_{3.w.m1} = -40 \text{ mm}$$

$$y_{5.w.m1} := -y_{2.w.m1} = 80 \text{ mm} \quad z_{5.w.m1} := z_{2.w.m1} = -20 \text{ mm}$$

$$y_{6.w.m1} := -y_{1.w.m1} = 109.08 \text{ mm} \quad z_{6.w.m1} := z_{1.w.m1} = 0 \text{ mm}$$

$$Ay_{1.m1} := A_{1.w.m1} \cdot y_{1.w.m1}$$

$$Ay_{2.m1} := A_{2.w.m1} \cdot y_{2.w.m1}$$

$$Ay_{3.m1} := A_{3.w.m1} \cdot y_{3.w.m1}$$

$$Ay_{4.m1} := A_{4.w.m1} \cdot y_{4.w.m1}$$

$$Ay_{5.m1} := A_{5.w.m1} \cdot y_{5.w.m1}$$

$$Ay_{6.m1} := A_{6.w.m1} \cdot y_{6.w.m1}$$

$$Az_{1.m1} := A_{1.w.m1} \cdot z_{1.w.m1}$$

$$Az_{2.m1} := A_{2.w.m1} \cdot z_{2.w.m1}$$

$$Az_{3.m1} := A_{3.w.m1} \cdot z_{3.w.m1}$$

$$Az_{4.m1} := A_{4.w.m1} \cdot z_{4.w.m1}$$

$$Az_{5.m1} := A_{5.w.m1} \cdot z_{5.w.m1}$$

$$Az_{6.m1} := A_{6.w.m1} \cdot z_{6.w.m1}$$

$$y_{c.w.m1} := \frac{Ay_{1.m1} + Ay_{2.m1} + Ay_{3.m1} + Ay_{4.m1} + Ay_{5.m1} + Ay_{6.m1}}{A_{s.w.m1}} = 0 \text{ mm}$$

$$z_{c.w.m1} := \frac{Az_{1.m1} + Az_{2.m1} + Az_{3.m1} + Az_{4.m1} + Az_{5.m1} + Az_{6.m1}}{A_{s.w.m1}} = -22.45 \text{ mm}$$

$$T_c = [y_c; z_c]$$

$$\text{Těžiště } T_{c.w.m1} : \quad y_{c.w.m1} = 0 \text{ mm} \quad z_{c.w.m1} = -22.45 \text{ mm}$$

## Moment setrvačnosti

$$I_{s1.w.m1} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w1.m1} \cdot t_1^3 + b_{e2.w1.m1} \cdot t_1 \cdot (z_{1.w.m1} - z_{c.w.m1})^2 = 58673.58 \text{ mm}^4$$

$$I_{s2.w.m1} := \frac{1}{12} \cdot t_1 \cdot b_{eff.w2.m1}^3 + t_1 \cdot b_{eff.w2.m1} \cdot (z_{2.w.m1} - z_{c.w.m1})^2 = 11147.52 \text{ mm}^4$$

$$I_{s3.w.m1} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w3.m1} \cdot t_1^3 + b_{e2.w3.m1} \cdot t_1 \cdot (z_{3.w.m1} - z_{c.w.m1})^2 = 49324.43 \text{ mm}^4$$

$$I_{s4.w.m1} := I_{s3.w.m1} = 49324.43 \text{ mm}^4$$

$$I_{s5.w.m1} := I_{s2.w.m1} = 11147.52 \text{ mm}^4$$

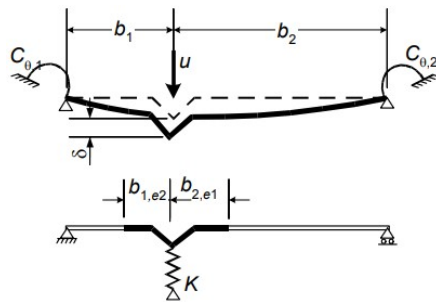
$$I_{s6.w.m1} := I_{s1.w.m1} = 58673.58 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.w.m1} := 2 \cdot (I_{s1.w.m1} + I_{s2.w.m1} + I_{s3.w.m1}) = 238291.05 \text{ mm}^4$$

## Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)

Pozn.: Dle ČSN EN 1993-1-3: Tenkostěnné prvky lze pro vnitřní výztuhu jako konzervativní alternativu hodnot rotačních tuhostí C01 a C02 vzít nulu a průhyb  $\delta$  lze stanovit ze vztahu níže.

$$\delta = \frac{u b_1^2 b_2^2}{3(b_1 + b_2)} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{E t^3}$$



a) Skutečný systém

b) Náhradní systém

$$u = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \nu = 0.3$$

$$b_{1.w.m1} := \frac{b_{w3}}{2} = 80 \text{ mm} \quad b_{2.w.m1} := b_{1.w} = 80 \text{ mm}$$

$$\delta_{w.m1} := \frac{u \cdot b_{1.w.m1}^2 \cdot b_{2.w.m1}^2}{3 \cdot (b_{1.w.m1} + b_{2.w.m1})} \cdot \frac{12 \cdot (1-\nu^2)}{E \cdot t_1^3} = 0.55 \text{ mm}$$

$$K_{w.m1} := \frac{u}{\delta_{w.m1}} = 1.803 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## Pružné kritické napětí pro vybočení

$$\sigma_{cr.s.w.m1} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{w.m1} \cdot E \cdot I_{s.w.m1}}}{A_{s.w.m1}} = 842.96 \text{ MPa}$$

## Štíhlosti dílčích částí stojiny

$$\lambda'_{d.w.m1} := \sqrt[2]{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.w.m1}}} = 0.528$$

Redukční součinitel pro distorzní vybočení, kdy:  $\lambda'_d < 0.65$

$$\chi_{d.w.m1} := 1.0$$

Redukovaná účinná plocha a tloušťka vnitřní výztuhy

$$A_{s.red.w.m1} := \chi_{d.w.m1} \cdot A_{s.w.m1} = 712.64 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.w.m1} := t_1 \cdot \frac{A_{s.red.w.m1}}{A_{s.w.m1}} = 2 \text{ mm}$$

$$c_{eff.AB1} = 30 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1.m1} = 58.16 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.m1} = 58.16 \text{ mm}$$

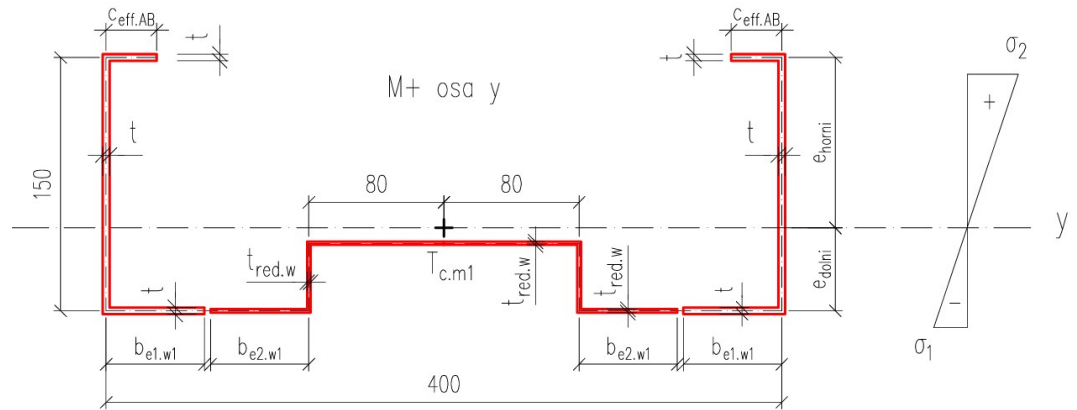
$$b_{eff.w2.m1} = 40 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.m1} = 80 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.m1} = 80 \text{ mm}$$

$$t_1 = 2 \text{ mm}$$

$$t_{red.w.m1} = 2 \text{ mm}$$



Obrázek 8 - Účinný průřez při kladném ohybovém momentu, profil 1

Posunutě těžiště a moment setrvačnosti efektivního průřezu

$$z_{Tc.m1} := 47.44 \text{ mm}$$

... z-ová souřadnice účinného průřezu

$$I_{y,eff.m1} := 4049713.2 \text{ mm}^4$$

... moment setrvačnosti účinného průřezu

Efektivní plocha účinného průřezu

$$A_{eff.m1} := A_{s.red.w.m1} + t_1 \cdot 2 \cdot (c_{eff.AB1} + b_{f.m1} + b_{e1.w1.m1}) = 1665.28 \text{ mm}^2$$

$$b_{f.m1} = 150 \text{ mm}$$

Průřezový modul účinného průřezu

$$e_{dolni.m1} := z_{Tc.m1} = 47.44 \text{ mm}$$

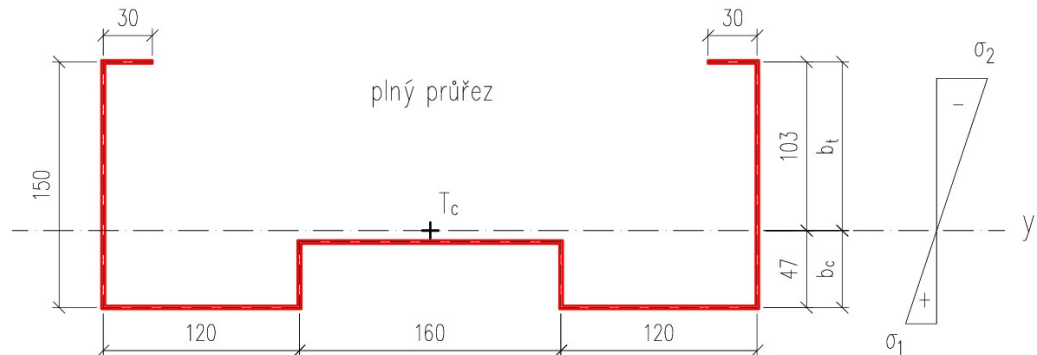
$$e_{horni.m1} := h_1 - e_{dolni.m1} = 102.56 \text{ mm}$$

$$e_{y.m1} := \max(e_{dolni.m1}, e_{horni.m1}) = 102.56 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff.m1} := \frac{I_{y,eff.m1}}{e_{y.m1}} = 39486.28 \text{ mm}^3$$

### 5.3. ÚČINNÝ PRŮŘEZ PŘI ZÁPORNÉM MOMENTU KOLEM OSY Y

Pro účinný průřez při záporném momentu kolem osy y se předpokládá, že boulení nenastane v tažené části. Okrajová výztuha a pásnice se nachází v tlačené části průřezu, kde může dojít k boulení. Tyto části budou posouzeny na účinky lokálního boulení a distorzní vybočení a dále bude vypočtena účinná plocha, moment setrvačnosti a průřezový modul stejným postupem jako v předešlých kapitolách.

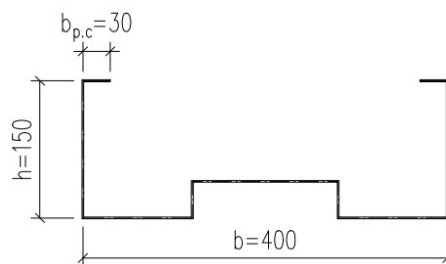


Obrázek 9 – Plně účinný průřez při záporném momentu, profil 1

#### 5.3.1. Lokální boulení - výztuha AB

Boulení průřezu je posuzováno dle normy ČSN EN 1993-1-5: Boulení stěn.

Při výpočtu je výztuha uvažována jako jednostranně podepřená stěna.



$$b_{p,c} = 30 \text{ mm}$$

$$b_{p,AB} = 150 \text{ mm}$$

$$\frac{b_{p,c}}{b_{p,AB}} = 0.20 \leq 0.35 \rightarrow k_{\sigma,AB,m2} := 0.5$$

$\psi_{AB,m2} := 1.0$  ... poměr koncových napětí pro rovnoměrný tlak po celé šířce

$k_{\sigma,AB,m2} = 0.5$  ... součinitel kritického napětí pro výztuhu

Redukovaná poměrná štíhlost

$$b_{AB} := AB = 30 \text{ mm}$$

$$\lambda'_{p,AB,m2} := \frac{b_{AB}}{t_1} = 0.747 < 0.748$$

Redukční součinitel pro jednostranně podepřené stěny  
(součinitel boulení pro přechýlující tlačené části)

$$\lambda'_p \leq 0.748 \rightarrow \rho_{AB,m2} := 1.0 \rightarrow \text{výztuha neboulí}$$

Účinná šířka pro jednoduchou výztuhu

$$c_{eff,AB,m2} := \rho_{AB,m2} \cdot b_{p,c} = 30 \text{ mm}$$

### 5.3.2. Účinky boulení - pásnice

$$b_{f.m2} := h_1 = 150 \text{ mm}$$

$$b_{t.f.m2} := z_{Tc} = 47 \text{ mm}$$

$$b_{c.f.m2} := h_1 - b_{t.f.m2} = 103 \text{ mm}$$

Poměr koncových napětí

$$\psi_{f.m2} := \frac{b_{t.f.m2}}{-b_{c.f.m2}} = -0.456$$

Součinitel kritického napětí pro:  $0 > \psi > -1$

$$k_{\sigma f.m2} := 5.98 \cdot (1 - \psi_{f.m2})^2 = 12.683$$

Poměrná štíhlost pásnice

$$\lambda'_{p.f.m2} := \frac{\frac{b_{f.m2}}{t_1}}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma f.m2}}} = 0.742$$

Redukční součinitel pro oboustranně podepřené stěny, kdy:  $\lambda'_{p.f.m2} > 0.673$

$$\rho_{p.f.m2.1} := \frac{\lambda'_{p.f.m2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{f.m2})}{\lambda'_{p.f.m2}{}^2} = 1.094 > 1.0 \rightarrow \text{pásnice neboulí}$$

$$(3 + \psi_{f.m2}) = 2.5 > 0 \rightarrow \text{OK}$$

Účinná šířka tlačené části pásnice

$$\rho_{p.f.m2} := \min(\rho_{p.f.m2.1}, 1.0) = 1.0$$

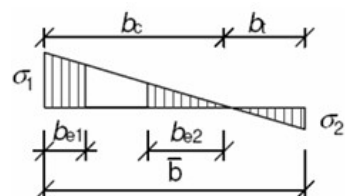
$$b_{eff.f.m2} := \rho_{p.f.m2} \cdot b_{c.f.m2} = 103 \text{ mm}$$

$$b_{e1.f.m2} := 0.4 \cdot b_{eff.f.m2} = 41.2 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f.m2} := 0.6 \cdot b_{eff.f.m2} = 61.8 \text{ mm}$$

### 5.3.3. Distorzní vybočení - pásnice

Pásnice se nachází v tažené i tlačené části. K lokálnímu boulení nedojde, jak bylo výpočtem ověřeno, ovšem může nastat distorzní vybočení v tlačené části. Účinná šířka a efektivní šířky pásnice se stanoví ČSN EN 1993-1-5, Tabulka 4.1



$$\psi < 0:$$

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$$

Účinná průřezová plocha

$$A_{1.f.m2} := b_{e1.f.m2} \cdot t_1 = 82.4 \text{ mm}^2$$

$$A_{2.f.m2} := c_{eff.AB1} \cdot t_1 = 60 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.f.m2} := A_{1.f.m2} + A_{2.f.m2} = 142.4 \text{ mm}^2$$

Těžiště účinné části průřezu

$$y_{1.f.m2} := \frac{b_{e1.f.m2}}{2} = 20.60 \text{ mm} \quad z_{1.f.m2} := 0 \text{ mm}$$

$$y_{2.f.m2} := b_{e1.f.m2} = 41.2 \text{ mm} \quad z_{2.f.m2} := \frac{c_{eff.AB1}}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$y_{c.f.m2} := \frac{A_{1.f.m2} \cdot y_{1.f.m2} + A_{2.f.m2} \cdot y_{2.f.m2}}{A_{s.f.m2}} = 29.3 \text{ mm}$$

$$z_{c.f.m2} := \frac{A_{1.f.m2} \cdot z_{1.f.m2} + A_{2.f.m2} \cdot z_{2.f.m2}}{A_{s.f.m2}} = 6.3 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti

$$I_{s1.f.m2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e1.f.m2} \cdot t_1^3 + b_{e1.f.m2} \cdot t_1 \cdot (z_{c.f.m2} - z_{1.f.m2})^2 = 3319 \text{ mm}^4$$

$$I_{s2.f.m2} := \frac{1}{12} \cdot t_1 \cdot c_{eff.AB.m2}^3 + t_1 \cdot c_{eff.AB.m2} \cdot (z_{2.f.m2} - z_{c.f.m2})^2 = 9020.3 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.f.m2} := I_{s1.f.m2} + I_{s2.f.m2} = 12339.3 \text{ mm}^4$$

Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)

Pozn. Výpočet bude obdobný jako výpočet u průřezu v tahu s jednotkovým zatížením 1 kN/m.

$$u = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \nu = 0.3$$

$$I_{f.m2} := \frac{1}{12} \cdot \frac{t_1^3}{(1 - \nu^2)} = 0.73 \text{ mm}^3$$

$$M_{124.m2} := \left( \frac{1}{3} \cdot h_1^2 \cdot h_1 + h_1^2 \cdot b_{w1} + (h_1 - CD)^2 \cdot \frac{b_{w3}}{2} \right) \cdot \text{kN}$$

$$M_{3.m2} := \left( \frac{1}{6} (h_1 \cdot (2 \cdot h_1 + (h_1 - CD)) + (h_1 - CD) \cdot (h_1 + 2 \cdot (h_1 - CD))) \right) \cdot CD \cdot \text{kN}$$

$$\delta_{f.m2} := \left( \frac{1}{E \cdot I_{f.m2}} \cdot (M_{124.m2} + M_{3.m2}) \right) \cdot \frac{1}{\text{m}} = 35.58 \text{ mm}$$

$$K_{f.m2} := \frac{u}{\delta_{f.m2}} = 0.028 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Pružné kritické napětí pro vybočení

$$\sigma_{cr.s.f.m2} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{f.m2} \cdot E \cdot I_{s.f.m2}}}{A_{s.f.m2}} = 119.85 \text{ MPa}$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{d.f.m2} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.f.m2}}} = 1.40$$

Redukční součinitel vzpěrnosti pro distorzní vybočení, kdy:  $0.65 < \lambda'_d < 1.38$

$$\chi_{d,f.m2} := 1.47 - 0.723 \cdot \lambda'_{d,f.m2} = 0.46 < 1.0$$

Redukovaná účinná plocha a tloušťka

$$A_{s.red.f.m2} := \chi_{d,f.m2} \cdot A_{s.f.m2} = 65.16 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.f.m2} := t_1 \cdot \frac{A_{s.red.f.m2}}{A_{s.f.m2}} = 0.92 \text{ mm}$$

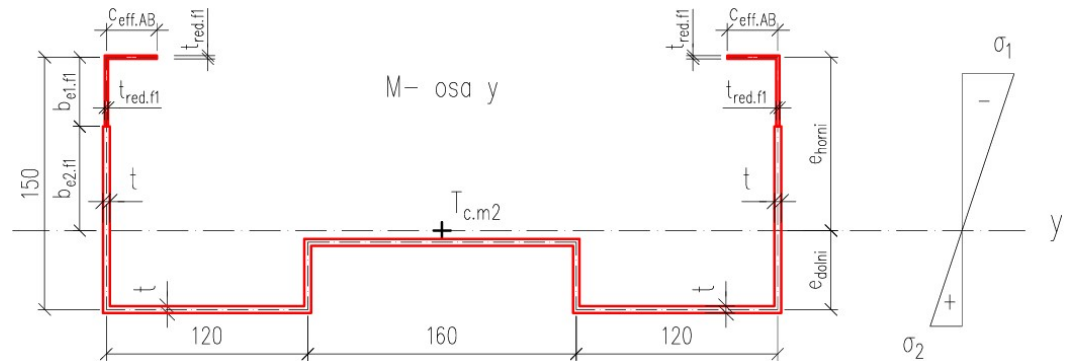
$$c_{eff.AB1} = 30 \text{ mm}$$

$$b_{e1.f.m2} = 41.2 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f.m2} = 61.8 \text{ mm}$$

$$t_1 = 2 \text{ mm}$$

$$t_{red.f.m2} = 0.92 \text{ mm}$$



Obrázek 10 – Účinný průřez při záporném ohybovém momentu, profil 1

Posunutá těžiště a moment setrvačnosti efektivního průřezu

$$z_{Tc.m2} := 38.37 \text{ mm}$$

... z-ová souřadnice účinného průřezu

$$I_{y,eff.m2} := 2721769 \text{ mm}^4$$

... moment setrvačnosti účinného průřezu

Efektivní plocha účinného průřezu

$$b_{f2} := h_1 - b_{e1.f.m2} = 108.8 \text{ mm}$$

$$A_{eff.m2} := 2 \cdot A_{s.red.f.m2} + t_1 \cdot 2 \cdot \left( b_{f2} + b_{w1} + b_{w2} + \frac{b_{w3}}{2} \right) = 1525.5 \text{ mm}^2$$

Průřezový modul účinného průřezu

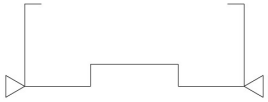
$$e_{dolni.m2} := z_{Tc.m2} = 38.37 \text{ mm}$$

$$e_{horni.m2} := h_1 - e_{dolni.m2} = 111.63 \text{ mm}$$

$$e_{y.m2} := \max(e_{dolni.m2}, e_{horni.m2}) = 111.63 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff.m2} := \frac{I_{y,eff.m2}}{e_{y.m2}} = 24382.06 \text{ mm}^3$$





## 5.4. VZPĚŘ

Zvolený profil je jednoose symetrický dle osy z. Podepření profilu zabraňuje kroucení a není tedy nutno posuzovat vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr, tzn. není zohledněna prostorová ztráta stability a provede se pouze posouzení rovinného vzpěru pro osu y. Pro vzpěrné síly je uvažována křivka vzpěrnosti "b" se součinitelem imperfekce  $\alpha_b := 0.34$  a použije se systémová vzpěrná délka  $L_{cr} = 0.5 \cdot B = 1.5 \text{ m}$ .

Průřezová plocha plně účinného průřezu

$$A_c = 1680 \text{ mm}^2$$

Účinná plocha průřezu v tlaku

$$A_{eff.t} = 1042 \text{ mm}^2$$

Poloměry setrvačnosti

$$I_{y.c.t} = 2020102.9 \text{ mm}^4 \quad i_{y.t} := \sqrt{\frac{I_{y.c.t}}{A_{eff.t}}} = 44.03 \text{ mm}$$

Poměrné štíhlosti - rovinný vzpěr pro osu y

$$L_{cr.y1} := 0.5 \cdot B = 1.5 \text{ m}$$

$$\lambda_{1y.t} := 93.9 \cdot \varepsilon = 93.9$$

$$\lambda'_{y.t} := \frac{L_{cr.y1}}{i_{y.t}} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff.t}}{A_c}} = 0.286$$

Součinitel vzpěru

$$\alpha_b = 0.34$$

$$\phi_{y.t} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_b \cdot (\lambda'_{y.t} - 0.2) + \lambda'_{y.t}{}^2) = 0.555$$

$$\chi_{y.t} := \frac{1}{\phi_{y.t} + \sqrt{\phi_{y.t}{}^2 - \lambda'_{y.t}{}^2}} = 0.969 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

### 5.4.2. Vzpěrnostní součinitele

Vybraný profil byl posouzen na vybočení kolmo k ose y a jelikož se neuvažuje vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr, hodnoty dílčích vzpěrnostních součinitelů se vyjma  $\chi_y$  rovnají 1.0.

|                                |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| $\chi_y := \chi_{y.t} = 0.969$ | ... vybočení ve směru osy y |
| $\chi_z := 1.0$                | ... vybočení ve směru osy z |
| $\chi_{LT} := 1.0$             | ... klopení                 |
| $\chi_T := 1.0$                | ... zkroucení               |
| $\chi_{TF} := 1.0$             | ... prostorový vzpěr        |

Rozhodující součinitel vzpěrnosti

$$\chi := \min(\chi_{y.t}, \chi_z, \chi_{LT}, \chi_T, \chi_{TF}) = 0.97$$

## 5.5. VNITŘNÍ SÍLY - POSOUZENÍ MSÚ

Vnitřní síly jsou vygenerovány programem Scia Engineer. Do programu je ručně zadána hodnota efektivní průřezové plochy v tlaku a nepříznivější hodnota momentu setrvačnosti v ohybu z důvodu zohlednění lokálního boulení a distorzního vybočení průřezu.

Vnitřní síly účinného průřezu

$$N_{Ed} := 33.91 \text{ kN}$$

$$M_{y.Ed} := 9.56 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 5.5.1. Posouzení MSÚ

Tlak

$$A_{eff.t} = 1042 \text{ mm}^2$$

$$\gamma_{M1} := 1.0$$

$$N_{b.Rd} := \frac{\chi \cdot A_{eff.t} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 237.36 \text{ kN} > N_{Ed} = 33.91 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Využití: } \frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}} = 0.14$$

Ohyb

$$M_{y.Rd.m1} := \frac{W_{y,eff.m1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 9.28 \text{ kN} \cdot \text{m} < M_{y.Ed} = 9.56 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{NEVYHOVUJE}$$

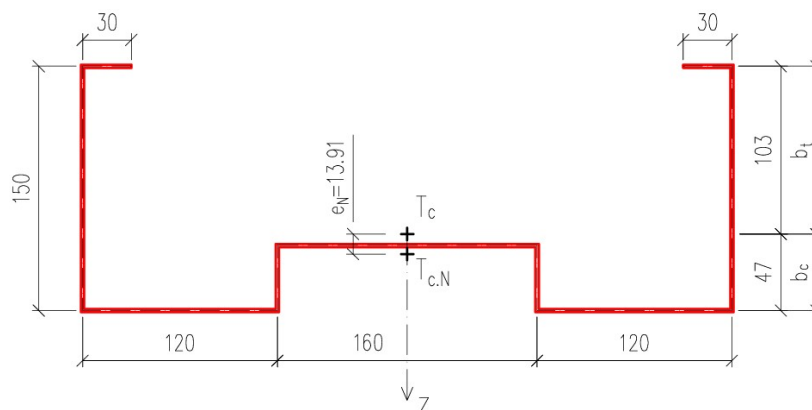
$$M_{y.Rd.m2} := \frac{W_{y,eff.m2} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 5.73 \text{ kN} \cdot \text{m} < M_{y.Ed} = 9.56 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{NEVYHOVUJE}$$

Kombinace tlaku a ohybu

Pozn.: Poloha těžiště účinného průřezu není shodná s polohou těžiště plného průřezu. Jak bylo řešeno v kapitole 5.1.7. *Posun těžišťové osy v tlaku*, je nutno v důsledku posunu těžišťové osy o  $\Delta e_N$  do výpočtu zahrnout přídatný moment  $\Delta M_{y.Ed}$ .

$$\Delta e_N = 13.91 \text{ mm}$$

$$\Delta M_{y.Ed} := \Delta e_N \cdot N_{Ed} = 0.47 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



$$N_{Ed} = 33.91 \text{ kN}$$

$$M_{y.Ed} = 9.56 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{y.Rd.m1}}\right)^{0.8} \leq 1.0$$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{y.Rd.m1}}\right)^{0.8} = 1.28 > 1.0 \rightarrow \text{NEVYHOVUJE}$$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{y.Rd.m2}}\right)^{0.8} \leq 1.0$$

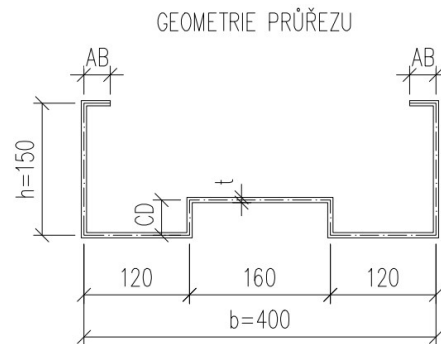
$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}}\right)^{0.8} + \left(\frac{M_{y.Ed} - \Delta M_{y.Ed}}{M_{y.Rd.m2}}\right)^{0.8} = 1.66 > 1.0 \rightarrow \text{NEVYHOVUJE}$$

### 5.5.1. Posouzení MSP

Navržený profil výrazně nevyhověl na kombinaci tlaku a ohybu. MSP bude posouzeno u finálního optimalizovaného profilu.

## 6. OPTIMALIZACE PROFILU PŘÍČLE

Na základě posouzení prvního návrhu příčle, která nevyhověla na MSÚ, je změněna geometrie průřezu. Předpokládá se, že vliv na únosnost profilu budou mít mimo změnu tloušťky průřezu i okrajová výztuha a vnitřní výztuha. Pro další návrh jsou zvětšeny všechny tři parametry  $t$ ,  $AB$ ,  $CD_2$ .



$$t_2 := 2.2 \text{ mm}$$

$$AB_2 := 50 \text{ mm}$$

$$CD_2 := 145 \text{ mm}$$

$$b_{w1.2} := b_{w1} = 120 \text{ mm}$$

$$b_{w2.2} := CD_2 = 145 \text{ mm}$$

$$b_{w3.2} := b_{w3} = 160 \text{ mm}$$

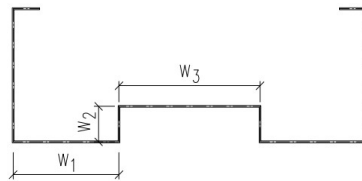
Zatřídění průřezu - pásnice

$$c_{f2} := h_1 - 2 \cdot r_1 = 144 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = 1.0$$

$$\frac{c_{f2}}{t_2} = 65.5 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{pásnice třídy 4}$$

Zatřídění průřezu - stojina



$$c_{w1.2} := b_{w1.2} = 120 \text{ mm}$$

$$c_{w2.2} := b_{w2.2} = 145 \text{ mm}$$

$$c_{w3.2} := b_{w3.2} = 160 \text{ mm}$$

$$\frac{c_{w1.2}}{t_2} = 54.5 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{stojina třídy 4}$$

$$\frac{c_{w2.2}}{t_2} = 65.9 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{stojina třídy 4}$$

$$\frac{c_{w3.2}}{t_2} = 72.7 > 14 \cdot \varepsilon = 14 \rightarrow \text{stojina třídy 4}$$

### 6.1. ÚČINNÝ PRŮŘEZ V TLAKU

#### 6.1.1. Lokální boulení - výztuha AB

$$b_{p.c2} := AB_2 = 50 \text{ mm}$$

$$b_{p.AB} = 150 \text{ mm}$$

$$\frac{b_{p.c2}}{b_{p.AB}} = 0.33 \leq 0.35 \rightarrow k_{\sigma.AB2} := 0.5$$

$\psi_{AB2} := 1.0$  ... poměr koncových napětí pro rovnoměrný tlak po celé šířce

$k_{\sigma.AB2} = 0.5$  ... součinitel kritického napětí pro výztuhu

Poměrná štíhlost výztuhy

$$\lambda'_{p.AB2} := \frac{b_{p.c2}}{t_2} = \frac{b_{p.c2}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma.AB2}}} = 1.132$$

Redukční součinitel pro jednostranně podepřené stěny  $\lambda'_{p.AB} > 0.748$

$$\rho_{AB2} := \frac{\lambda'_{p.AB2} - 0.188}{\lambda'_{p.AB2}{}^2} = 0.74 < 1.0 \rightarrow \text{výztuha AB boulí}$$

Účinná šířka pro jednoduchou výztuhy

$$c_{eff.AB2} := \rho_{AB2} \cdot b_{p.c2} = 36.84 \text{ mm}$$

### 6.1.2. Lokální boulení - pásnice

$\psi_{f2} := \psi_{AB2} = 1.0$  ... poměr koncových napětí pro rovnoměrný tlak po celé šířce  
 $k_{\sigma.f2} := 4.0$  ... součinitel kritického napětí pro pásnici

Poměrná štíhlost pásnice

$$b_{p.f2} := h_1 = 150 \text{ mm}$$

$$\lambda'_{p.f2} := \frac{b_{p.f2}}{t_2} = \frac{b_{p.f2}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma.f2}}} = 1.2$$

Redukční součinitel pro oboustranně podepřené stěny, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$1) \rho_{f2} := \frac{\lambda'_{p.f2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{f2})}{\lambda'_{p.f2}{}^2} = 0.68 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

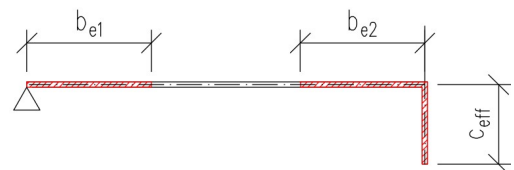
$$2) (3 + \psi_{f2}) = 4.0 > 0 \rightarrow \text{OK}$$

Účinná šířka pásnice

$$b_{eff.f2} := \rho_{f2} \cdot b_{p.f2} = 102.06 \text{ mm}$$

$$b_{e1.f2} := 0.5 \cdot b_{eff.f2} = 51.03 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f2} := 0.5 \cdot b_{eff.f2} = 51.03 \text{ mm}$$



### 6.1.3. Lokální boulení - stojina

$$b_{w1.2} = 120 \text{ mm} \quad b_{w2.2} = 145 \text{ mm} \quad b_{w3.2} = 160 \text{ mm}$$

$\psi_{w.2} := \psi_{f2} = 1.0$  ... poměr koncových napětí pro rovnoměrný tlak po celé šířce

$k_{\sigma.w.2} := k_{\sigma.f2} = 4.0$  ... součinitel kritického napětí pro stojinu

Poměrná štíhlost stojiny

$$\lambda'_{p.w1.2} := \frac{b_{w1.2}}{t_2} = \frac{b_{w1.2}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma.w.2}}} = 0.96$$

$$\rho_{w1.2} := \frac{\lambda'_{p.w1.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w.2})}{\lambda'_{p.w1.2}{}^2} = 0.803$$

$$\lambda'_{p.w2.2} := \frac{\frac{b_{w2.2}}{t_2}}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma.w.2}}} = 1.16 \quad \rho_{w2.2} := \frac{\lambda'_{p.w2.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w.2})}{\lambda'_{p.w2.2}{}^2} = 0.698$$

$$\lambda'_{p.w3.2} := \frac{\frac{b_{w3.2}}{t_2}}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma.w.2}}} = 1.28 \quad \rho_{w3.2} := \frac{\lambda'_{p.w3.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w.2})}{\lambda'_{p.w3.2}{}^2} = 0.647$$

Redukční součinitel pro vnitřní tlačené části  $w_1, w_2, w_3$

- 1)  $\rho_{w1.2} = 0.803 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$
- 2)  $\rho_{w2.2} = 0.70 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$
- 3)  $\rho_{w3.2} = 0.647 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$

Účinná šířka stojiny

$$b_{eff.w1.2} := \rho_{w1.2} \cdot b_{w1.2} = 96.33 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.2} = 48.17 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.2} = 48.17 \text{ mm}$$

$$b_{eff.w2.2} := \rho_{w2.2} \cdot b_{w2.2} = 101.27 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w2.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w2.2} = 50.63 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w2.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w2.2} = 50.63 \text{ mm}$$

$$b_{eff.w3.2} := \rho_{w3.2} \cdot b_{w3.2} = 103.49 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w3.2} = 51.74 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.2} := b_{e1.w3.2} = 51.74 \text{ mm}$$

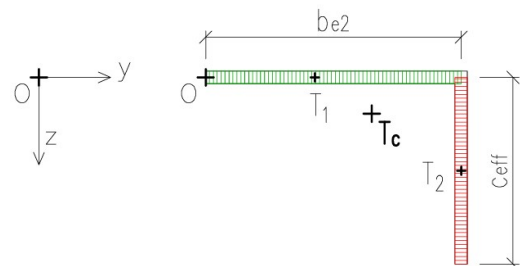
#### 6.1.4. Distorzní vybočení - pásnice

Účinná průřezová plocha

$$A_{1.f2} := b_{e2.f2} \cdot t_2 = 112.3 \text{ mm}^2$$

$$A_{2.AB2} := c_{eff.AB2} \cdot t_2 = 81.1 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.f2} := A_{1.f2} + A_{2.AB2} = 193.3 \text{ mm}^2$$



$$b_{e2.f2} = 51.03 \text{ mm}$$

$$c_{eff.AB2} = 36.84 \text{ mm}$$

Těžiště účinné části průřezu

$$y_{1.f2} := \frac{b_{e2.f2}}{2} = 25.51 \text{ mm}$$

$$z_{1.f2} := 0 \text{ mm}$$

$$y_{2.AB2} := b_{e2.f2} = 51.03 \text{ mm}$$

$$z_{2.AB2} := \frac{c_{eff.AB2}}{2} = 18.4 \text{ mm}$$

$$y_{c.f2} := \frac{y_{1.f2} \cdot A_{1.f2} + y_{2.AB2} \cdot A_{2.AB2}}{A_{s.f2}} = 36.21 \text{ mm}$$

$$z_{c.f2} := \frac{z_{1.f2} \cdot A_{1.f2} + z_{2.AB2} \cdot A_{2.AB2}}{A_{s.f2}} = 7.72 \text{ mm}$$

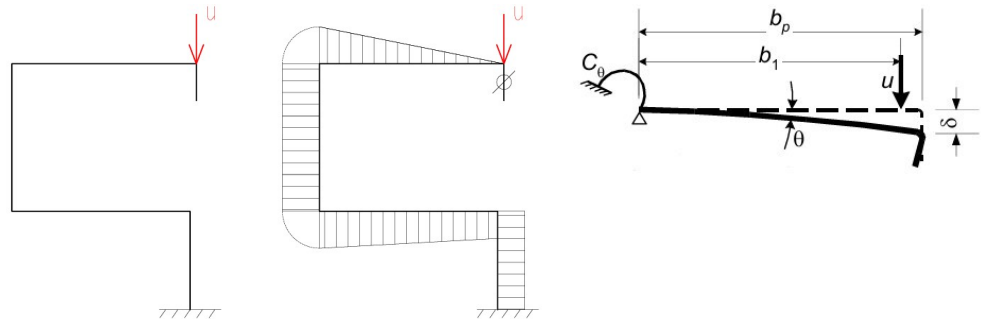
### Moment setrvačnosti

$$I_{s1.f2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.f2} \cdot t_2^3 + b_{e2.f2} \cdot t_2 \cdot (z_{c.f2} - z_{1.f2})^2 = 6741.4 \text{ mm}^4$$

$$I_{s2.f2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot c_{eff.AB2}^3 + t_2 \cdot c_{eff.AB2} \cdot (z_{2.AB2} - z_{c.f2})^2 = 18442.1 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.f2} := I_{s1.f2} + I_{s2.f2} = 25183.5 \text{ mm}^4$$

### Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)



$$u = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \nu = 0.3$$

$$I_{f2} := \frac{1}{12} \cdot \frac{t_2^3}{(1 - \nu^2)} = 0.98 \text{ mm}^3$$

$$M_{124.2} := \left( \frac{1}{3} \cdot h_1^2 \cdot h_1 + h_1^2 \cdot b_{w1.2} + (h_1 - CD_2)^2 \cdot \frac{b_{w3.2}}{2} \right) \cdot \text{kN}$$

$$M_{3.2} := \left( \frac{1}{6} (h_1 \cdot (2 \cdot h_1 + (h_1 - CD_2)) + (h_1 - CD_2) \cdot (h_1 + 2 \cdot (h_1 - CD_2))) \right) \cdot CD_2 \cdot \text{kN}$$

$E = 210 \text{ GPa}$

$$\delta_{f2} := \left( \frac{1}{E \cdot I_{f2}} \cdot (M_{124.2} + M_{3.2}) \right) \cdot \frac{1}{\text{m}} = 24.18 \text{ mm}$$

$$K_{f2} := \frac{u}{\delta_{f2}} = 0.041 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

### Pružné kritické napětí pro vybočení

$$\sigma_{cr.s.f2} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{f2} \cdot E \cdot I_{s.f2}}}{A_{s.f2}} = 153.0 \text{ MPa}$$

### Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{d.f2} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.f2}}} = 1.239$$

Redukční součinitel vzpěrnosti, kdy:  $0.65 < \lambda'_{d.f2} < 1.38$

$$\chi_{d.f2} := 1.47 - 0.723 \cdot \lambda'_{d.f2} = 0.57 < 1.0$$

Redukovaná účinná plocha a tloušťka

$$A_{s.red.f2} := \chi_{d.f2} \cdot A_{s.f2} = 110.95 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.f2} := t_2 \cdot \frac{A_{s.red.f2}}{A_{s.f2}} = 1.26 \text{ mm}$$

### 6.1.5. Distorzní vybočení - stojina

Účinná průřezová plocha

$$b_{e2.w1.2} = 48.17 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.2} = 51.74 \text{ mm}$$

$$A_{1.w.2} := b_{e2.w1.2} \cdot t_2 = 106 \text{ mm}^2$$

$$A_{2a.w.2} := b_{e1.w2.2} \cdot t_2 = 111.4 \text{ mm}^2$$

$$A_{2b.w.2} := b_{e2.w2.2} \cdot t_2 = 111.4 \text{ mm}^2$$

$$A_{3.w.2} := b_{e2.w3.2} \cdot t_2 = 113.8 \text{ mm}^2$$

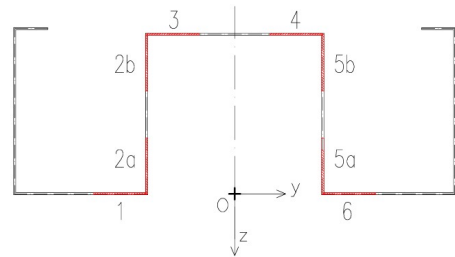
$$A_{4.w.2} := A_{3.w.2} = 113.84 \text{ mm}^2$$

$$A_{5a.w.2} := A_{2a.w.2} = 111.4 \text{ mm}^2$$

$$A_{5b.w.2} := A_{2b.w.2} = 111.4 \text{ mm}^2$$

$$A_{6.w.2} := A_{1.w.2} = 105.97 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.w.2} := 2 \cdot (A_{1.w.2} + A_{2a.w.2} + A_{2b.w.2} + A_{3.w.2}) = 885.19 \text{ mm}^2$$



Těžiště účinné části průřezu

$$y_{1.w.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2} + \frac{b_{e2.w1.2}}{2}\right)$$

$$z_{1.w.2} := 0 \text{ mm}$$

$$y_{2a.w.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2}\right)$$

$$z_{2a.w.2} := -\left(\frac{b_{e1.w2.2}}{2}\right)$$

$$y_{2b.w.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2}\right)$$

$$z_{2b.w.2} := -\left(b_{w2.2} - \frac{b_{e2.w2.2}}{2}\right)$$

$$y_{3.w.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2} - \frac{b_{e2.w3.2}}{2}\right)$$

$$z_{3.w.2} := -b_{w2.2}$$

$$y_{4.w.2} := -y_{3.w.2} = 54.13 \text{ mm}$$

$$z_{4.w.2} := z_{3.w.2} = -145 \text{ mm}$$

$$y_{5a.w.2} := -y_{2a.w.2} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{5a.w.2} := z_{2a.w.2} = -25.32 \text{ mm}$$

$$y_{5b.w.2} := -y_{2b.w.2} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{5b.w.2} := z_{2b.w.2} = -119.68 \text{ mm}$$

$$y_{6.w.2} := -y_{1.w.2} = 104.08 \text{ mm}$$

$$z_{6.w.2} := z_{1.w.2} = 0 \text{ mm}$$

$$Ay_{1.w.2} := A_{1.w.2} \cdot y_{1.w.2}$$

$$Az_{1.w.2} := A_{1.w.2} \cdot z_{1.w.2}$$

$$Ay_{2a.w.2} := A_{2a.w.2} \cdot y_{2a.w.2}$$

$$Az_{2a.w.2} := A_{2a.w.2} \cdot z_{2a.w.2}$$

$$Ay_{2b.w.2} := A_{2b.w.2} \cdot y_{2b.w.2}$$

$$Az_{2b.w.2} := A_{2b.w.2} \cdot z_{2b.w.2}$$

$$Ay_{3.w.2} := A_{3.w.2} \cdot y_{3.w.2}$$

$$Az_{3.w.2} := A_{3.w.2} \cdot z_{3.w.2}$$

$$Ay_{4.w.2} := A_{4.w.2} \cdot y_{4.w.2}$$

$$Az_{4.w.2} := A_{4.w.2} \cdot z_{4.w.2}$$

$$Ay_{5a.w.2} := A_{5a.w.2} \cdot y_{5a.w.2}$$

$$Az_{5a.w.2} := A_{5a.w.2} \cdot z_{5a.w.2}$$

$$Ay_{5b.w.2} := A_{5b.w.2} \cdot y_{5b.w.2}$$

$$Az_{5b.w.2} := A_{5b.w.2} \cdot z_{5b.w.2}$$

$$Ay_{6.w.2} := A_{6.w.2} \cdot y_{6.w.2}$$

$$Az_{6.w.2} := A_{6.w.2} \cdot z_{6.w.2}$$



$$y_{c.w.2} := \frac{Ay_{1.w.2} + Ay_{2a.w.2} + Ay_{2b.w.2} + Ay_{3.w.2} + Ay_{4.w.2} + Ay_{5a.w.2} + Ay_{5b.w.2} + Ay_{6.w.2}}{A_{s.w.2}}$$

$$z_{c.w.2} := \frac{Az_{1.w.2} + Az_{2a.w.2} + Az_{2b.w.2} + Az_{3.w.2} + Az_{4.w.2} + Az_{5a.w.2} + Az_{5b.w.2} + Az_{6.w.2}}{A_{s.w.2}}$$

Těžiště  $T_{c.w.2}$  :  $y_{c.w.2} = 0 \text{ mm}$   $z_{c.w.2} = -73.79 \text{ mm}$

### Moment setrvačnosti

$$I_{s1.w.2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w1.2} \cdot t_2^3 + b_{e2.w1.2} \cdot t_2 \cdot (z_{1.w.2} - z_{c.w.2})^2 = 577015.9 \text{ mm}^4$$

$$I_{s2a.w.2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot b_{e1.w2.2}^3 + t_2 \cdot b_{e1.w2.2} \cdot (z_{2a.w.2} - z_{c.w.2})^2 = 285531.9 \text{ mm}^4$$

$$I_{s2b.w.2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot b_{e2.w2.2}^3 + t_2 \cdot b_{e2.w2.2} \cdot (z_{2b.w.2} - z_{c.w.2})^2 = 258420 \text{ mm}^4$$

$$I_{s3.w.2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w3.2} \cdot t_2^3 + b_{e2.w3.2} \cdot t_2 \cdot (z_{3.w.2} - z_{c.w.2})^2 = 577311.3 \text{ mm}^4$$

$$I_{s4.w.2} := I_{s3.w.2} = 577311.3 \text{ mm}^4$$

$$I_{s5a.w.2} := I_{s2a.w.2} = 285531.9 \text{ mm}^4$$

$$I_{s5b.w.2} := I_{s2b.w.2} = 258420.04 \text{ mm}^4$$

$$I_{s6.w.2} := I_{s1.w.2} = 577015.9 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.w.2} := 2 \cdot (I_{s1.w.2} + I_{s2a.w.2} + I_{s2b.w.2} + I_{s3.w.2}) = 3396558.2 \text{ mm}^4$$

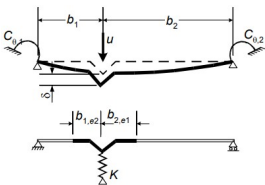
### Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)

$$b_{1.w.2} := \frac{b_{w3.2}}{2} = 80 \text{ mm} \quad u = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$b_{2.w.2} := b_{1.w.2} = 80 \text{ mm} \quad \nu = 0.3$$

$$\delta_{w.2} := \frac{u \cdot b_{1.w.2}^2 \cdot b_{2.w.2}^2}{3 \cdot (b_{1.w.2} + b_{2.w.2})} \cdot \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot t_2^3} \cdot \frac{1}{m} = 0.417 \frac{1}{m} \cdot \text{mm}$$

$$K_{w.2} := \frac{u}{\delta_{w.2}} \cdot \frac{1}{m} = 2.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



### Pružné kritické napětí pro vybočení a štíhlost

$$\sigma_{cr.s.w.2} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{w.2} \cdot E \cdot I_{s.w.2}}}{A_{s.w.2}} = 2955.95 \text{ MPa}$$

$$\lambda'_{d.w.2} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.w.2}}} = 0.282$$

Redukční součinitel pro distorzní vybočení, kdy:  $\lambda'_d < 0.65$

$$\chi_{d.w.2} := 1.0$$

## Účinná plocha a tloušťka

$$A_{s.red.w.2} := \chi_{d.w.2} \cdot A_{s.w.2} = 885.19 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.w.2} := t_2 \cdot \frac{A_{s.red.w.2}}{A_{s.w.2}} = 2.2 \text{ mm}$$

### 6.1.6. Účinný průřez v tlaku

$$c_{eff.AB2} = 36.84 \text{ mm}$$

$$b_{e1.f2} = 51.03 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f2} = 51.03 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1.2} = 48.17 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.2} = 48.17 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w2.2} = 50.63 \text{ mm}$$

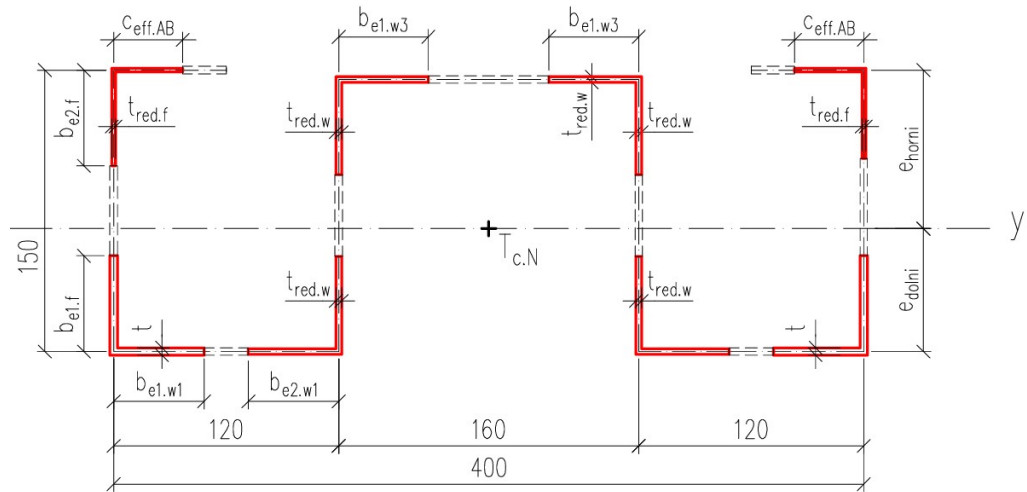
$$b_{e2.w2.2} = 50.63 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.2} = 51.74 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.2} = 51.74 \text{ mm}$$

$$t_{red.f2} = 1.26 \text{ mm}$$

$$t_{red.w.2} = 2.2 \text{ mm}$$



Obrázek 11 – Účinný průřez v tlaku, profil 2

### Posunutě těžiště a moment setrvačnosti efektivního průřezu

$$z_{Tc.t2} := 65.46 \text{ mm}$$

$$I_{y.c.t2} := 5915064.5 \text{ mm}^4$$

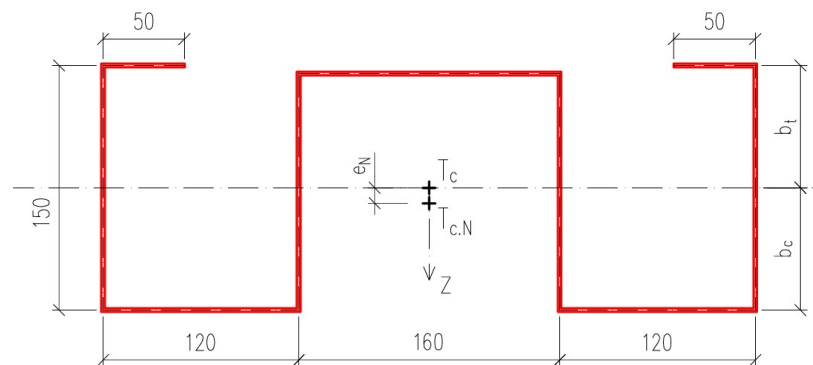
### Efektivní plocha účinného průřezu

$$A_{eff.red.t2} := t_{red.f2} \cdot 2 \cdot (c_{eff.AB2} + b_{e2.f2}) + t_{red.w.2} \cdot 2 \cdot (b_{e2.w1.2} + b_{e1.w2.2} + b_{e1.w2.2} + b_{e1.w3.2})$$

$$A_{eff.t.2} := t_2 \cdot 2 \cdot (b_{e1.f2} + b_{e2.w1.2})$$

$$A_{eff.t2} := A_{eff.red.t2} + A_{eff.t.2} = 1543.55 \text{ mm}^2$$

### 6.1.7. Posun těžišťové osy v tlaku



$$A_{c2} := 2398 \text{ mm}^2$$

$$I_{y.c2} := 8292059.1 \text{ mm}^4$$

$$z_{Tc2} := 74.98 \text{ mm}$$

$$\Delta e_{N2} := z_{Tc2} - z_{Tc.t2} = 9.5 \text{ mm}$$

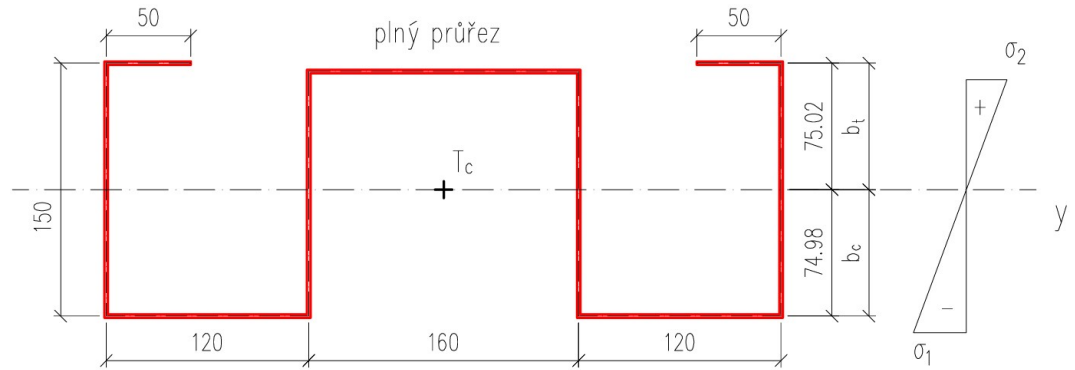
... plocha plně účinného průřezu

... moment setrvačnosti plně účinného průřezu

... z-ová souřadnice plně účinného průřezu

... posun těžišťové osy účinného průřezu

## 6.2. ÚČINNÝ PRŮŘEZ PŘI KLADNÉM MOMENTU KOLEM OSY



Obrázek 12 – Plně účinný průřez při kladném momentu, profil 2

### 6.2.1. Účinky boulení - výztuha AB

Výztuha se nachází v tažené části průřezu a k boulení docházet nebude.

$$c_{eff,AB,m1.2} := AB_2 = 50 \text{ mm}$$

### 6.2.2. Účinky boulení - pásnice

Pásnice je tažená i tlačaná. V tažené části nedochází k redukci účinného průřezu, v tlačané části k redukci dojít může, tzn. je nutno ověřit účinky boulení na pásnici.

$$b_{c,f,m1.2} := z_{Tc2} = 74.98 \text{ mm} \quad b_{t,f,m1.2} := h_1 - b_{c,f,m1.2} = 75.02 \text{ mm}$$

Poměr koncových napětí

$$\psi_{f,m1.2} := \frac{b_{t,f,m1.2}}{-b_{c,f,m1.2}} = -1.001$$

Součinitel kritického napětí pro:  $-1 > \psi > -3$

$$k_{\sigma,f,m1.2} := 5.98 \cdot (1 - \psi_{f,m1.2})^2 = 23.93$$

Poměrná štíhlost pásnice

$$b_{f,m1.2} := h_1$$

$$t_2 = 2.2 \text{ mm}$$

$$\lambda'_{p,f,m1.2} := \frac{\frac{b_{f,m1.2}}{t_2}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma,f,m1.2}}} = 0.491$$

Redukční součinitel, kdy:  $\lambda'_p \leq 0.673$

$$\rho_{f,m1.2} := 1.0 \rightarrow \text{pásnice nebolí}$$

Účinné šířky

$$b_{eff,f,m1.2} := \rho_{f,m1.2} \cdot b_{c,f,m1.2} = 74.98 \text{ mm}$$

$$b_{e1,f,m1.2} := 0.4 \cdot b_{eff,f,m1.2} = 29.99 \text{ mm}$$

$$b_{e2,f,m1.2} := 0.6 \cdot b_{eff,f,m1.2} = 44.99 \text{ mm}$$

$$b_{e2,f,m1.2} := h_1 - z_{Tc2} + 0.6 \cdot b_{eff,f,m1.2} = 120.01 \text{ mm}$$

Pozn.: Pro další výpočet je uvažována efektivní šířka pásnice  $b_{e2,f,m1.2}$  včetně tažené části.

### 6.2.3. Účinky boulení - stojina část $w_1$

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí pro rovnoměrné rozdělení napětí

$$\psi_{w1.m1.2} := 1.0 \quad \rightarrow \quad k_{\sigma.w1.m1.2} := 4.0$$

Redukovaná poměrná štíhlost

$$b_{w1.2} = 120 \text{ mm} \quad \sigma_{com.Ed.w1.2} := \frac{f_y}{\psi_{f.m1.2}} = -234.87 \text{ MPa}$$

$$\lambda'_{p.w1} = 1.0563$$

$$\lambda'_{p.w1.red.m1.2} := \lambda'_{p.w1.2} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{com.Ed.w1.2}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 0.9601 > 0.673$$

Redukční součinitel boulení, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w1.m1.2} := \frac{\lambda'_{p.w1.red.m1.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w1.m1.2})}{\lambda'_{p.w1.red.m1.2}^2} = 0.803 \quad \rightarrow \quad \text{část stojiny } w_1 \text{ boulí}$$

Redukovaná účinná šířka stojiny

$$b_{eff.w1.m1.2} := \rho_{w1.m1.2} \cdot b_{w1.2} = 96.35 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1.m1.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.m1.2} = 48.18 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.m1.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.m1.2} = 48.18 \text{ mm}$$

### 6.2.4. Účinky boulení - stojina část $w_2$

Hodnota napětí ve spodních tlačných vláknech je rovna hodnotě napětí u průřezu pásnice  $\sigma_{com.Ed.w1}$  a napětí v horních vláknech  $\sigma_{com.Ed.w2}$  bude dopočteno.

$$\sigma_{com.Ed.1.w2.m1.2} := \sigma_{com.Ed.w1.2} = -234.87 \text{ MPa}$$

$$z_{Tc2} = 74.98 \text{ mm}$$

$$b_{w2.2} = 145 \text{ mm}$$

$$b_{c2} := z_{Tc2} = 74.98 \text{ mm}$$

$$b_{t2} := b_{w2.2} - z_{Tc2} = 70.02 \text{ mm}$$

$$\sigma_{w2.tlak.2} := \sigma_{com.Ed.1.w2.m1.2} = -234.87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{w2.tah.2} := \sigma_{com.Ed.w1.2} \cdot \frac{(b_{w2.2} - z_{Tc2})}{-z_{Tc2}} = 219.34 \text{ MPa}$$

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí

$$\psi_{w2.m1.2} := \frac{\sigma_{w2.tah.2}}{\sigma_{w2.tlak.2}} = -0.93$$

Součinitel kritického napětí pro:  $0 > \psi > -1$

$$k_{\sigma.w2.m1.2} := 7.81 - 6.29 \cdot \psi_{w2.m1.2} + 9.78 \cdot \psi_{w2.m1.2}^2 = 22.21$$

Poměrná štíhlost

$$\sigma_{max.m1.2} := \max(|\sigma_{w2.tlak.2}|, |\sigma_{w2.tah.2}|) = 234.87 \text{ MPa}$$

$$\lambda'_{p.w2.red.m1.2} := \lambda'_{p.w2.2} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{max.m1.2}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 1.160$$

Redukční součinitel boulení, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w2.m1.2} := \frac{\lambda'_{p.w2.red.m1.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w2.m1.2})}{\lambda'_{p.w2.red.m1.2}^2} = 0.778$$

$$b_{c.w2.m1.2} := z_{Tc2}$$

$$b_{c.w2.m1.2} = 74.98 \text{ mm}$$

Celá část průřezu je účinná

$$b_{eff.w2.m1.2} := \rho_{w2.m1.2} \cdot b_{c.w2.m1.2} = 58.3 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w2.m1.2} := 0.4 \cdot b_{eff.w2.m1.2} = 23.32 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w2.m1.2} := 0.6 \cdot b_{eff.w2.m1.2} = 34.98 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w2.m1.2} := b_{w2.2} - z_{Tc2} + 0.6 \cdot b_{eff.w2.m1.2} = 105 \text{ mm}$$

Pozn.: Pro další výpočet je  $b_{e2.w2.m1.2}$  uvažována jako efektivní šířka včetně tažené části.

### 6.2.5. Účinky boulení - stojina část $w_3$

Hodnota napětí v průřezu je rovna hodnotě napětí v horních vláknech tlačенého průřezu stojiny  $w_2$ .

$$\sigma_{com.Ed.w3.m1.2} := \sigma_{w2.tah.2} = 219.34 \text{ MPa}$$

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí pro rovnoměrné rozdělení napětí

$$\psi_{w3.m1.2} := 1.0 \quad \rightarrow \quad k_{\sigma.w3.m1.2} := 4.0$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{p.w3.red.m1.2} := \lambda'_{p.w3.2} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{com.Ed.w3.m1.2}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 1.24 > 0.673$$

Redukční součinitel, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w3.m1.2} := \frac{\lambda'_{p.w3.red.m1.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w3.m1.2})}{\lambda'_{p.w3.red.m1.2}^2} = 0.665$$

Celý průřez je účinný, pro účely výpočtu se průřez rozdělí na dvě účinné části

$$b_{eff.w3.m1.2} := \rho_{w3.m1.2} \cdot b_{w3.2} = 106.34 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.m1.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w3.m1.2} = 53.17 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.m1.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w3.m1.2} = 53.17 \text{ mm}$$

### 6.2.6. Distorzní vybočení - pásnice

Pásnice se nachází v tažené i tlačené části. K lokálnímu boulení nedojde, jak bylo výpočtem ověřeno a lze předpokládat, že v tlačené části k distorznímu vybočení též nedojde, jelikož je průřez pásnice plně účinný a její tloušťka není redukována.

$$t_{red.f.m1.2} := t_2 = 2.2 \text{ mm}$$

### 6.2.7. Distorzní vybočení - stojina

Účinná průřezová plocha

$$A_{1.w.m1.2} := b_{e2.w1.m1.2} \cdot t_2 = 105.99 \text{ mm}^2$$

$$A_{2a.w.m1.2} := b_{e1.w2.m1.2} \cdot t_2 = 51.31 \text{ mm}^2$$

$$A_{2b.w.m1.2} := b_{e2.w2.m1.2} \cdot t_2 = 231 \text{ mm}^2$$

$$A_{3.w.m1.2} := b_{e2.w3.m1.2} \cdot t_2 = 116.97 \text{ mm}^2$$

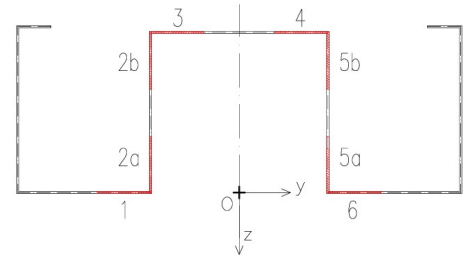
$$A_{4.w.m1.2} := A_{3.w.m1.2} = 116.97 \text{ mm}^2$$

$$A_{5a.w.m1.2} := A_{2a.w.m1.2} = 51.31 \text{ mm}^2$$

$$A_{5b.w.m1.2} := A_{2b.w.m1.2} = 231 \text{ mm}^2$$

$$A_{6.w.m1.2} := A_{1.w.m1.2} = 105.99 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.w.m1.2} := 2 \cdot (A_{1.w.m1.2} + A_{2a.w.m1.2} + A_{2b.w.m1.2} + A_{3.w.m1.2}) = 1010.54 \text{ mm}^2$$



Těžiště účinné části průřezu

$$y_{1.w.m1.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2} + \frac{b_{e2.w1.m1.2}}{2}\right)$$

$$z_{1.w.m1.2} := 0 \text{ mm}$$

$$y_{2a.w.m1.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2}\right)$$

$$z_{2a.w.m1.2} := -\left(\frac{b_{e1.w2.m1.2}}{2}\right)$$

$$y_{2b.w.m1.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2}\right)$$

$$z_{2b.w.m1.2} := -\left(b_{w2.2} - \frac{b_{e2.w2.m1.2}}{2}\right)$$

$$y_{3.w.m1.2} := -\left(\frac{b_{w3.2}}{2} - \frac{b_{e2.w3.m1.2}}{2}\right)$$

$$z_{3.w.m1.2} := -b_{w2.2} = -145 \text{ mm}$$

$$y_{4.w.m1.2} := -y_{3.w.m1.2} = 53.41 \text{ mm}$$

$$z_{4.w.m1.2} := z_{3.w.m1.2} = -145 \text{ mm}$$

$$y_{5a.w.m1.2} := -y_{2a.w.m1.2} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{5a.w.m1.2} := z_{2a.w.m1.2} = -11.66 \text{ mm}$$

$$y_{5b.w.m1.2} := -y_{2b.w.m1.2} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{5b.w.m1.2} := z_{2b.w.m1.2} = -92.5 \text{ mm}$$

$$y_{6.w.m1.2} := -y_{1.w.m1.2} = 104.09 \text{ mm}$$

$$z_{6.w.m1.2} := z_{1.w.m1.2} = 0 \text{ mm}$$

$$Ay_{1.m1.2} := A_{1.w.m1.2} \cdot y_{1.w.m1.2}$$

$$Az_{1.m1.2} := A_{1.w.m1.2} \cdot z_{1.w.m1.2}$$

$$Ay_{2a.m1.2} := A_{2a.w.m1.2} \cdot y_{2a.w.m1.2}$$

$$Az_{2a.m1.2} := A_{2a.w.m1.2} \cdot z_{2a.w.m1.2}$$

$$Ay_{2b.m1.2} := A_{2b.w.m1.2} \cdot y_{2b.w.m1.2}$$

$$Az_{2b.m1.2} := A_{2b.w.m1.2} \cdot z_{2b.w.m1.2}$$

$$Ay_{3.m1.2} := A_{3.w.m1.2} \cdot y_{3.w.m1.2}$$

$$Az_{3.m1.2} := A_{3.w.m1.2} \cdot z_{3.w.m1.2}$$

$$Ay_{4.m1.2} := A_{4.w.m1.2} \cdot y_{4.w.m1.2}$$

$$Az_{4.m1.2} := A_{4.w.m1.2} \cdot z_{4.w.m1.2}$$

$$Ay_{5a.m1.2} := A_{5a.w.m1.2} \cdot y_{5a.w.m1.2}$$

$$Az_{5a.m1.2} := A_{5a.w.m1.2} \cdot z_{5a.w.m1.2}$$

$$Ay_{5b.m1.2} := A_{5b.w.m1.2} \cdot y_{5b.w.m1.2}$$

$$Az_{5b.m1.2} := A_{5b.w.m1.2} \cdot z_{5b.w.m1.2}$$

$$Ay_{6.m1.2} := A_{6.w.m1.2} \cdot y_{6.w.m1.2}$$

$$Az_{6.m1.2} := A_{6.w.m1.2} \cdot z_{6.w.m1.2}$$

$$Ay_{m1.123} := Ay_{1.m1.2} + Ay_{2a.m1.2} + Ay_{2b.m1.2} + Ay_{3.m1.2}$$

$$Ay_{m1.456} := Ay_{4.m1.2} + Ay_{5a.m1.2} + Ay_{5b.m1.2} + Ay_{6.m1.2}$$

$$Az_{m1.123} := Az_{1.m1.2} + Az_{2a.m1.2} + Az_{2b.m1.2} + Az_{3.m1.2}$$

$$Az_{m1.456} := Az_{4.m1.2} + Az_{5a.m1.2} + Az_{5b.m1.2} + Az_{6.m1.2}$$

$$y_{c.w.m1.2} := \frac{Ay_{m1.123} + Ay_{m1.456}}{A_{s.w.m1.2}}$$

$$z_{c.w.m1.2} := \frac{Az_{m1.123} + Az_{m1.456}}{A_{s.w.m1.2}}$$

$$\text{Těžiště } T_{c.w.m1.2} : \quad y_{c.w.m1.2} = 0 \text{ mm} \quad z_{c.w.m1.2} = -77.04 \text{ mm}$$

### Moment setrvačnosti

$$I_{s1.w.m1.2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w1.m1.2} \cdot t_2^3 + b_{e2.w1.m1.2} \cdot t_2 \cdot (z_{1.w.m1.2} - z_{c.w.m1.2})^2$$

$$I_{s2a.w.m1.2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot b_{e1.w2.m1.2}^3 + t_2 \cdot b_{e1.w2.m1.2} \cdot (z_{2a.w.m1.2} - z_{c.w.m1.2})^2$$

$$I_{s2b.w.m1.2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot b_{e2.w2.m1.2}^3 + t_2 \cdot b_{e2.w2.m1.2} \cdot (z_{2b.w.m1.2} - z_{c.w.m1.2})^2$$

$$I_{s3.w.m1.2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w3.m1.2} \cdot t_2^3 + b_{e2.w3.m1.2} \cdot t_2 \cdot (z_{3.w.m1.2} - z_{c.w.m1.2})^2$$

$$I_{s4.w.m1.2} := I_{s3.w.m1.2} = 540265.21 \text{ mm}^4$$

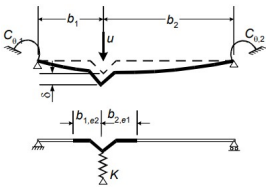
$$I_{s5a.w.m1.2} := I_{s2a.w.m1.2} = 221649.77 \text{ mm}^4$$

$$I_{s5b.w.m1.2} := I_{s2b.w.m1.2} = 267431.26 \text{ mm}^4$$

$$I_{s6.w.m1.2} := I_{s1.w.m1.2} = 629123.4 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.w.m1.2} := 2 \cdot (I_{s1.w.m1.2} + I_{s2a.w.m1.2} + I_{s2b.w.m1.2} + I_{s3.w.m1.2}) = 3316939.3 \text{ mm}^4$$

### Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)



$$b_{1.w.m1.2} := \frac{b_{w3.2}}{2} = 80 \text{ mm} \quad u = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$b_{2.w.m1.2} := b_{1.w.2} = 80 \text{ mm} \quad \nu = 0.3$$

$$\delta_{w.m1.2} := \frac{u \cdot b_{1.w.m1.2}^2 \cdot b_{2.w.m1.2}^2}{3 \cdot (b_{1.w.m1.2} + b_{2.w.m1.2})} \cdot \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot t_2^3} = 0.42 \text{ mm}$$

$$K_{w.m1.2} := \frac{u}{\delta_{w.m1.2}} = 2.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

### Pružné kritické napětí pro vybočení

$$\sigma_{cr.s.w.m1.2} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{w.m1.2} \cdot E \cdot I_{s.w.m1.2}}}{A_{s.w.m1.2}} = 2558.74 \text{ MPa}$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{d.w.m1.2} := \sqrt[2]{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.w.m1.2}}} = 0.303$$

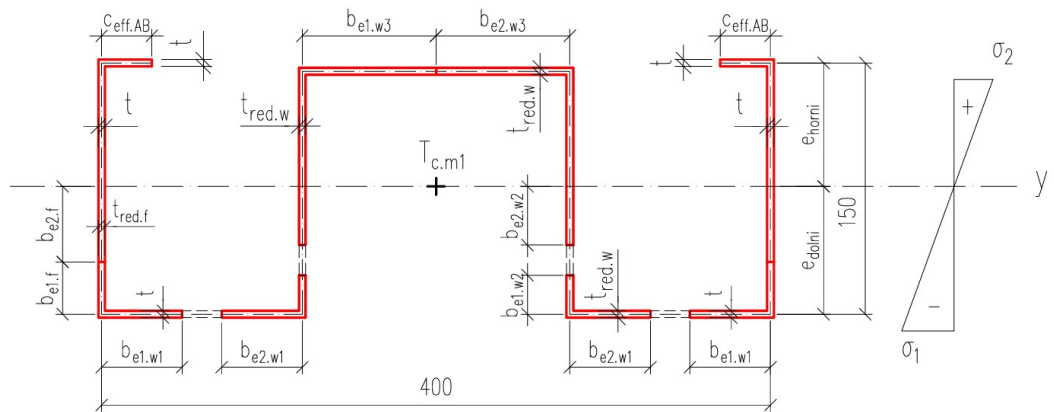
Redukční součinitel pro distorzní vybočení, kdy:  $\lambda'_d < 0.65$

$$\chi_{d.w.m1.2} := 1.0$$

Redukovaná účinná plocha a tloušťka vnitřní výztuhy

$$A_{s.red.w.m1.2} := \chi_{d.w.m1.2} \cdot A_{s.w.m1.2} = 1010.54 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.w.m1.2} := t_2 \cdot \frac{A_{s.red.w.m1.2}}{A_{s.w.m1.2}} = 2.2 \text{ mm}$$



Obrázek 13 – Účinný průřez při kladném ohybovém momentu, profil 2

$$b_{e1.f.m1.2} = 29.99 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w2.m1.2} = 23.32 \text{ mm}$$

$$t_{red.f.m1.2} = 2.2 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f.m1.2} = 44.99 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w2.m1.2} = 34.98 \text{ mm}$$

$$t_{red.w.m1.2} = 2.2 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1.m1.2} = 48.18 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.m1.2} = 53.17 \text{ mm}$$

$$c_{eff.AB.m1.2} = 50 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.m1.2} = 48.18 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.m1.2} = 53.17 \text{ mm}$$

Posunutě těžiště a moment setrvačnosti efektivního průřezu

$$z_{Tc.m1.2} := 76.27 \text{ mm}$$

$$I_{y,eff.m1.2} := 6985369.7 \text{ mm}^4$$

Efektivní plocha účinného průřezu

$$A_{eff.m1.2} := A_{s.red.w.m1.2} + t_2 \cdot 2 \cdot (c_{eff.AB.m1.2} + b_{e1.f.m1.2} + b_{e2.f.m1.2} + b_{e1.w1.m1.2})$$

$$A_{eff.m1.2} = 2102.51 \text{ mm}^2$$

Průřezový modul účinného průřezu

$$e_{dolni.m1.2} := z_{Tc.m1.2} = 76.27 \text{ mm}$$

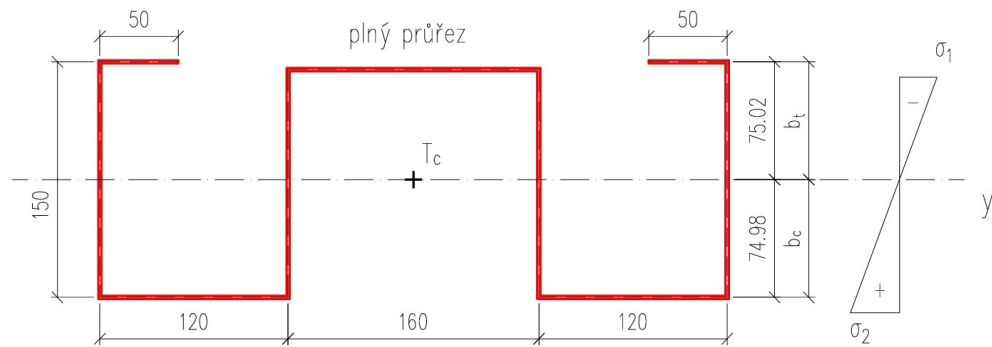
$$e_{horni.m1.2} := h_1 - e_{dolni.m1.2} = 73.73 \text{ mm}$$

$$e_{y.m1.2} := \max(e_{dolni.m1.2}, e_{horni.m1.2}) = 76.27 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff.m1.2} := \frac{I_{y,eff.m1.2}}{e_{y.m1.2}} = 91587.38 \text{ mm}^3$$



### 6.3. ÚČINNÝ PRŮŘEZ PŘI ZÁPORNÉM MOMENTU KOLEM OSY Y



Obrázek 14 – Plně účinný průřez při záporném momentu, profil 2

#### 6.3.1. Lokální boulení - výztuha AB

Okrajová výztuha se nachází v tlacené části průřezu a jelikož má větší rozměr, je nutno zjistit, zda bude po celé své šířce účinná či nikoliv.

$$b_{p.c2} = 50 \text{ mm} \quad b_{p.AB2} := h_1 = 0.15 \text{ m} \quad \psi_{AB.m2.2} := 1.0$$

$$\frac{b_{p.c2}}{b_{p.AB2}} = 0.33 \leq 0.35 \rightarrow k_{\sigma.AB.m2.2} := 0.5$$

Poměrná štíhlost

$$b_{AB2} := AB_2 = 50 \text{ mm}$$

$$\lambda'_{p.AB.m2.2} := \frac{\frac{b_{AB2}}{t_2}}{28.4 \cdot \varepsilon^2 \sqrt{k_{\sigma.AB.m2.2}}} = 1.132$$

Redukční součinitel pro jednostranně podepřené stěny, kdy:  $\lambda'_p > 0.748$

$$\rho_{AB.m2.2} := \frac{\lambda'_{p.AB.m2.2} - 0.188}{\lambda'_{p.AB.m2.2}{}^2}$$

Účinná šířka pro jednoduchou výztuhu

$$c_{eff.AB.m2.2} := \rho_{AB.m2.2} \cdot b_{p.c2} = 36.84 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{výztuha boulí}$$

#### 6.3.2. Účinky boulení - pásnice

$$b_{t.f.m2.2} := z_{Tc2} = 74.98 \text{ mm} \quad b_{c.f.m2.2} := h_1 - b_{t.f.m2.2} = 75.02 \text{ mm}$$

Poměr koncových napětí

$$b_{f.m2.2} := h_1$$

$$\psi_{f.m2.2} := \frac{b_{t.f.m2.2}}{-b_{c.f.m2.2}} = -0.999$$

Součinitel kritického napětí pro:  $0 > \psi > -1$

$$k_{\sigma f.m2.2} := 5.98 \cdot (1 - \psi_{f.m2.2})^2 = 23.91$$

Poměrná štíhlost pásnice

$$\lambda'_{p.f.m2.2} := \frac{\frac{b_{f.m2.2}}{t_2}}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma f.m2.2}}} = 0.491 < 0.673$$

Redukční součinitel pro oboustranně podepřené stěny, kdy:  $\lambda'_{p.f.m2} < 0.673$

$$\rho_{p.f.m2.2} := 1.0 \rightarrow \text{pásnice neboulí}$$

Účinná šířka tlačené části pásnice

$$b_{eff.f.m2.2} := \rho_{p.f.m2.2} \cdot b_{c.f.m2.2} = 75.02 \text{ mm}$$

$$b_{e1.f.m2.2} := 0.6 \cdot b_{eff.f.m2.2} = 45.01 \text{ mm}$$

$$b_{e1.f.m2.2} := z_{Tc2} + 0.6 \cdot b_{eff.f.m2.2} = 119.99 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f.m2.2} := 0.4 \cdot b_{eff.f.m2.2} = 30.01 \text{ mm}$$

### 6.3.3. Účinky boulení - stojina část $w_1$

Celá část stojiny je v tažené části průřezu, k redukci účinného průřezu nedochází.

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí pro rovnoměrné rozdělení napětí

$$\psi_{w1.m2.2} := 1.0 \rightarrow k_{\sigma.w1.m2.2} := 4.0$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{p.w1.m1.2} := \frac{\frac{b_{w1.2}}{t_2}}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_{\sigma.w1.m2.2}}} = 0.96 > 0.673$$

Redukční součinitel boulení, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w1.m2.2} := 1.0 \rightarrow \text{část stojiny neboulí}$$

Redukovaná účinná šířka stojiny

$$b_{eff.w1.m2.2} := \rho_{w1.m2.2} \cdot b_{w1.2} = 0.12 \text{ m}$$

$$b_{e1.w1.m2.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.m2.2} = 60 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.m2.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w1.m2.2} = 60 \text{ mm}$$

### 6.3.4. Účinky boulení - stojina část $w_2$

Hodnota napětí ve spodních tlačných vláknech je rovna hodnotě napětí u průřezu pásnice  $\sigma_{com.Ed.w1}$  a napětí v horních vláknech  $\sigma_{com.Ed.w2}$  bude dopočteno.

$$b_{t.f.m2.2} = 74.98 \text{ mm}$$

$$b_{c.f.m2.2} = 75.02 \text{ mm}$$

$$b_{t.w2.m2.2} := z_{Tc2} = 74.98 \text{ mm}$$

$$b_{c.w2.m2.2} := b_{w2.2} - z_{Tc2} = 70.02 \text{ mm}$$

$$\sigma_{f.m2.tlak.2} := -f_y = -235 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f.m2.tah.2} := \sigma_{f.m2.tlak.2} \cdot \left( \frac{-z_{Tc2}}{h_1 - z_{Tc2}} \right) = 234.87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{w1.m2.tah.2} := \sigma_{f.m2.tah.2} = 234.87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{w2.m2.tah.2} := \sigma_{w1.m2.tah.2} = 234.87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{w2.m2.tlak.2} := \sigma_{w2.m2.tah.2} \cdot \left( -\frac{b_{w2.2} - z_{Tc2}}{z_{Tc2}} \right) = -219.34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{com.Ed.w2.m2.2} := \max(|\sigma_{w2.m2.tah.2}|, |\sigma_{w2.m2.tlak.2}|) = 234.87 \text{ MPa}$$

Poměr koncových napětí

$$\psi_{w2.m2.2} := \frac{\sigma_{w2.m2.tlak.2}}{\sigma_{w2.m2.tah.2}} = -0.9338 \rightarrow 0 > \psi > -1$$

Součinitel kritického napětí

$$k_{\sigma.w2.m2.2} := 5.98 \cdot (1 - \psi_{w2.m2.2})^2 = 22.36$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{p.w2.2} = 1.16$$

$$\lambda'_{p.w2.red.m2.2} := \lambda'_{p.w2.2} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{com.Ed.w2.m2.2}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 1.16 > 0.673$$

Redukční součinitel boulení, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w2.m2.2} := \frac{\lambda'_{p.w2.red.m2.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w2.m2.2})}{\lambda'_{p.w2.red.m2.2}^2} = 0.778 \rightarrow \text{část stojiny } w_2 \text{ boulí}$$

Účinné šířky

$$b_{eff.w2.m2.2} := \rho_{w2.m2.2} \cdot \frac{b_{w2.2}}{1 - \psi_{w2.m2.2}} = 58.3 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w2.m2.2} := 0.6 \cdot b_{eff.w2.m2.2} = 34.98 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w2.m2.2} := z_{Tc2} + 0.6 \cdot b_{eff.w2.m2.2} = 109.96 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w2.m2.2} := 0.4 \cdot b_{eff.w2.m2.2} = 23.32 \text{ mm}$$

### 6.3.5. Účinky boulení - stojina část $w_3$

Hodnota napětí v průřezu je rovna hodnotě napětí v horních vláknech tlačného průřezu stojiny  $w_2$ .

$$\sigma_{com.Ed.w3.m2.2} := \sigma_{w2.m2.tlak.2} = -219.34 \text{ MPa}$$

Poměr koncových napětí a součinitel kritického napětí pro rovnoměrné rozdělení napětí

$$\psi_{w3.m2.2} := 1.0 \rightarrow k_{\sigma.w3.m2.2} := 4.0$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{p.w3\_red.m2.2} := \lambda'_{p.w3.2} \cdot \sqrt{\frac{|\sigma_{com.Ed.w3.m2.2}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}} = 1.24 > 0.673$$

Redukční součinitel boulení, kdy:  $\lambda'_p > 0.673$

$$\rho_{w3.m2.2} := \frac{\lambda'_{p.w3\_red.m2.2} - 0.055 \cdot (3 + \psi_{w3.m2.2})}{\lambda'_{p.w3\_red.m2.2}^2} = 0.665 \rightarrow \text{část stojiny } w_3 \text{ boulí}$$

Redukovaná účinná šířka stojiny

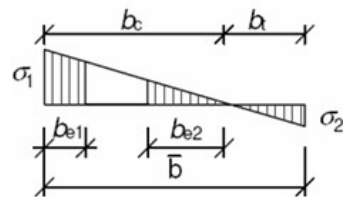
$$b_{eff.w3.m2.2} := \rho_{w3.m2.2} \cdot b_{w3.2} = 106.34 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.m2.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w3.m2.2} = 53.17 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.m2.2} := 0.5 \cdot b_{eff.w3.m2.2} = 53.17 \text{ mm}$$

### 5.3.6. Distorzní vybočení - pásnice

Pásnice se nachází v tažené i tlačené části. K lokálnímu boulení nedojde, jak bylo výpočtem ověřeno, ovšem může nastat distorzní vybočení v tlačené části. Účinná šířka a efektivní šířky pásnice se stanoví ČSN EN 1993-1-5, Tabulka 4.1



$\psi < 0$ :

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$$

Účinná průřezová plocha

$$A_{1.f.m2.2} := b_{e2.f.m2.2} \cdot t_2 = 66.02 \text{ mm}^2$$

$$A_{2.f.m2.2} := c_{eff.AB.m2.2} \cdot t_2 = 81.05 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.f.m2.2} := A_{1.f.m2.2} + A_{2.f.m2.2} = 147.07 \text{ mm}^2$$

Těžiště účinné části průřezu

$$y_{1.f.m2.2} := \frac{b_{e2.f.m2.2}}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$z_{1.f.m2.2} := 0 \text{ mm}$$

$$y_{2.f.m2.2} := b_{e2.f.m2.2} = 30.01 \text{ mm}$$

$$z_{2.f.m2.2} := \frac{c_{eff.AB.m2.2}}{2} = 18.42 \text{ mm}$$

$$y_{c.f.m2.2} := \frac{A_{1.f.m2.2} \cdot y_{1.f.m2.2} + A_{2.f.m2.2} \cdot y_{2.f.m2.2}}{A_{s.f.m2.2}} = 23.27 \text{ mm}$$

$$z_{c.f.m2.2} := \frac{A_{1.f.m2.2} \cdot z_{1.f.m2.2} + A_{2.f.m2.2} \cdot z_{2.f.m2.2}}{A_{s.f.m2.2}} = 10.15 \text{ mm}$$

## Moment setrvačnosti

$$I_{s1.f.m2.2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.f.m2.2} \cdot t_2^3 + b_{e2.f.m2.2} \cdot t_2 \cdot (z_{c.f.m2.2} - z_{1.f.m2.2})^2$$

$$I_{s2.f.m2.2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot c_{eff.AB.m2.2}^3 + t_2 \cdot c_{eff.AB.m2.2} \cdot (z_{2.f.m2.2} - z_{c.f.m2.2})^2$$

$$I_{s.f.m2.2} := I_{s1.f.m2.2} + I_{s2.f.m2.2} = 21539 \text{ mm}^4$$

## Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)

Pozn. Výpočet bude obdobný jako výpočet u průřezu v tahu s jednotkovým zatížením 1 kN/m.

$$u = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \nu = 0.3 \quad I_{f.m2.2} := \frac{1}{12} \cdot \frac{t_2^3}{(1 - \nu^2)} = 0.98 \text{ mm}^3$$

$$M_{124.m2.2} := \left( \frac{1}{3} \cdot h_1^2 \cdot h_1 + h_1^2 \cdot b_{w1.2} + (h_1 - CD_2)^2 \cdot \frac{b_{w3.2}}{2} \right)$$

$$M_{3.m2.2} := \left( \frac{1}{6} \left( h_1 \cdot (2 \cdot h_1 + (h_1 - CD_2)) + (h_1 - CD_2) \cdot (h_1 + 2 \cdot (h_1 - CD_2)) \right) \right) \cdot CD_2$$

$$\delta_{f.m2.2} := \left( \frac{1}{E \cdot I_{f.m2.2}} \cdot (M_{124.m2.2} + M_{3.m2.2}) \cdot \text{kN} \right) \cdot \frac{1}{\text{m}} = 24.18 \text{ mm}$$

$$K_{f.m2.2} := \frac{u}{\delta_{f.m2.2}} = 0.041 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## Pružné kritické napětí pro vybočení

$$\sigma_{cr.s.f.m2.2} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{f.m2.2} \cdot E \cdot I_{s.f.m2.2}}}{A_{s.f.m2.2}} = 185.99 \text{ MPa}$$

## Poměrná štíhlost

$$\lambda'_{d.f.m2.2} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.f.m2.2}}} = 1.12$$

Redukční součinitel vzpěrnosti pro distorzní vybočení, kdy:  $0.65 < \lambda'_d < 1.38$

$$\chi_{d.f.m2.2} := 1.47 - 0.723 \cdot \lambda'_{d.f.m2.2} = 0.66 < 1.0$$

## Redukovaná účinná plocha a tloušťka

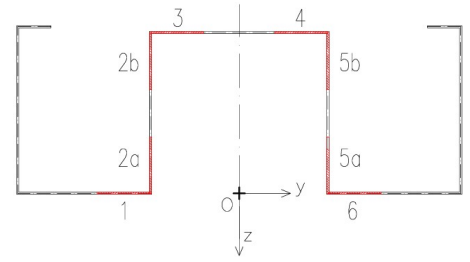
$$A_{s.red.f.m2.2} := \chi_{d.f.m2.2} \cdot A_{s.f.m2.2} = 96.67 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.f.m2.2} := t_2 \cdot \frac{A_{s.red.f.m2.2}}{A_{s.f.m2.2}} = 1.45 \text{ mm}$$

### 6.3.7. Distorzní vybočení - stojina

Účinná průřezová plocha

$$\begin{aligned} A_{1.w.m2.2} &:= b_{e2.w1.m2.2} \cdot t_2 = 132 \text{ mm}^2 \\ A_{2a.w.m2.2} &:= b_{e1.w2.m2.2} \cdot t_2 = 241.92 \text{ mm}^2 \\ A_{2b.w.m2.2} &:= b_{e2.w2.m2.2} \cdot t_2 = 51.31 \text{ mm}^2 \\ A_{3.w.m2.2} &:= b_{e2.w3.m2.2} \cdot t_2 = 116.97 \text{ mm}^2 \\ A_{4.w.m2.2} &:= A_{3.w.m2.2} = 116.97 \text{ mm}^2 \\ A_{5a.w.m2.2} &:= A_{2a.w.m2.2} = 241.92 \text{ mm}^2 \\ A_{5b.w.m2.2} &:= A_{2b.w.m2.2} = 51.31 \text{ mm}^2 \\ A_{6.w.m2.2} &:= A_{1.w.m2.2} = 132 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



$$A_{s.w.m2.2} := 2 \cdot (A_{1.w.m2.2} + A_{2a.w.m2.2} + A_{2b.w.m2.2} + A_{3.w.m2.2}) = 1084.39 \text{ mm}^2$$

Těžiště účinné části průřezu

$$\begin{aligned} y_{1.w.m2.2} &:= -\left(\frac{b_{w3.2}}{2} + \frac{b_{e2.w1.m2.2}}{2}\right) \\ y_{2a.w.m2.2} &:= \frac{b_{w3.2}}{2} \\ y_{2b.w.m2.2} &:= -\frac{b_{w3.2}}{2} \\ y_{3.w.m2.2} &:= -\left(\frac{b_{w3.2}}{2} - \frac{b_{e1.w3.m2.2}}{2}\right) \end{aligned}$$

$$z_{1.w.m2.2} := 0 \text{ mm}$$

$$z_{2a.w.m2.2} := \frac{b_{e1.w2.m2.2}}{2}$$

$$z_{2b.w.m2.2} := -\left(b_{w2.2} - \frac{b_{e2.w2.m2.2}}{2}\right)$$

$$z_{3.w.m2.2} := -b_{w2.2} = -145 \text{ mm}$$

$$y_{4.w.m2.2} := -y_{3.w.m2.2} = 53.41 \text{ mm}$$

$$z_{4.w.m2.2} := z_{3.w.m2.2} = -145 \text{ mm}$$

$$y_{5a.w.m2.2} := -y_{2a.w.m2.2} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{5a.w.m2.2} := z_{2a.w.m2.2} = -54.98 \text{ mm}$$

$$y_{5b.w.m2.2} := -y_{2b.w.m2.2} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{5b.w.m2.2} := z_{2b.w.m2.2} = -133.34 \text{ mm}$$

$$y_{6.w.m2.2} := -y_{1.w.m2.2} = 110 \text{ mm}$$

$$z_{6.w.m2.2} := z_{1.w.m2.2} = 0 \text{ mm}$$

$$Ay_{1.m2.2} := A_{1.w.m2.2} \cdot y_{1.w.m2.2}$$

$$Az_{1.m2.2} := A_{1.w.m2.2} \cdot z_{1.w.m2.2}$$

$$Ay_{2a.m2.2} := A_{2a.w.m2.2} \cdot y_{2a.w.m2.2}$$

$$Az_{2a.m2.2} := A_{2a.w.m2.2} \cdot z_{2a.w.m2.2}$$

$$Ay_{2b.m2.2} := A_{2b.w.m2.2} \cdot y_{2b.w.m2.2}$$

$$Az_{2b.m2.2} := A_{2b.w.m2.2} \cdot z_{2b.w.m2.2}$$

$$Ay_{3.m2.2} := A_{3.w.m2.2} \cdot y_{3.w.m2.2}$$

$$Az_{3.m2.2} := A_{3.w.m2.2} \cdot z_{3.w.m2.2}$$

$$Ay_{4.m2.2} := A_{4.w.m2.2} \cdot y_{4.w.m2.2}$$

$$Az_{4.m2.2} := A_{4.w.m2.2} \cdot z_{4.w.m2.2}$$

$$Ay_{5a.m2.2} := A_{5a.w.m2.2} \cdot y_{5a.w.m2.2}$$

$$Az_{5a.m2.2} := A_{5a.w.m2.2} \cdot z_{5a.w.m2.2}$$

$$Ay_{5b.m2.2} := A_{5b.w.m2.2} \cdot y_{5b.w.m2.2}$$

$$Az_{5b.m2.2} := A_{5b.w.m2.2} \cdot z_{5b.w.m2.2}$$

$$Ay_{6.m2.2} := A_{6.w.m2.2} \cdot y_{6.w.m2.2}$$

$$Az_{6.m2.2} := A_{6.w.m2.2} \cdot z_{6.w.m2.2}$$

$$Ay_{m2.123} := Ay_{1.m2.2} + Ay_{2a.m2.2} + Ay_{2b.m2.2} + Ay_{3.m2.2}$$

$$Ay_{m2.456} := Ay_{4.m2.2} + Ay_{5a.m2.2} + Ay_{5b.m2.2} + Ay_{6.m2.2}$$

$$Az_{m2.123} := Az_{1.m2.2} + Az_{2a.m2.2} + Az_{2b.m2.2} + Az_{3.m2.2}$$

$$Az_{m2.456} := Az_{4.m2.2} + Az_{5a.m2.2} + Az_{5b.m2.2} + Az_{6.m2.2}$$

$$y_{c.w.m2.2} := \frac{Ay_{m2.123} + Ay_{m2.456}}{A_{s.w.m2.2}}$$

$$z_{c.w.m2.2} := \frac{Az_{m2.123} + Az_{m2.456}}{A_{s.w.m2.2}}$$

$$\text{Těžiště } T_{c.w.m2.2} : \quad y_{c.w.m2.2} = 0 \text{ mm}$$

$$z_{c.w.m2.2} = -68.43 \text{ mm}$$

## Moment setrvačnosti

$$I_{s1.w.m2.2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e2.w1.m2.2} \cdot t_2^3 + b_{e2.w1.m2.2} \cdot t_2 \cdot (z_{1.w.m2.2} - z_{c.w.m2.2})^2$$

$$I_{s2a.w.m2.2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot b_{e1.w2.m2.2}^3 + t_2 \cdot b_{e1.w2.m2.2} \cdot (z_{2a.w.m2.2} - z_{c.w.m2.2})^2$$

$$I_{s2b.w.m2.2} := \frac{1}{12} \cdot t_2 \cdot b_{e2.w2.m2.2}^3 + t_2 \cdot b_{e2.w2.m2.2} \cdot (z_{2b.w.m2.2} - z_{c.w.m2.2})^2$$

$$I_{s3.w.m2.2} := \frac{1}{12} \cdot b_{e1.w3.m2.2} \cdot t_2^3 + b_{e1.w3.m2.2} \cdot t_2 \cdot (z_{3.w.m2.2} - z_{c.w.m2.2})^2$$

$$I_{s4.w.m2.2} := I_{s3.w.m2.2} = 685842.73 \text{ mm}^4$$

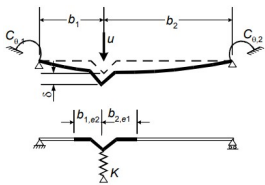
$$I_{s5a.w.m2.2} := I_{s2a.w.m2.2} = 287528.66 \text{ mm}^4$$

$$I_{s5b.w.m2.2} := I_{s2b.w.m2.2} = 218482.9 \text{ mm}^4$$

$$I_{s6.w.m2.2} := I_{s1.w.m2.2} = 618189.61 \text{ mm}^4$$

$$I_{s.w.m2.2} := 2 \cdot (I_{s1.w.m2.2} + I_{s2a.w.m2.2} + I_{s2b.w.m2.2} + I_{s3.w.m2.2}) = 3620087.8 \text{ mm}^4$$

## Pérová tuhost K (výpočet na jednotku délky)



$$b_{1.w.m2.2} := \frac{b_{w3.2}}{2} = 80 \text{ mm} \quad u = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$b_{2.w.m2.2} := b_{1.w.2} = 80 \text{ mm} \quad \nu = 0.3$$

$$\delta_{w.m2.2} := \frac{u \cdot b_{1.w.m2.2}^2 \cdot b_{2.w.m2.2}^2}{3 \cdot (b_{1.w.m2.2} + b_{2.w.m2.2})} \cdot \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot t_2^3} = 0.42 \text{ mm}$$

$$K_{w.m2.2} := \frac{u}{\delta_{w.m2.2}} = 2.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## Pružné kritické napětí pro vybočení

$$\sigma_{cr.s.w.m2.2} := \frac{2 \cdot \sqrt{K_{w.m2.2} \cdot E \cdot I_{s.w.m2.2}}}{A_{s.w.m2.2}} = 2491.06 \text{ MPa}$$

## Štíhlosti dílčích částí stojiny

$$\lambda'_{d.w.m2.2} := \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr.s.w.m2.2}}} = 0.307$$

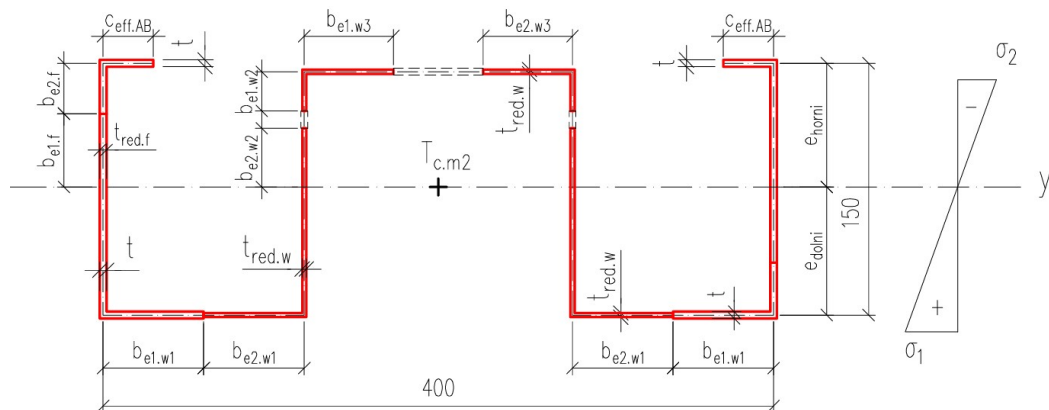
Redukční součinitel pro distorzní vybočení, kdy:  $\lambda'_d < 0.65$

$$\chi_{d.w.m2.2} := 1.0$$

## Redukovaná účinná plocha a tloušťka vnitřní výztuhy

$$A_{s.red.w.m2.2} := \chi_{d.w.m2.2} \cdot A_{s.w.m2.2} = 1084.39 \text{ mm}^2$$

$$t_{red.w.m2.2} := t_2 \cdot \frac{A_{s.red.w.m2.2}}{A_{s.w.m2.2}} = 2.2 \text{ mm}$$



Obrázek 15 – Účinný průřez při záporném ohybovém momentu, profil 2

$$b_{e1.f.m2.2} = 119.99 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w2.m2.2} = 34.98 \text{ mm}$$

$$t_{red.f.m2.2} = 1.45 \text{ mm}$$

$$b_{e2.f.m2.2} = 30.01 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w2.m2.2} = 23.32 \text{ mm}$$

$$t_{red.w.m2.2} = 2.2 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w1.m2.2} = 60 \text{ mm}$$

$$b_{e1.w3.m2.2} = 53.17 \text{ mm}$$

$$C_{eff.AB.m2.2} = 36.84 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w1.m2.2} = 60 \text{ mm}$$

$$b_{e2.w3.m2.2} = 53.17 \text{ mm}$$

Posunutě těžiště a moment setrvačnosti efektivního průřezu

$$z_{Tc.m2.2} := 64.50 \text{ mm}$$

$$I_{y.eff.m2.2} := 6596119.3 \text{ mm}^4$$

Efektivní plocha účinného průřezu

$$A_{eff.m2.1} := A_{s.red.w.m2.2} + t_{red.f.m2.2} \cdot 2 \cdot (C_{eff.AB.m2.2} + b_{e2.f.m2.2})$$

$$A_{eff.m2.2} := 2 \cdot t_2 \cdot (b_{e1.f.m2.2} + b_{e1.w1.m2.2})$$

$$A_{eff.m2.2} := A_{eff.m2.1} + A_{eff.m2.2} = 2069.69 \text{ mm}^2$$

Průřezový modul účinného průřezu

$$e_{dolni.m2.2} := z_{Tc.m2.2} = 64.5 \text{ mm}$$

$$e_{horni.m2.2} := h_1 - e_{dolni.m2.2} = 85.5 \text{ mm}$$

$$e_{y.m2.2} := \max(e_{dolni.m2.2}, e_{horni.m2.2}) = 85.5 \text{ mm}$$

$$W_{y.eff.m2.2} := \frac{I_{y.eff.m2.2}}{e_{y.m2.2}} = 77147.59 \text{ mm}^3$$





## 6.4. VZPĚŘ

Zvolený profil je jednoose symetrický dle osy z. Podepření profilu zabraňuje kroucení a není tedy nutno posuzovat vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr, tzn. nebude se zohledněna prostorová ztráta stability a provede se pouze posouzení rovinného vzpěru pro osu y. Pro vzpěrné síly bude uvažována křivka vzpěrnosti "b" se součinitelem imperfekce  $\alpha_b = 0.34$  a použije se systémová vzpěrná délka  $L_{cr} = 0.5 \cdot B = 1.5 \text{ m}$ .

Průřezová plocha profilu

$$A_c = 1680 \text{ mm}^2$$

Účinná plocha průřezu v tlaku

$$A_{eff.t2} = 1543.55 \text{ mm}^2$$

Poloměry setrvačnosti

$$I_{y.c.t2} = 5915064.5 \text{ mm}^4 \quad i_{y.t2} := \sqrt{\frac{I_{y.c.t2}}{A_{eff.t2}}} = 61.9 \text{ mm}$$

Poměrné štíhlosti - rovinný vzpěr pro osu y

$$L_{cr.y2} := 0.5 \cdot B = 1.5 \text{ m}$$

$$\lambda_{1y.t2} := 93.9 \cdot \varepsilon = 93.9$$

$$\lambda'_{y.t2} := \frac{L_{cr.y2}}{i_{y.t2}} \cdot \frac{\sqrt[2]{\frac{A_{eff.t2}}{A_c}}}{\lambda_{1y.t2}} = 0.207$$

Součinitel vzpěru

$$\alpha_b = 0.34$$

$$\phi_{y.t2} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_b \cdot (\lambda'_{y.t2} - 0.2) + \lambda'_{y.t2}{}^2) = 0.523$$

$$\chi_{y.t2} := \frac{1}{\phi_{y.t2} + \sqrt{\phi_{y.t2}{}^2 - \lambda'_{y.t2}{}^2}} = 0.998 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

### 6.4.2. Vzpěrnostní součinitele

Vybraný profil byl posouzen na vybočení kolmo k ose y a jelikož se neuvažuje vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr, hodnoty dílčích vzpěrnostních součinitelů se budou vyjma  $\chi_y$  rovnat 1.0.

|                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| $\chi_{y2} := \chi_{y.t2} = 0.998$ | ... vybočení ve směru osy y |
| $\chi_z = 1.0$                     | ... vybočení ve směru osy z |
| $\chi_{LT} = 1.0$                  | ... klopení                 |
| $\chi_T = 1.0$                     | ... zkroucení               |
| $\chi_{TF} = 1.0$                  | ... prostorový vzpěr        |

Rozhodující součinitel vzpěrnosti

$$\chi_2 := \min(\chi_{y.t2}, \chi_z, \chi_{LT}, \chi_T, \chi_{TF}) = 0.998$$

## 6.5. VNITŘNÍ SÍLY - POSOUZENÍ MSÚ

Vnitřní síly účinného průřezu

$$N_{Ed.2} := 36.05 \text{ kN}$$

$$M_{y.Ed.2} := 14.70 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 6.5.1. Posouzení MSÚ

Tlak

$$A_{eff.t2} = 1543.55 \text{ mm}^2$$

$$N_{b.Rd.2} := \frac{\chi_2 \cdot A_{eff.t2} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 361.83 \text{ kN} > N_{Ed.2} = 36.05 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Využití: } \frac{N_{Ed.2}}{N_{b.Rd.2}} = 0.10$$

Ohyb

$$M_{y.Rd.m1.2} := \frac{W_{y,eff.m1.2} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 21.52 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{y.Ed.2} = 14.7 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Využití: } \frac{M_{y.Ed.2}}{M_{y.Rd.m1.2}} = 0.683$$

$$M_{y.Rd.m2.2} := \frac{W_{y,eff.m2.2} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 18.13 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{y.Ed.2} = 14.7 \text{ kN} \cdot \text{m} \rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Využití: } \frac{M_{y.Ed.2}}{M_{y.Rd.m2.2}} = 0.811$$

Kombinace tlaku a ohybu

$$\Delta e_{N2} = 9.52 \text{ mm}$$

$$\Delta M_{y.Ed.2} := \Delta e_{N2} \cdot N_{Ed.2} = 0.34 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\left( \frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}} \right)^{0.8} + \left( \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{y.Rd.m1}} \right)^{0.8} \leq 1.0$$

$$\left( \frac{N_{Ed.2}}{N_{b.Rd.2}} \right)^{0.8} + \left( \frac{M_{y.Ed.2} + \Delta M_{y.Ed.2}}{M_{y.Rd.m1.2}} \right)^{0.8} = 0.909 < 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

$$\left( \frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}} \right)^{0.8} + \left( \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{y.Rd.m2}} \right)^{0.8} \leq 1.0$$

$$\left( \frac{N_{Ed.2}}{N_{b.Rd.2}} \right)^{0.8} + \left( \frac{M_{y.Ed.2} + \Delta M_{y.Ed.2}}{M_{y.Rd.m2.2}} \right)^{0.8} = 1.019 > 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

## 7. PROGRAM PRO OPTIMALIZACI PRŮŘEZU

V první fázi jsou zjištěny profily, které splňují stanovenou podmínku pro moment únosnosti. Tyto profily byly ovšem uvažovány jako plně účinné, což není zcela správně, jelikož by se při posouzení účinků boulení měly uvažovat redukované efektivní průřezové plochy profilů a jejich efektivní charakteristiky.

V dalším kroku vytvořený program na základě zadaných vstupních dat posoudí a navrhne vyhovující profily v souladu s platnými předpisy a normami. Údaji vstupující do programu jsou rozměry vyhovujících profilů z první iterace a vnitřní síly získané z výpočtového programu Scia Engineer pro optimalizovaný prvek z kapitoly 6. Výstupem z vytvořeného programu jsou seznamy profilů pro jednotlivé posuzované, z těchto seznamů jsou vypsány profily s nejnižší hmotností a následně jsou vybrány finální průřezy prvků rámové konstrukce.

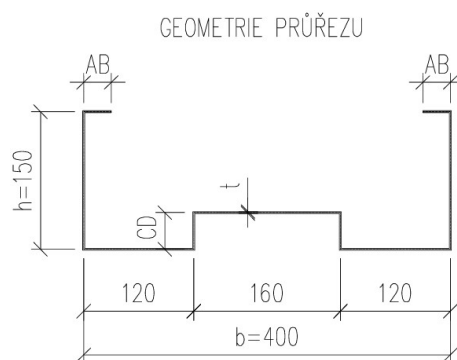
V příloze č. 3 je v tabulkách uveden výčet profilů pro horní příčel, spodní příčel a sloupy. Tabulky obsahují informace o hmotnosti profilů, rozměry proměnných AB, CD, t, efektivní průřezová plocha v tlaku, menší z hodnot momentů setrvačnosti v ohybu, jednotlivá procentuální využití a vnitřní síly z programu Scia Engineer.

### 7.1. ZHODNOCENÍ PRŮŘEZŮ

Z výsledků vyplývá, že nejvýhodnější jsou profily s vysokou vnitřní výztuhou, tzn. profily s vyšší hodnotou parametru CD. Dále je patrně vidět i závislost mezi okrajovou výztuhou a tloušťkou průřezu. U průřezu s menší hodnotou parametru AB je únosnost vykompenzována větší tloušťkou t.

### 7.2. VÝBĚR FINÁLNÍCH PRŮŘEZŮ

Zvolená geometrie finálních průřezů příčelí a sloupů se od sebe liší pouze svými tloušťkami z důvodů rozdílných zatížení. Vnitřní síly pro konečný návrh prvků jsou uvedeny v příloze č. 5



Příčel P1:  $AB_{P1} := 45 \text{ mm}$   
 $CF_{P1} := 145 \text{ mm}$   
 $t_{P1} := 2.3 \text{ mm}$

Příčel P2:  $AB_{P2} := 45 \text{ mm}$   
 $CF_{P2} := 145 \text{ mm}$   
 $t_{P2} := 2.5 \text{ mm}$

Sloup S1:  $AB_{S1} := 45 \text{ mm}$   
 $CF_{S1} := 145 \text{ mm}$   
 $t_{S1} := 2.4 \text{ mm}$

### 7.3. MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI

Prvky vyhověly na MSÚ a budou dále posouzeny na MSP.

Vodorovné a svislé posuny jsou vygenerovány programem Scia Engineer.

Kombinační klíč pro MSP

CO30/3: ZS1 + ZS2 + ZS3 + ZS4 + ZS12

### 7.3.1. Horní příčel P1

Vodorovný posun

$$u_{x,P1} := 7.4 \text{ mm} < \delta_{lim,x} = 15.67 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

Svislý posun

$$u_{z,P1} := 13.1 \text{ mm} < \delta_{lim,z} = 15.0 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

### 7.3.2. Spodní příčel P2

Vodorovný posun

$$u_{x,P2} := 7.4 < \delta_{lim,x} = 15.67 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

Svislý posun

$$u_{z,P2} := 5.4 \text{ mm} < \delta_{lim,z} = 15.0 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

### 7.3.3. Sloup S1

Vodorovný posun

$$u_{x,S1} := 7.4 \text{ mm} < \delta_{lim,x} = 15.67 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

Svislý posun

$$u_{z,S1} := 13.10 \text{ mm} < \delta_{lim,z} = 15.0 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

## 8. NÁVRH ZTUŽIDEL

### 8.1. PROFILY DIAGONÁL

Vnitřní síly

|                                 |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| $N_{Ed1.c} := 5.14 \text{ kN}$  | tlak, diagonála 1 |
| $N_{Ed2.c} := 7.39 \text{ kN}$  | tlak, diagonála 2 |
| $N_{Ed3.c} := 1.15 \text{ kN}$  | tlak, diagonála 3 |
| $N_{Ed4.t} := 43.18 \text{ kN}$ | tah, diagonála 4  |

#### RO 33.7/2.9

$$A_{diag} := 281 \text{ mm}^2$$
$$i_{diag} := 11 \text{ mm}$$

Poměrná štíhlost

$$L_{cr.y.diag} := 2.778 \text{ m}$$

$$\lambda_{1.diag} := 93.9 \cdot \sqrt{\frac{235 \cdot \text{MPa}}{f_y}} = 93.9 \quad \lambda_{diag} := \frac{L_{cr.y.diag}}{i_{diag}} = 252.55$$

$$\chi_{y.p.diag} := \frac{\lambda_{diag}}{\lambda_{1.diag}} = 2.69 \rightarrow \text{křivka "b"} \rightarrow \chi_{y.diag} := 0.125$$

Vzpěrná tlaková únosnost

$$N_{b.Rd.diag} := \chi_{y.diag} \cdot A_{diag} \cdot f_y = 8.25 \text{ kN} \geq N_{Ed2.c} = 7.39 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

### 8.2. PROFIL VODOROVNÝ

Vnitřní síly

$$N_{Ed5.c} := 19.26 \text{ kN} \quad \text{tlak, vodorovné ztužidlo}$$

#### RO 42.4/5.6

$$A_5 := 536 \text{ mm}^2$$
$$i_5 := 13 \text{ mm}$$

Poměrná štíhlost

$$L_{cr.y.5} := B = 3 \text{ m}$$

$$\lambda_{1.5} := 93.9 \cdot \sqrt{\frac{235 \cdot \text{MPa}}{f_y}} = 93.9 \quad \lambda_5 := \frac{L_{cr.y.5}}{i_5} = 230.77$$

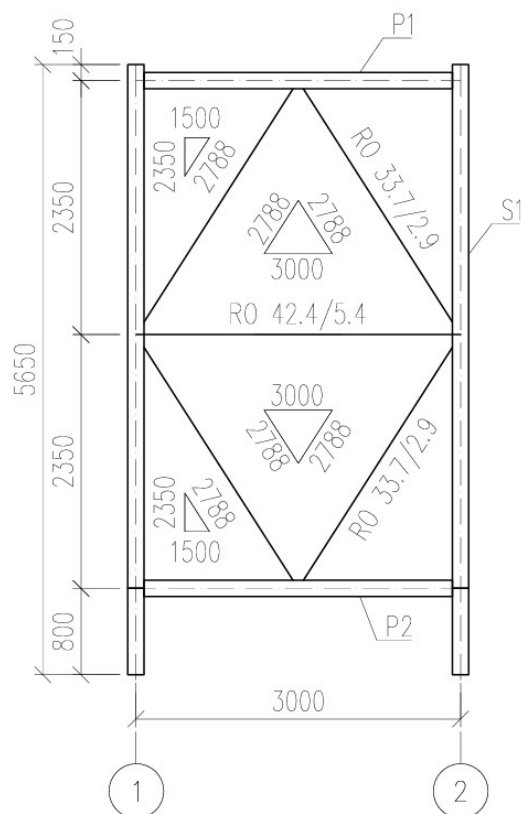
$$\chi_{y.p.5} := \frac{\lambda_5}{\lambda_{1.5}} = 2.46 \rightarrow \text{křivka "b"} \rightarrow \chi_{y.5} := 0.158$$

Vzpěrná tlaková únosnost

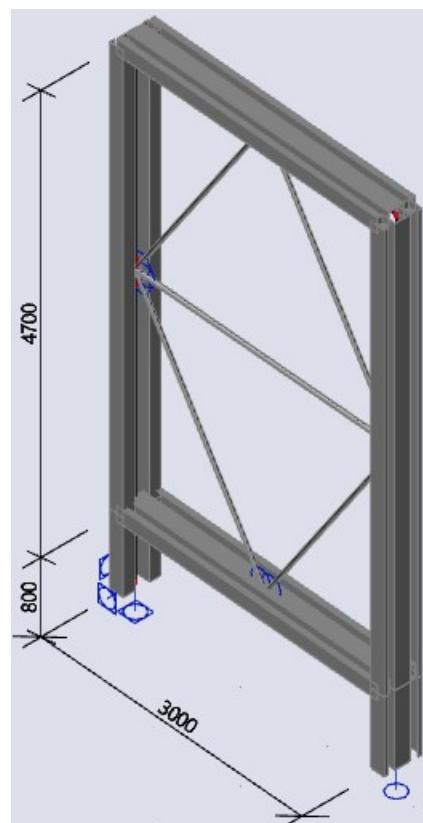
$$N_{b.Rd.5} := \chi_{y.5} \cdot A_5 \cdot f_y = 19.9 \text{ kN} \geq N_{Ed5.c} = 19.26 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

## 9. NÁVRH PRVKŮ RÁMOVÉ KONSTRUKCE

### 9.1. RÁMOVÁ KONSTRUKCE

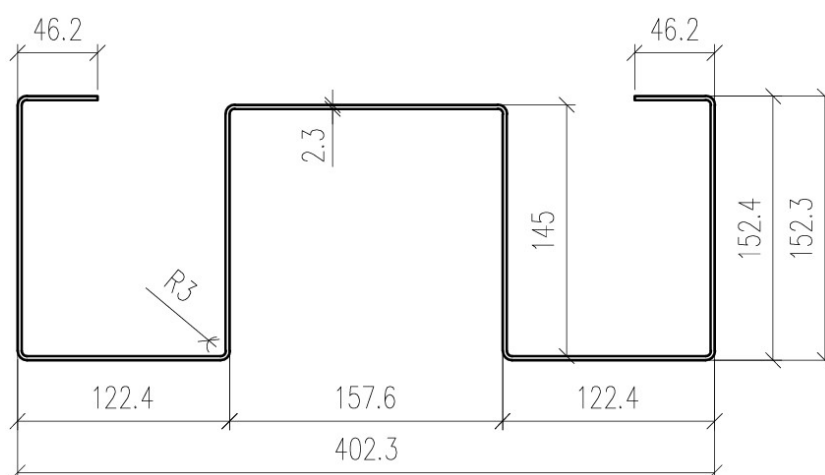


Obrázek 16 - Pohled na rám

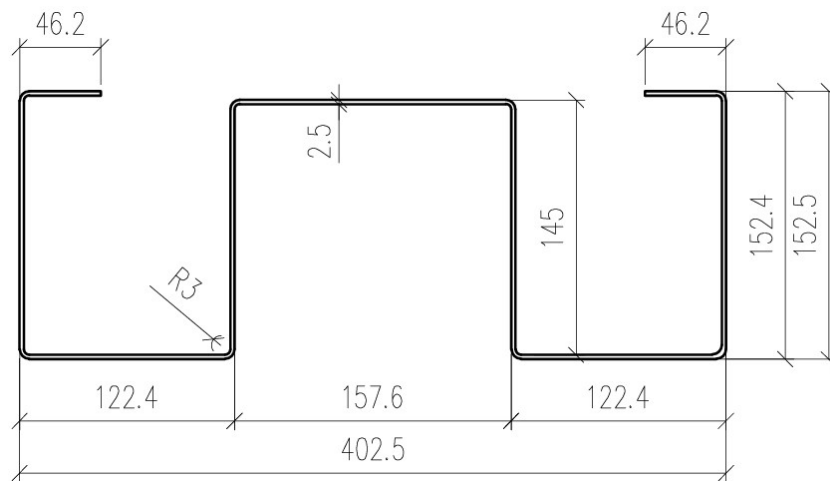


Obrázek 17 - Model rámu

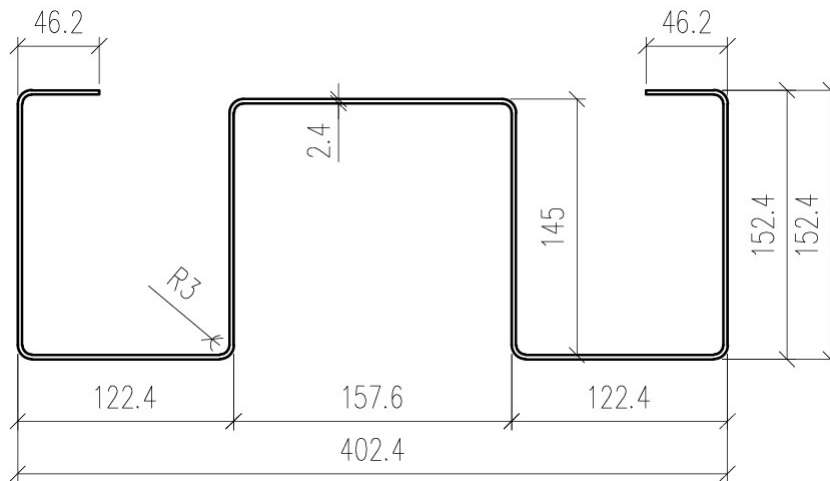
### 9.2. PROFILY NOSNÝCH PRVKŮ



Obrázek 18 - Profil horní příče P1



Obrázek 19 - Profil spodní příče P2



Obrázek 20 - Profil sloupu S1

## 10. ZÁVĚR

Bakalářská práce je věnována statickému návrhu, posouzení a optimalizaci tenkostěnných průřezů rámové konstrukce. Řešenými nosnými prvky jsou příčle a sloupy rámu.

V první části jsou popsána zadaná zatížení působící na zvolený rám, dále je provedeno posouzení příčně zatížených plechů pro zjištění průhybů a ohybového a membránového napětí v nejvíce zatížených deskách.

V další části je vytvořen program pro výběr profilů pro návrh rozměrů tenkostěnných průřezů, pro které je posouzen mezní stav únosnosti na vliv boulení. Tyto profily jsou vymodelovány ve výpočtovém programu Scia Engineer za účelem získání vnitřních sil pro následnou optimalizaci průřezů. Výstupem z programu je výpis vyhovujících profilů, ze kterých jsou vybrány optimální profily pro návrh prvků rámové konstrukce. Po porovnání výsledků z programu jsou zvoleny profily o stejné geometrii s rozdílem v tloušťkách průřezů, jelikož jsou prvky rámu namáhány různým zatížením. Kromě tloušťky se na únosnosti výrazně podílí i velikost vnitřní výztuhy. Z výsledků je vidět, že nejlépe vyšly profily s vysokou vnitřní výztuhou.



## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 – Řešený výsek konstrukce .....                               | 1  |
| Obrázek 2 – Rámy v řešeném výseku.....                                  | 1  |
| Obrázek 3 – Řešené příčně zatížené plechy.....                          | 14 |
| Obrázek 4 – Schéma geometrie průřezu.....                               | 22 |
| Obrázek 5 – Účinný průřez v tlaku, profil 1.....                        | 30 |
| Obrázek 6 – Posun těžišťové osy v tlaku.....                            | 31 |
| Obrázek 7 – Plně účinný průřez při kladném momentu, profil 1.....       | 32 |
| Obrázek 8 – Účinný průřez při kladném ohybovém momentu, profil 1.....   | 37 |
| Obrázek 9 – Plně účinný průřez při záporném momentu, profil 1.....      | 38 |
| Obrázek 10 – Účinný průřez při záporném ohybovém momentu, profil 1..... | 41 |
| Obrázek 11 – Účinný průřez v tlaku, profil 2.....                       | 51 |
| Obrázek 12 – Plně účinný průřez při kladném momentu, profil 2.....      | 52 |
| Obrázek 13 – Účinný průřez při kladném ohybovém momentu, profil 2.....  | 57 |
| Obrázek 14 – Plně účinný průřez při záporném momentu, profil 2.....     | 58 |
| Obrázek 15 – Účinný průřez při záporném ohybovém momentu, profil 2..... | 65 |
| Obrázek 16 – Pohled na rám.....   | 71 |
| Obrázek 17 – Model rámu.....  | 71 |
| Obrázek 18 – Profil horní příčle P1.....                                | 71 |
| Obrázek 18 – Profil spodní příčle P2.....                               | 72 |
| Obrázek 18 – Profil sloupu S1.....                                      | 72 |

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ**



**PŘÍLOHY**

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Vypracovala: Thu Huong Tranová

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 – Přehled zatížení (Scia Engineer)

Příloha č. 2 – Návrh statických schémat pro rámovou konstrukci

Příloha č. 3 – Optimalizované profily

Příloha č. 4 – Vnitřní síly pro navrženou rámovou konstrukci

Příloha č. 5 – Optimalizace v programovacím jazyce Python

# **PŘÍLOHA Č. 1**

**PŘEHLED ZATÍŽENÍ V PROGRAMU SCIA ENGINEER**



| Jméno | Popis               | Typ | Zatěžovací stavy                     | Souč.<br>[1-7] |
|-------|---------------------|-----|--------------------------------------|----------------|
|       |                     |     | Tř - Trení                           | 1.000          |
|       |                     |     | Wx - Vitr podelny                    | 1.000          |
|       |                     |     | Wy - Vitr pricny                     | 1.000          |
| CO3   | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.350          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.350          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.350          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.050          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050          |
|       |                     |     | U1 - Pretlak                         | 0.900          |
|       |                     |     | Wx - Vitr podelny                    | 0.900          |
| CO4   | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.350          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.350          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.350          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.050          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050          |
|       |                     |     | U2 - Podtlak                         | 0.900          |
|       |                     |     | Wx - Vitr podelny                    | 0.900          |
| CO5   | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.350          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.350          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.350          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.050          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050          |
|       |                     |     | U1 - Pretlak                         | 0.900          |
|       |                     |     | Wy - Vitr pricny                     | 0.900          |
| CO6   | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.350          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.350          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.350          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.050          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050          |
|       |                     |     | U2 - Podtlak                         | 0.900          |
|       |                     |     | Wy - Vitr pricny                     | 0.900          |
| CO7   | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.000          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 0.000          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 0.000          |
|       |                     |     | Wx - Vitr podelny                    | 1.500          |
| CO8   | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.000          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 0.000          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 0.000          |
|       |                     |     | Wy - Vitr pricny                     | 1.500          |
| CO9   | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.000          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 0.000          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 0.000          |
|       |                     |     | U1 - Pretlak                         | 1.500          |
| CO10  | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.000          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 0.000          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 0.000          |
|       |                     |     | U2 - Podtlak                         | 1.500          |
| CO11  | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.500          |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.500          |
|       |                     |     | U1 - Pretlak                         | 0.900          |
|       |                     |     | Wx - Vitr podelny                    | 0.900          |
| CO12  | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150          |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150          |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150          |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.500          |

verze

verze

verze

| Jméno | Popis               | Typ | Zatěžovací stavy                     | Souč.<br>[1] |
|-------|---------------------|-----|--------------------------------------|--------------|
| CO13  | Lineární - únosnost |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.500        |
|       |                     |     | U2 - Podtlak                         | 0.900        |
|       |                     |     | Wx - Vitr podelny                    | 0.900        |
|       |                     |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150        |
| CO14  | Lineární - únosnost |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150        |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150        |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.500        |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.500        |
| CO15  | Lineární - únosnost |     | U1 - Pretlak                         | 0.900        |
|       |                     |     | Wy - Vitr pricny                     | 0.900        |
|       |                     |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150        |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150        |
| CO16  | Lineární - únosnost |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150        |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.050        |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050        |
|       |                     |     | U1 - Pretlak                         | 0.900        |
| CO17  | Lineární - únosnost |     | Wx - Vitr podelny                    | 1.500        |
|       |                     |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150        |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150        |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150        |
| CO18  | Lineární - únosnost |     | P1 - Provozni                        | 1.050        |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050        |
|       |                     |     | U2 - Podtlak                         | 0.900        |
|       |                     |     | Wy - Vitr pricny                     | 1.500        |
| CO19  | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150        |
|       |                     |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150        |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150        |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.050        |
| CO20  | Lineární - únosnost |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050        |
|       |                     |     | U1 - Pretlak                         | 1.500        |
|       |                     |     | Wx - Vitr podelny                    | 0.900        |
|       |                     |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150        |
| CO21  | Lineární - únosnost |     | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150        |
|       |                     |     | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150        |
|       |                     |     | P1 - Provozni                        | 1.050        |
|       |                     |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050        |
| CO22  | Lineární - únosnost |     | U1 - Pretlak                         | 1.500        |
|       |                     |     | Wy - Vitr pricny                     | 0.900        |
| CO22  | Lineární - únosnost |     | G2 - Vl. tíha kanalu a prislusenstvi | 1.150        |

verze

verze

verze

| Jméno       | Popis | Typ                     | Zatěžovací stavy                     | Souč.<br>[V] |
|-------------|-------|-------------------------|--------------------------------------|--------------|
|             |       |                         | prislusenstvi                        |              |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.150        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.150        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.050        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.050        |
|             |       |                         | U2 - Podtlak                         | 1.050        |
|             |       |                         | Wy - Vitr pricny                     | 1.500        |
| CO23        |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | U1 - Pretlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | Wx - Vitr podelny                    | 1.000        |
| CO24        |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | U2 - Podtlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | Wx - Vitr podelny                    | 1.000        |
| CO25        |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | U1 - Pretlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | Wy - Vitr pricny                     | 1.000        |
| CO26        |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | U2 - Podtlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | Wy - Vitr pricny                     | 1.000        |
| CO27 - Def1 |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | U1 - Pretlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | U2 - Podtlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | Tf - Treni                           | 1.000        |
| CO28 - Def2 |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | U1 - Pretlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | U2 - Podtlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | Tf - Treni                           | -1.000       |
| CO29 - Def3 |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | U1 - Pretlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | U2 - Podtlak                         | 1.000        |
|             |       |                         | Tf - Treni                           | 1.000        |
|             |       |                         | Wy - Vitr pricny                     | 1.000        |
| CO30 - T(+) |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a prislusenstvi | 1.000        |
|             |       |                         | EQ1 - Ost. stale                     | 1.000        |
|             |       |                         | EQ2 - Tepelna izolace                | 1.000        |
|             |       |                         | P1 - Provozni                        | 1.000        |
|             |       |                         | P2 - Prach, sedimenty, vypln         | 1.000        |
|             |       |                         | T - Teplota                          | 1.000        |
|             |       |                         | Tf - Treni                           | 1.000        |
| CO31 - T(-) |       | EN-MSP charakteristická | G2 - Vl. tiha kanalu a               | 1.000        |

verze

verze

verze



| Jméno | Popis | Typ | Zatěžovací stavy             | Souč.<br>[V] |
|-------|-------|-----|------------------------------|--------------|
|       |       |     | prislusenstvi                |              |
|       |       |     | EQ1 - Ost. stale             | 1.000        |
|       |       |     | EQ2 - Tepelna izolace        | 1.000        |
|       |       |     | P1 - Provozni                | 0.700        |
|       |       |     | P2 - Prach, sedimenty, vypln | 0.700        |
|       |       |     | Tf - Treni                   | 1.000        |

verze

## 5. Skupiny výsledků

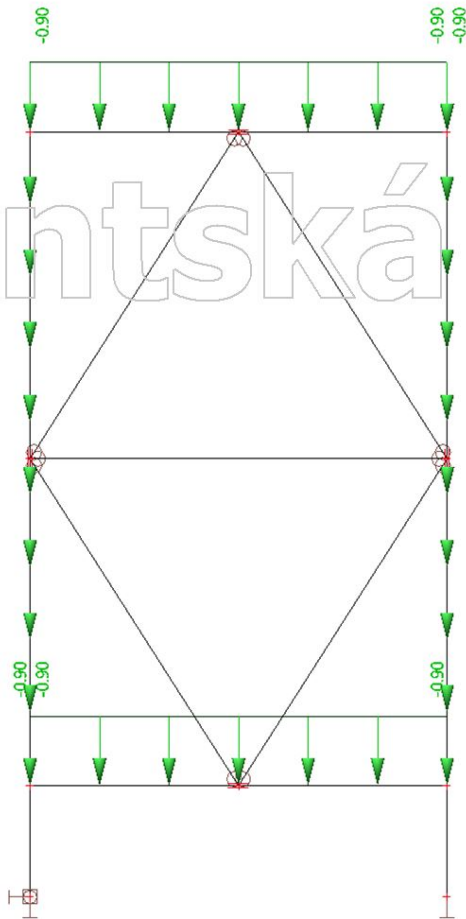
| Jméno       | Výpis  |
|-------------|--|
| Všechny MSU | CO1 - EN-MSÚ (STR/GEO) Soubor B<br>CO3 - Lineární - únosnost<br>CO4 - Lineární - únosnost<br>CO5 - Lineární - únosnost<br>CO6 - Lineární - únosnost<br>CO7 - Lineární - únosnost<br>CO8 - Lineární - únosnost<br>CO9 - Lineární - únosnost<br>CO10 - Lineární - únosnost<br>CO11 - Lineární - únosnost<br>CO12 - Lineární - únosnost<br>CO13 - Lineární - únosnost<br>CO14 - Lineární - únosnost<br>CO15 - Lineární - únosnost<br>CO16 - Lineární - únosnost<br>CO17 - Lineární - únosnost<br>CO18 - Lineární - únosnost<br>CO19 - Lineární - únosnost<br>CO20 - Lineární - únosnost<br>CO21 - Lineární - únosnost<br>CO22 - Lineární - únosnost   |
| Všechny MSP | CO3 - Lineární - únosnost<br>CO2 - EN-MSP charakteristická<br>CO23 - EN-MSP charakteristická<br>CO24 - EN-MSP charakteristická<br>CO25 - EN-MSP charakteristická<br>CO26 - EN-MSP charakteristická<br>CO27 - Def1 - EN-MSP charakteristická<br>CO28 - Def2 - EN-MSP charakteristická<br>CO29 - Def3 - EN-MSP charakteristická<br>CO30 - T(+) - EN-MSP charakteristická<br>CO31 - T(-) - EN-MSP charakteristická  |
| Vše MSÚ+MSP | CO1 - EN-MSÚ (STR/GEO) Soubor B<br>CO3 - Lineární - únosnost<br>CO4 - Lineární - únosnost<br>CO5 - Lineární - únosnost<br>CO6 - Lineární - únosnost<br>CO7 - Lineární - únosnost<br>CO8 - Lineární - únosnost<br>CO9 - Lineární - únosnost<br>CO10 - Lineární - únosnost<br>CO11 - Lineární - únosnost<br>CO12 - Lineární - únosnost<br>CO13 - Lineární - únosnost<br>CO14 - Lineární - únosnost<br>CO15 - Lineární - únosnost<br>CO16 - Lineární - únosnost<br>CO17 - Lineární - únosnost<br>CO18 - Lineární - únosnost<br>CO19 - Lineární - únosnost<br>CO20 - Lineární - únosnost<br>CO21 - Lineární - únosnost<br>CO22 - Lineární - únosnost<br>CO2 - EN-MSP charakteristická<br>CO23 - EN-MSP charakteristická<br>CO24 - EN-MSP charakteristická<br>CO25 - EN-MSP charakteristická<br>CO26 - EN-MSP charakteristická<br>CO27 - Def1 - EN-MSP charakteristická<br>CO28 - Def2 - EN-MSP charakteristická<br>CO29 - Def3 - EN-MSP charakteristická<br>CO30 - T(+) - EN-MSP charakteristická<br>CO31 - T(-) - EN-MSP charakteristická |
| MSÚ_MSP     | CO3 - Lineární - únosnost<br>CO4 - Lineární - únosnost<br>CO5 - Lineární - únosnost  |

Studená verze

Studená verze

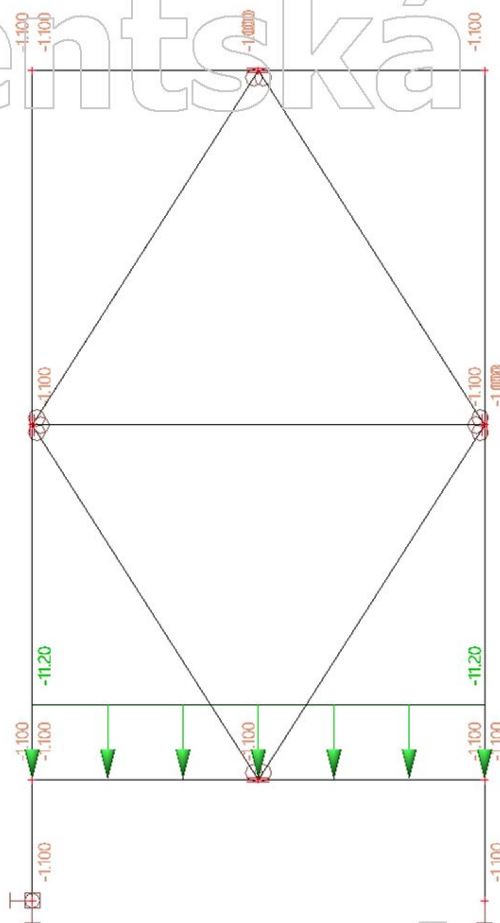
| Jméno | Výpis                            |
|-------|----------------------------------|
| CO6   | - Lineární - únosnost            |
| CO7   | - Lineární - únosnost            |
| CO8   | - Lineární - únosnost            |
| CO9   | - Lineární - únosnost            |
| CO10  | - Lineární - únosnost            |
| CO11  | - Lineární - únosnost            |
| CO12  | - Lineární - únosnost            |
| CO13  | - Lineární - únosnost            |
| CO14  | - Lineární - únosnost            |
| CO15  | - Lineární - únosnost            |
| CO16  | - Lineární - únosnost            |
| CO17  | - Lineární - únosnost            |
| CO18  | - Lineární - únosnost            |
| CO19  | - Lineární - únosnost            |
| CO20  | - Lineární - únosnost            |
| CO21  | - Lineární - únosnost            |
| CO22  | - Lineární - únosnost            |
| CO23  | - EN-MSP charakteristická        |
| CO24  | - EN-MSP charakteristická        |
| CO25  | - EN-MSP charakteristická        |
| CO26  | - EN-MSP charakteristická        |
| CO27  | - Def1 - EN-MSP charakteristická |
| CO28  | - Def2 - EN-MSP charakteristická |
| CO29  | - Def3 - EN-MSP charakteristická |
| CO30  | - T(+) - EN-MSP charakteristická |
| CO31  | - T(-) - EN-MSP charakteristická |

## 6. G2 / VI. tíha příslušenství

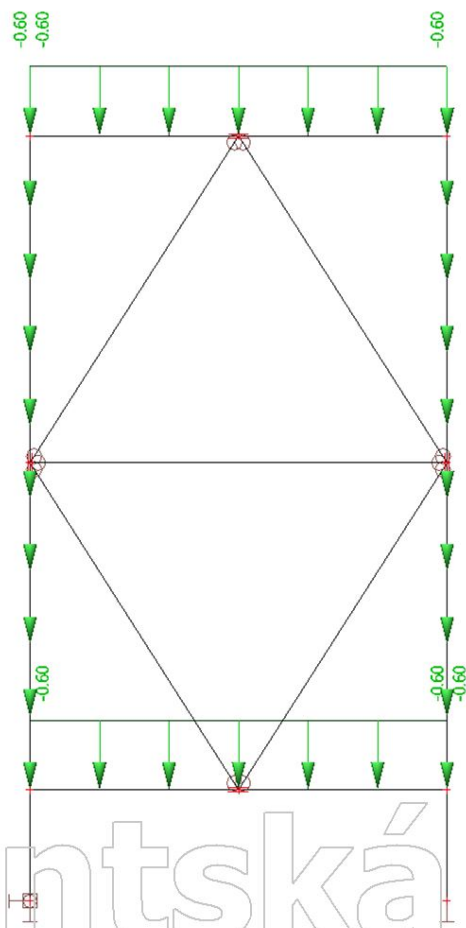


Studentská verze

### 7. EQ1 / Ost. stálé / příslušenství

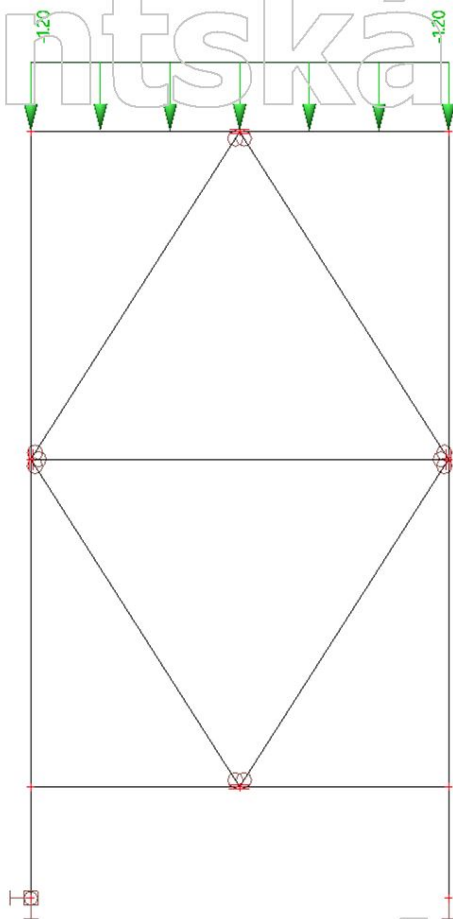


### 8. EQ2 / Ost. stálé / tepelná izolace



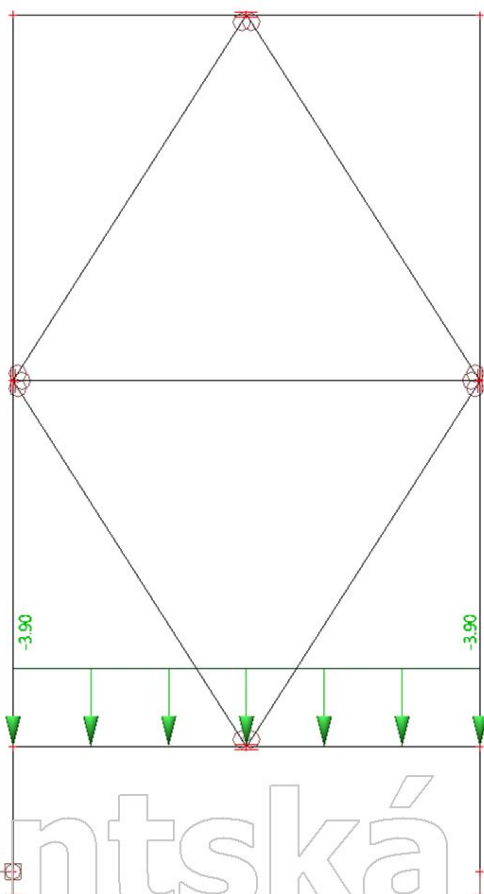
9. P1 / Užité / provozní

Studentská verze



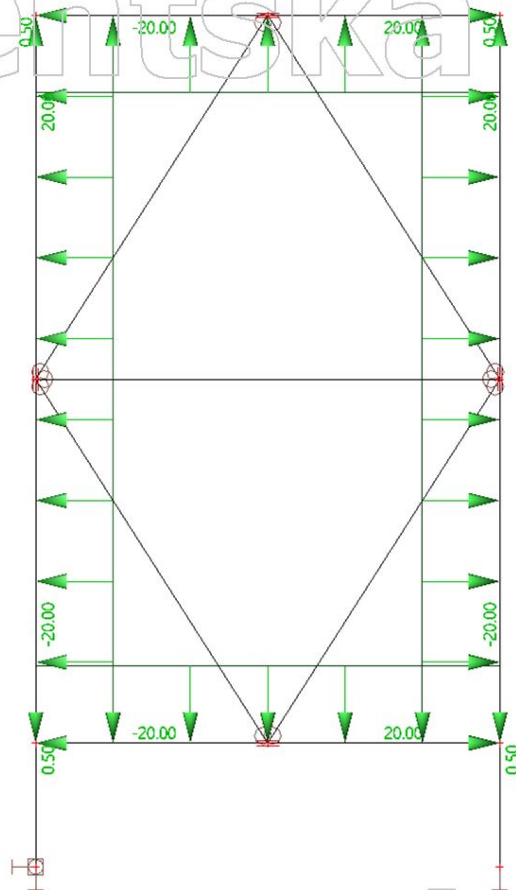
10. P2 / Ost. užité / sedimenty

Studentská verze

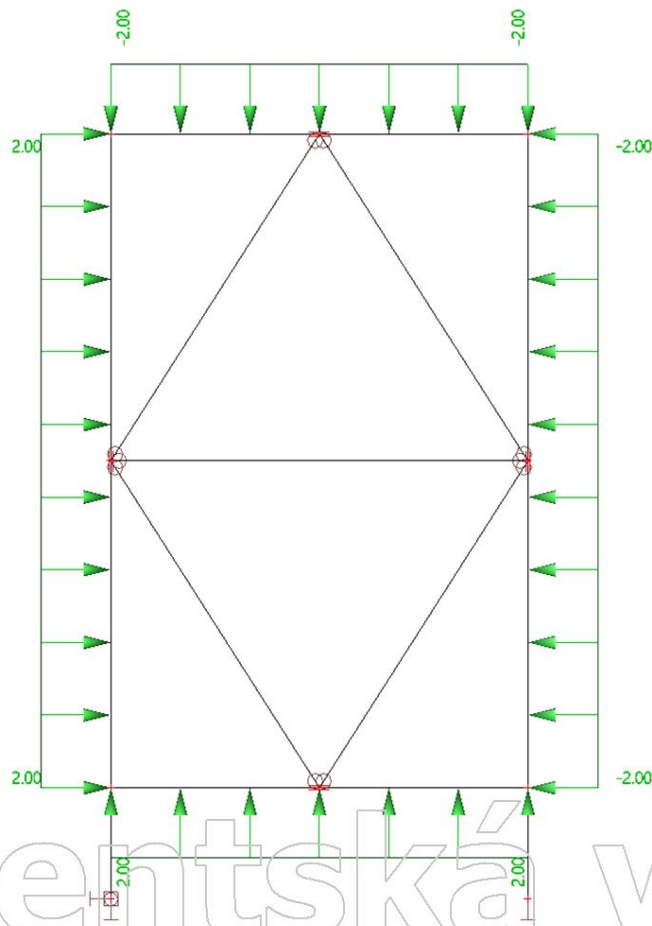


Studentská verze

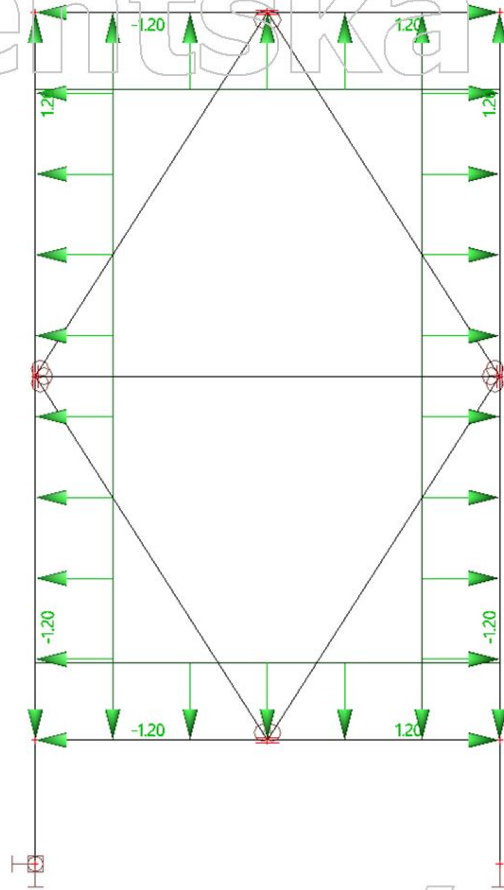
### 11. U1 / Přetlak



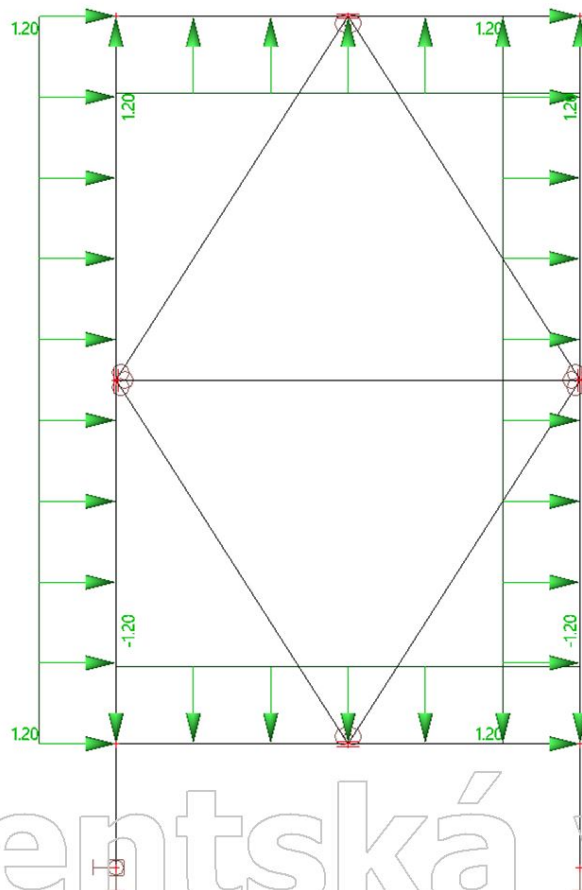
### 12. U2 / Podtlak



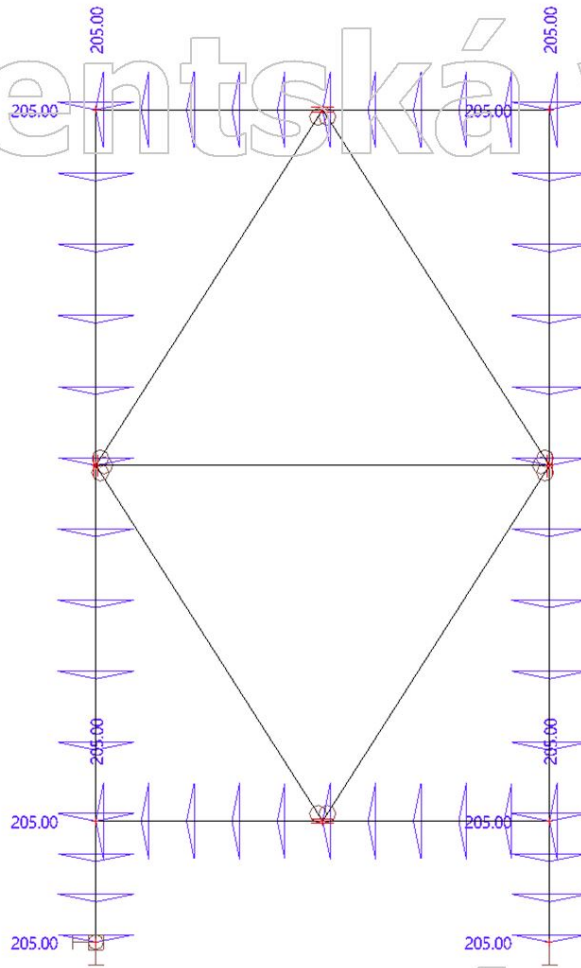
### 13. $W_x$ / Podélný vítr



### 14. $W_y$ / Příčný vítr



Studentská verze



Studentská verze

Studentská verze

# **PŘÍLOHA Č. 2**

VÝBĚR STATICKÝCH SCHÉMAT



## 1. 1D deformace; $u_x$

Hodnoty:  $u_x$

Lineární výpočet

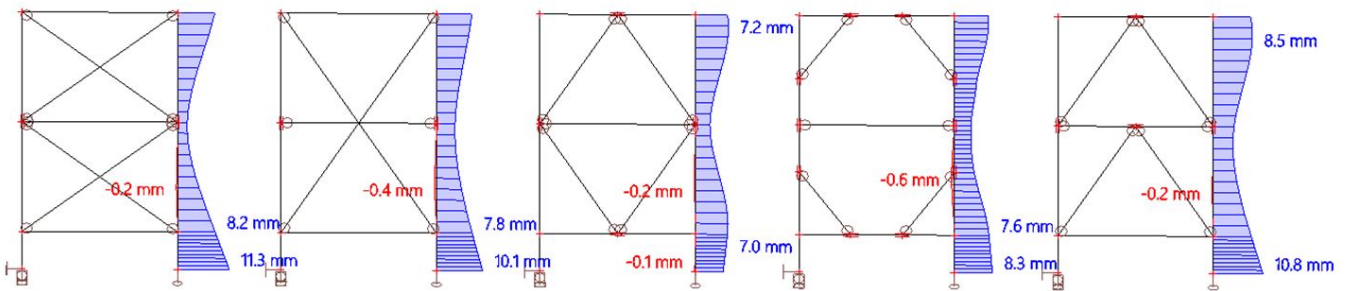
Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Globální

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B604, B605, B784, B785, B794, B795, B804, B805, B814, B815

Filtr: Vrstva = Ux



## 2. 1D deformace; $u_z$

Hodnoty:  $u_z$

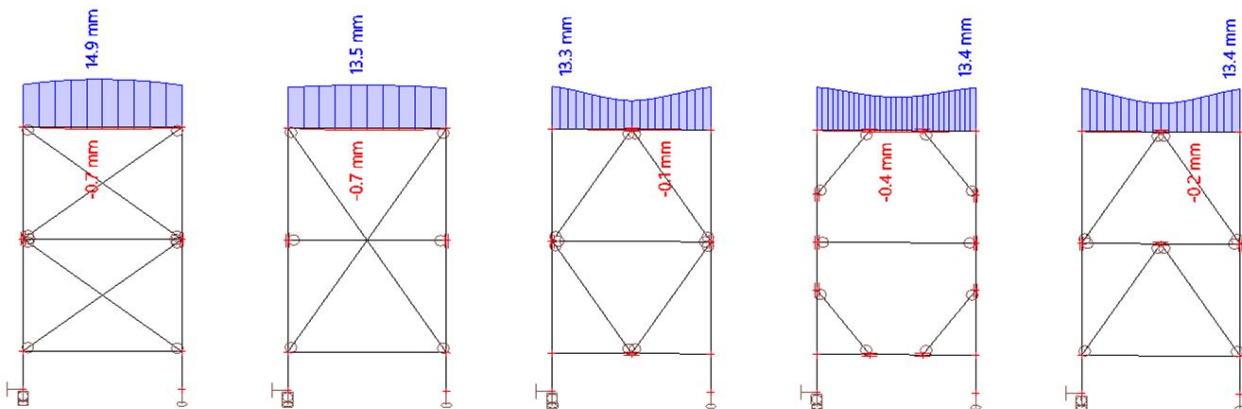
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Globální

Extrém 1D: Dílec

Výběr: pricel 27, pricel 45..pricel 48



Studentská verze

### 3. 1D napětí; $\sigma_x$

Hodnoty:  $\sigma_x$

Lineární výpočet

Třída: MSJ\_MSP

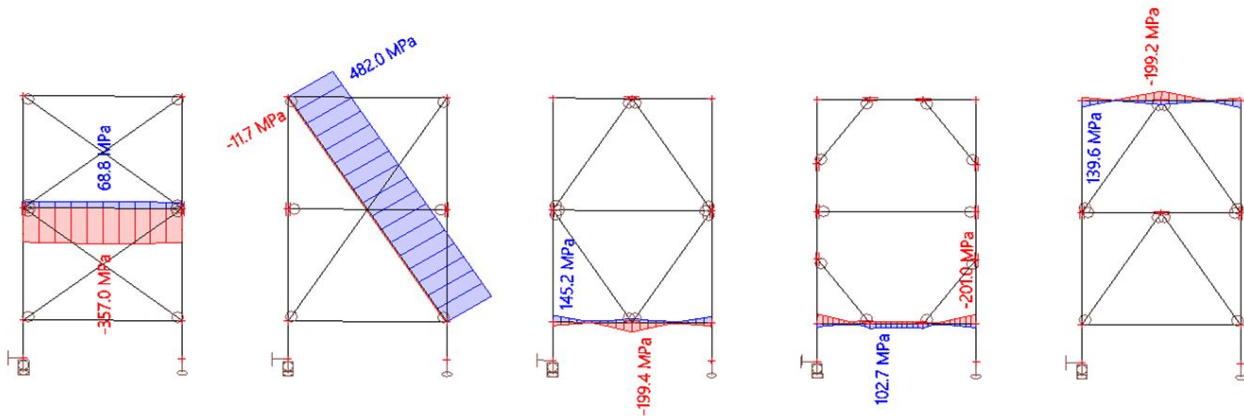
Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B607, B796, B806, pricel 48,

B825

Filtr: Vrstva = sigma\_x



Studentská verze

Studentská verze

# **PŘÍLOHA Č. 3**

OPTIMALIZOVANÉ PROFILY

### VYHOVUJÍCÍ PROFILY PRO HORNÍ PŘÍČEL

| horní<br>příčel | m      | t    | AB   | CD   | $A_{\text{eff.N}}$ | $I_{y.c.m^2}$      | N   | My+  | My-  | N + My+ | N + My- | $N_{\text{Ed}}$ | $M_{\text{Ed}}$ |
|-----------------|--------|------|------|------|--------------------|--------------------|-----|------|------|---------|---------|-----------------|-----------------|
|                 | [kg/m] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm <sup>2</sup> ] | [mm <sup>4</sup> ] | [%] | [%]  | [%]  | [%]     | [%]     | [kN]            | [kNm]           |
| 1               | 19.32  | 2.3  | 40   | 145  | 1665.2             | 6965305.3          | 9.3 | 68.3 | 79.3 | 89.8    | 99.2    | 36.06           | 15.26           |
| 2               | 19.50  | 2.3  | 45   | 145  | 1673.5             | 7018946.1          | 9.2 | 67.1 | 79.2 | 88.7    | 99.1    | 36.07           | 15.42           |
| 3               | 19.68  | 2.3  | 50   | 145  | 1680.0             | 7063253.7          | 9.2 | 67.1 | 78.7 | 88.7    | 98.7    | 36.07           | 15.48           |
| 4               | 19.78  | 2.4  | 35   | 140  | 1780.5             | 7072390.2          | 8.7 | 70.9 | 79.5 | 91.2    | 98.6    | 36.08           | 15.49           |
| 5               | 19.78  | 2.4  | 30   | 145  | 1742.5             | 7102145.6          | 8.9 | 69.6 | 79.9 | 90.4    | 99.3    | 36.08           | 15.53           |
| 6               | 19.78  | 2.4  | 40   | 135  | 1793.3             | 6933847.5          | 8.7 | 71.3 | 80.2 | 91.5    | 99.2    | 36.07           | 15.31           |
| 7               | 19.86  | 2.3  | 55   | 145  | 1685.3             | 7100965.1          | 9.1 | 67.2 | 78.3 | 88.8    | 98.4    | 36.08           | 15.53           |
| 8               | 19.97  | 2.4  | 35   | 145  | 1785.4             | 7325760.5          | 8.7 | 68.9 | 77.8 | 89.4    | 97.1    | 36.09           | 15.82           |
| 9               | 19.97  | 2.4  | 40   | 140  | 1798.6             | 7178152.4          | 8.6 | 70.9 | 80.1 | 91.0    | 98.9    | 36.09           | 15.63           |
| 10              | 20.04  | 2.3  | 60   | 145  | 1689.8             | 7134374.9          | 9.1 | 67.3 | 78.0 | 88.8    | 98.2    | 36.08           | 15.57           |
| 11              | 20.16  | 2.4  | 40   | 145  | 1803.6             | 7428777.9          | 8.6 | 67.5 | 76.8 | 88.0    | 96.1    | 36.10           | 15.95           |
| 12              | 20.16  | 2.4  | 45   | 140  | 1808.0             | 7238634.4          | 8.6 | 67.8 | 77.9 | 88.4    | 97.1    | 36.09           | 15.71           |
| 13              | 20.16  | 2.4  | 50   | 135  | 1810.1             | 7047820.1          | 8.7 | 72.0 | 81.0 | 92.1    | 99.8    | 36.08           | 15.46           |
| 14              | 20.22  | 2.3  | 65   | 145  | 1693.7             | 7164793.0          | 9.1 | 67.3 | 67.6 | 88.9    | 97.9    | 16.08           | 15.61           |
| 15              | 20.35  | 2.4  | 45   | 145  | 1813.0             | 7487410.5          | 8.5 | 66.0 | 76.2 | 86.7    | 95.6    | 36.10           | 16.02           |

## 1. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N

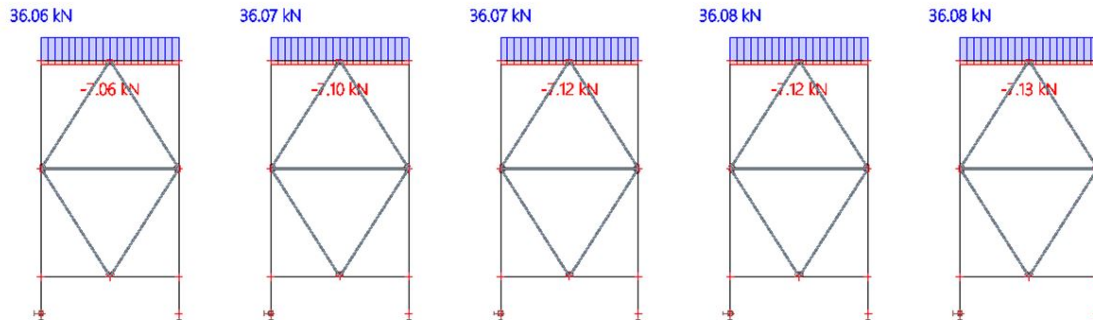
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: pricel 74..pricel 78



## 2. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>

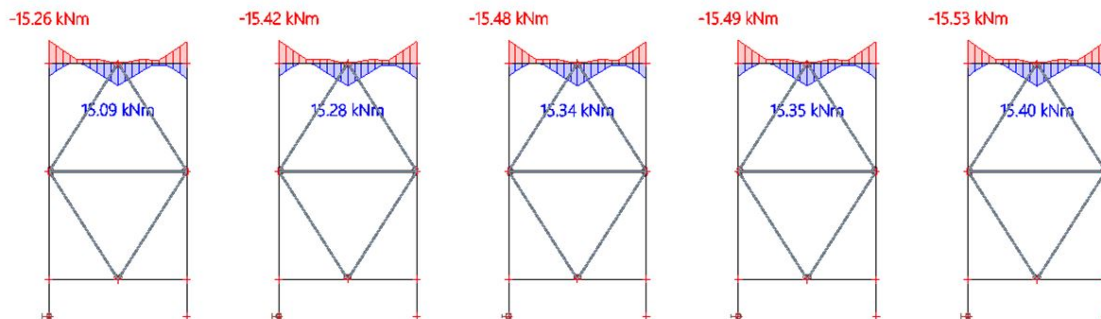
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

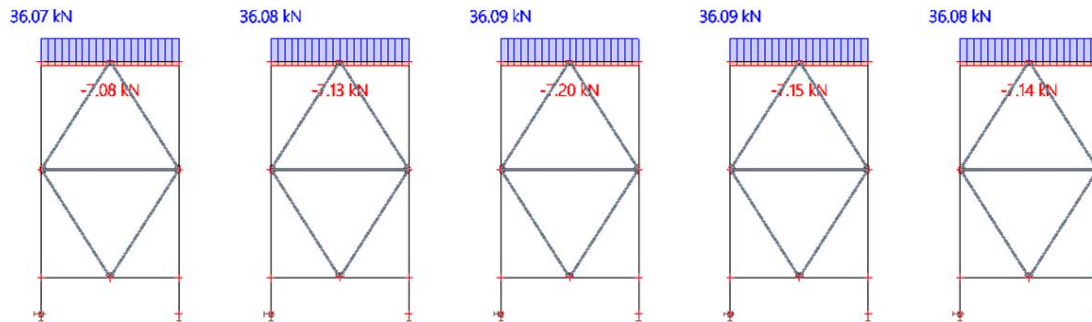
Extrém 1D: Dílec

Výběr: pricel 74..pricel 78



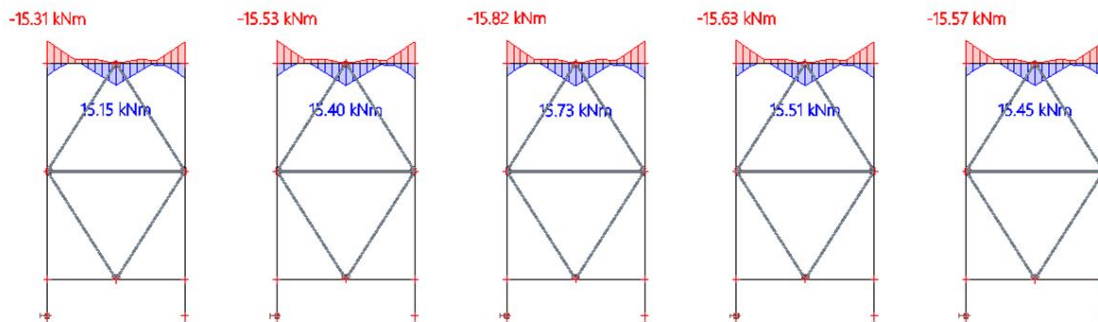
### 3. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: pricel 79..pricel 83



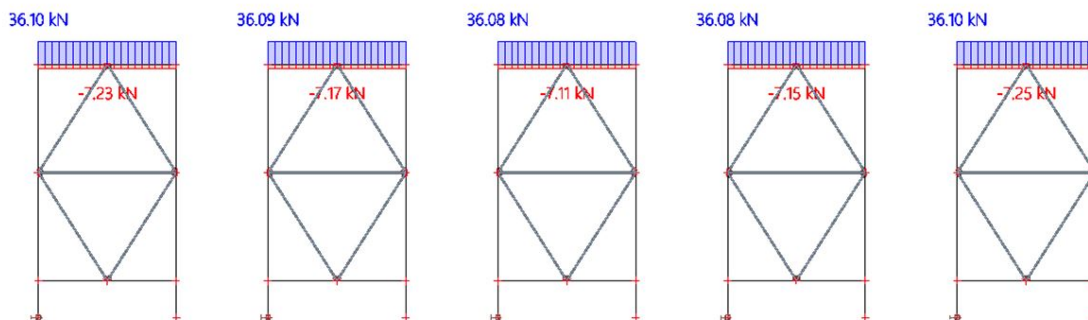
### 4. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: pricel 79..pricel 83



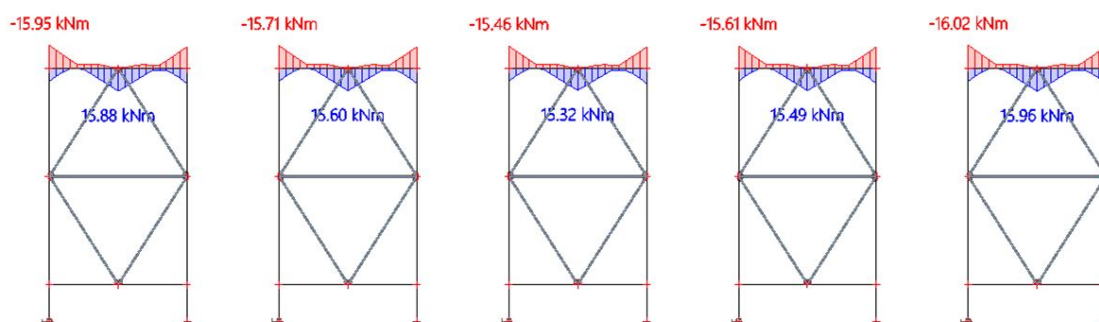
## 5. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: pricel 84..pricel 88



## 6. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: pricel 84..pricel 88



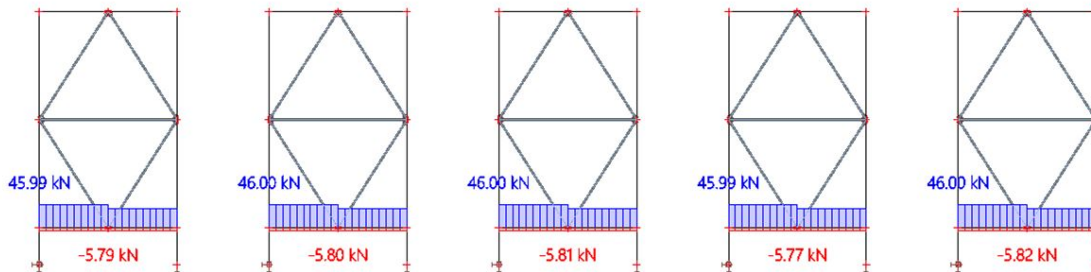
### VYHOVUJÍCÍ PROFILY PRO HORNÍ PŘÍČEL

| horní<br>příčel | m      | t    | AB   | CD   | $A_{\text{eff.N}}$ | $I_{y.c.m^2}$      | N   | My+  | My-  | N + My+ | N + My- | $N_{\text{Ed}}$ | $M_{\text{Ed}}$ |
|-----------------|--------|------|------|------|--------------------|--------------------|-----|------|------|---------|---------|-----------------|-----------------|
|                 | [kg/m] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm <sup>2</sup> ] | [mm <sup>4</sup> ] | [%] | [%]  | [%]  | [%]     | [%]     | [kN]            | [kNm]           |
| 1               | 19.32  | 2.3  | 40   | 145  | 1665.2             | 6965305.3          | 9.3 | 68.3 | 79.3 | 89.8    | 99.2    | 36.06           | 15.26           |
| 2               | 19.50  | 2.3  | 45   | 145  | 1673.5             | 7018946.1          | 9.2 | 67.1 | 79.2 | 88.7    | 99.1    | 36.07           | 15.42           |
| 3               | 19.68  | 2.3  | 50   | 145  | 1680.0             | 7063253.7          | 9.2 | 67.1 | 78.7 | 88.7    | 98.7    | 36.07           | 15.48           |
| 4               | 19.78  | 2.4  | 35   | 140  | 1780.5             | 7072390.2          | 8.7 | 70.9 | 79.5 | 91.2    | 98.6    | 36.08           | 15.49           |
| 5               | 19.78  | 2.4  | 30   | 145  | 1742.5             | 7102145.6          | 8.9 | 69.6 | 79.9 | 90.4    | 99.3    | 36.08           | 15.53           |
| 6               | 19.78  | 2.4  | 40   | 135  | 1793.3             | 6933847.5          | 8.7 | 71.3 | 80.2 | 91.5    | 99.2    | 36.07           | 15.31           |
| 7               | 19.86  | 2.3  | 55   | 145  | 1685.3             | 7100965.1          | 9.1 | 67.2 | 78.3 | 88.8    | 98.4    | 36.08           | 15.53           |
| 8               | 19.97  | 2.4  | 35   | 145  | 1785.4             | 7325760.5          | 8.7 | 68.9 | 77.8 | 89.4    | 97.1    | 36.09           | 15.82           |
| 9               | 19.97  | 2.4  | 40   | 140  | 1798.6             | 7178152.4          | 8.6 | 70.9 | 80.1 | 91.0    | 98.9    | 36.09           | 15.63           |
| 10              | 20.04  | 2.3  | 60   | 145  | 1689.8             | 7134374.9          | 9.1 | 67.3 | 78.0 | 88.8    | 98.2    | 36.08           | 15.57           |
| 11              | 20.16  | 2.4  | 40   | 145  | 1803.6             | 7428777.9          | 8.6 | 67.5 | 76.8 | 88.0    | 96.1    | 36.10           | 15.95           |
| 12              | 20.16  | 2.4  | 45   | 140  | 1808.0             | 7238634.4          | 8.6 | 67.8 | 77.9 | 88.4    | 97.1    | 36.09           | 15.71           |
| 13              | 20.16  | 2.4  | 50   | 135  | 1810.1             | 7047820.1          | 8.7 | 72.0 | 81.0 | 92.1    | 99.8    | 36.08           | 15.46           |
| 14              | 20.22  | 2.3  | 65   | 145  | 1693.7             | 7164793.0          | 9.1 | 67.3 | 67.6 | 88.9    | 97.9    | 16.08           | 15.61           |
| 15              | 20.35  | 2.4  | 45   | 145  | 1813.0             | 7487410.5          | 8.5 | 66.0 | 76.2 | 86.7    | 95.6    | 36.10           | 16.02           |



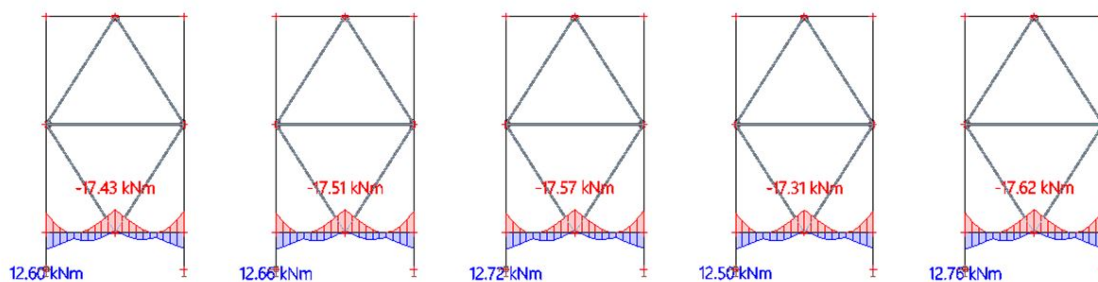
## 1. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: B1226, B1236, B1246, B1256,  
B1266



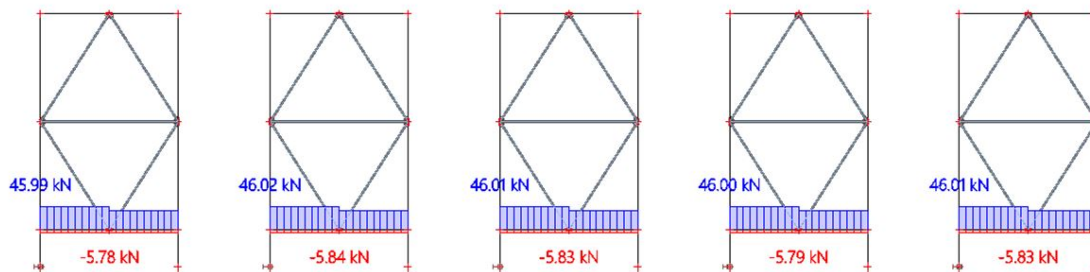
## 2. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: B1226, B1236, B1246, B1256,  
B1266



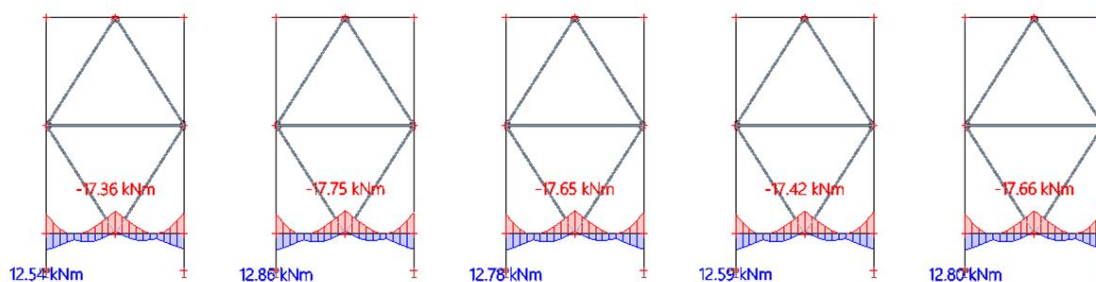
### 3. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: B1276, B1286, B1296, B1306,  
B1316



### 4. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>  
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: B1276, B1286, B1296, B1306,  
B1316



## 5. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N

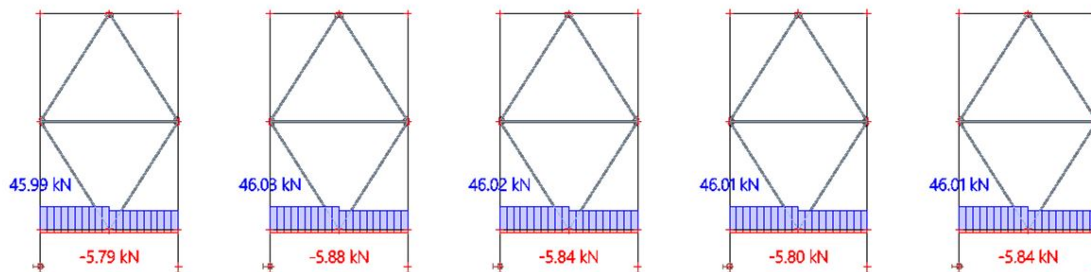
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B1326, B1336, B1346, B1356,  
B1366



## 6. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>

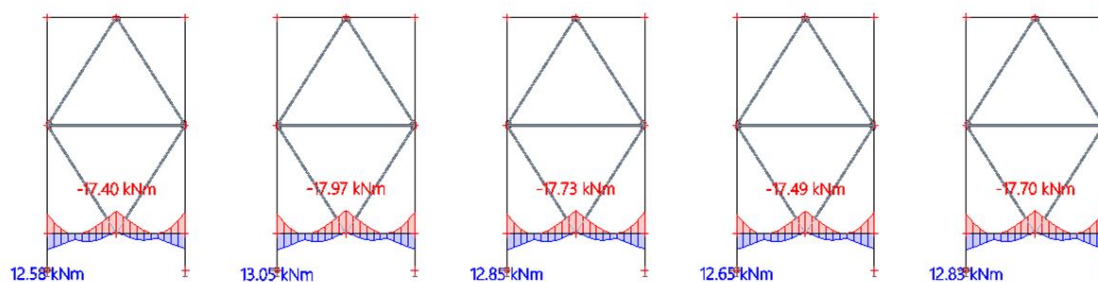
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B1326, B1336, B1346, B1356,  
B1366



### VYHOVUJÍCÍ PROFILY PRO SLOUPY

| sloupy | m      | t    | AB   | CD   | $A_{\text{eff.N}}$ | $I_{y.c.m2}$       | N    | My+  | My-  | N + My+ | N + My- | $N_{\text{Ed}}$ | $M_{\text{Ed}}$ |
|--------|--------|------|------|------|--------------------|--------------------|------|------|------|---------|---------|-----------------|-----------------|
|        | [kg/m] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm <sup>2</sup> ] | [mm <sup>4</sup> ] | [%]  | [%]  | [%]  | [%]     | [%]     | [kN]            | [kNm]           |
| 1      | 20.16  | 2.4  | 40   | 145  | 1803.6             | 7428777.9          | 10.7 | 66.6 | 75.7 | 90.1    | 98.1    | 42.82           | 15.73           |
| 2      | 20.35  | 2.4  | 50   | 140  | 1815.4             | 7288573.5          | 10.6 | 66.0 | 77.1 | 89.6    | 99.3    | 42.81           | 15.71           |
| 3      | 20.35  | 2.4  | 45   | 145  | 1813.0             | 7487410.5          | 10.6 | 64.8 | 74.9 | 88.5    | 97.3    | 42.83           | 15.74           |
| 4      | 20.54  | 2.4  | 50   | 145  | 1820.4             | 7535712.7          | 10.6 | 63.9 | 74.2 | 87.7    | 96.7    | 42.85           | 15.75           |
| 5      | 20.54  | 2.4  | 55   | 140  | 1821.4             | 7331061.8          | 10.6 | 64.3 | 76.5 | 88.1    | 98.8    | 42.82           | 15.72           |
| 6      | 20.61  | 2.5  | 30   | 145  | 1872.0             | 7516395.3          | 10.3 | 66.8 | 75.9 | 90.0    | 97.9    | 42.89           | 15.74           |
| 7      | 20.61  | 2.5  | 35   | 140  | 1911.9             | 7476080.7          | 10.1 | 68.3 | 75.8 | 90.9    | 97.5    | 42.92           | 15.74           |
| 8      | 20.61  | 2.5  | 40   | 135  | 1933.9             | 7370380.9          | 10.1 | 69.4 | 76.7 | 91.8    | 98.0    | 42.92           | 15.72           |
| 9      | 20.72  | 2.4  | 55   | 145  | 1826.4             | 7576711.4          | 10.5 | 63.4 | 70.7 | 87.2    | 93.6    | 42.86           | 15.75           |
| 10     | 20.72  | 2.4  | 60   | 140  | 1826.5             | 7368656.6          | 10.5 | 63.9 | 75.9 | 87.8    | 98.3    | 42.83           | 15.72           |
| 11     | 20.80  | 2.5  | 35   | 145  | 1917.4             | 7746461.7          | 10.1 | 65.1 | 72.8 | 88.0    | 94.7    | 42.96           | 15.78           |
| 12     | 20.80  | 2.5  | 40   | 140  | 1939.9             | 7629954.8          | 10.0 | 66.4 | 73.7 | 89.0    | 95.3    | 42.96           | 15.76           |
| 13     | 20.80  | 2.5  | 45   | 135  | 1944.5             | 7438417.9          | 10.0 | 67.5 | 75.7 | 90.0    | 97.1    | 42.94           | 15.73           |
| 14     | 20.91  | 2.4  | 60   | 145  | 1831.4             | 7612912.9          | 10.5 | 63.7 | 73.1 | 87.6    | 95.8    | 42.87           | 15.76           |
| 15     | 20.91  | 2.4  | 65   | 140  | 1830.9             | 7402834.0          | 10.5 | 63.8 | 75.4 | 87.8    | 98.0    | 42.84           | 15.73           |

## 1. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N

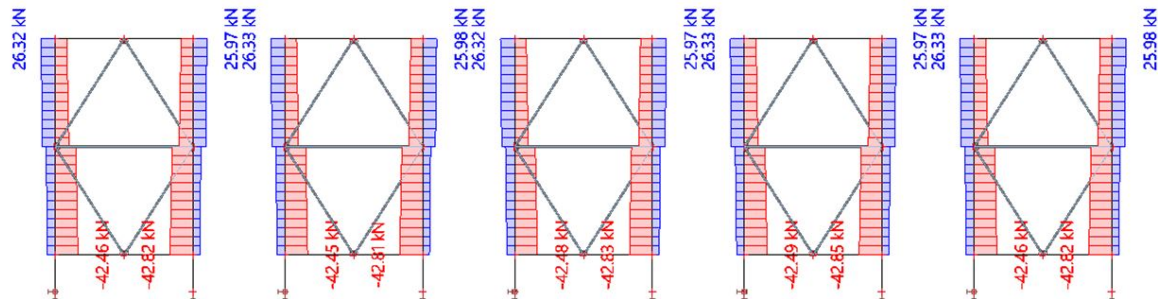
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B603, B605, B783, B785, B793,  
B795, B803, B805, B813, B815



## 2. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>

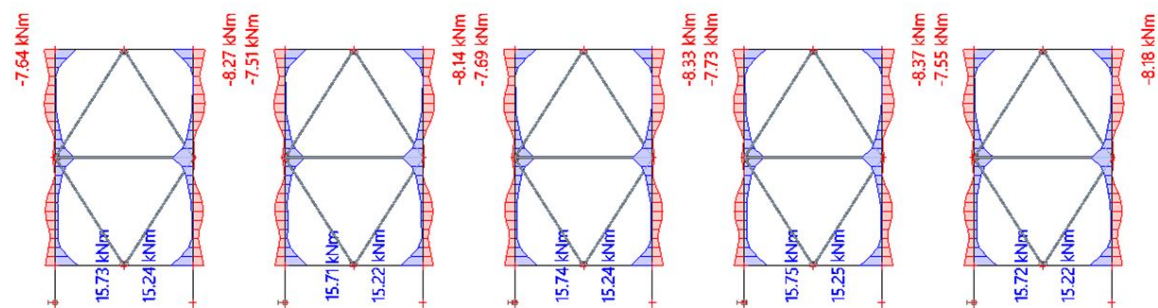
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B603, B605, B783, B785, B793,  
B795, B803, B805, B813, B815



Hodnoty: **N**

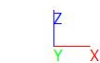
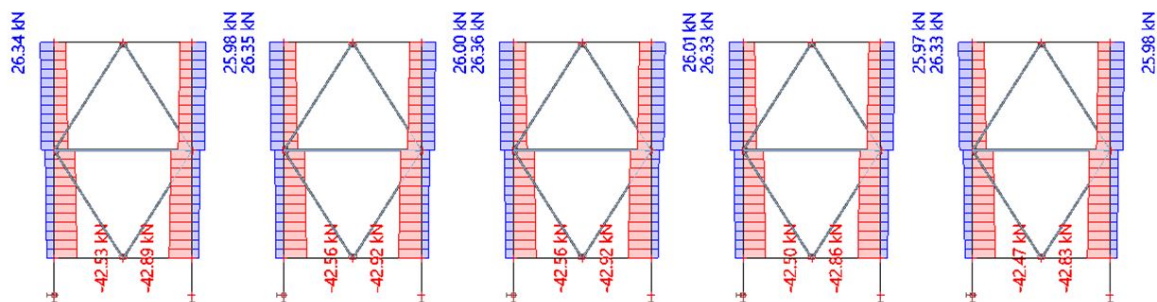
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B823, B825, B833, B835, B843,  
B845, B853, B855, B863, B865



### 3. 1D vnitřní síly; $M_y$

Hodnoty:  **$M_y$**

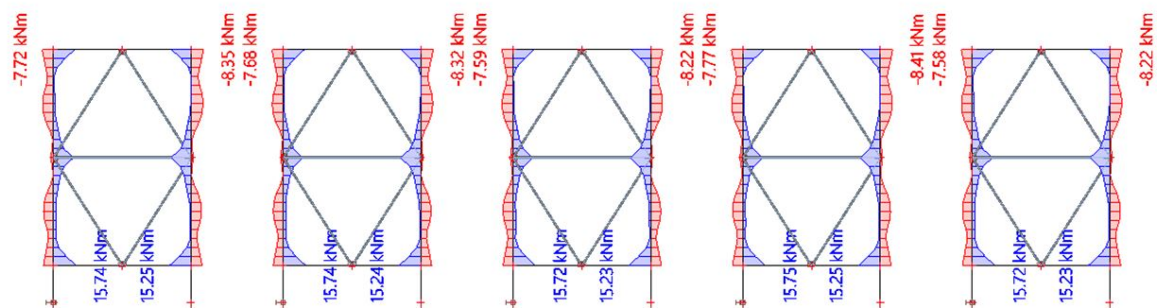
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B823, B825, B833, B835, B843,  
B845, B853, B855, B863, B865



Studentská verze

#### 4. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N

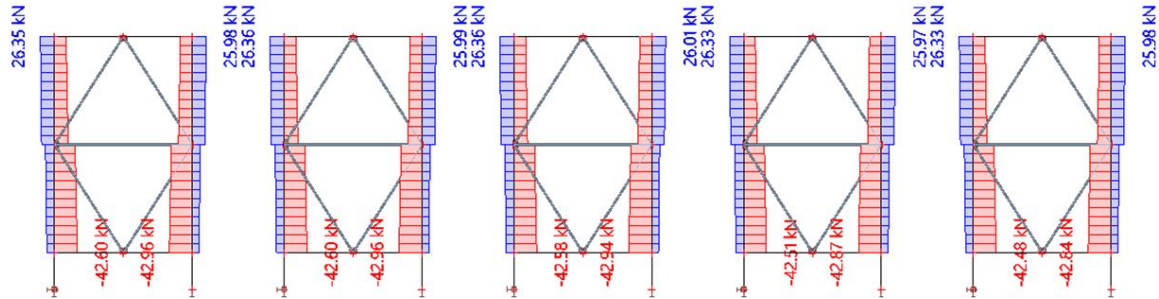
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B873, B875, B883, B885, B893,  
B895, B903, B905, B913, B915



#### 5. 1D vnitřní síly; M<sub>y</sub>

Hodnoty: M<sub>y</sub>

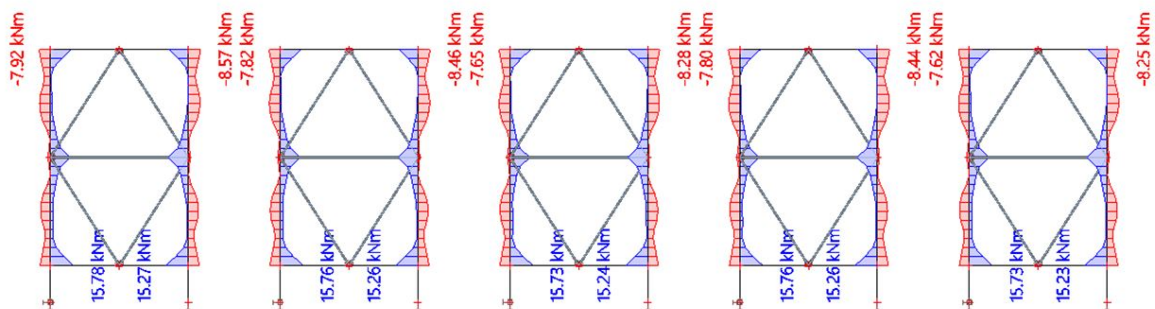
Lineární výpočet

Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B873, B875, B883, B885, B893,  
B895, B903, B905, B913, B915



Studentská verze

# **PŘÍLOHA Č. 4**

STANOVENÍ VNITŘNÍCH SIL PRO NAVRŽENOU  
RÁMOVOU KONSTRUKCE



## 1. 1D vnitřní síly; N

Hodnoty: N

Lineární výpočet

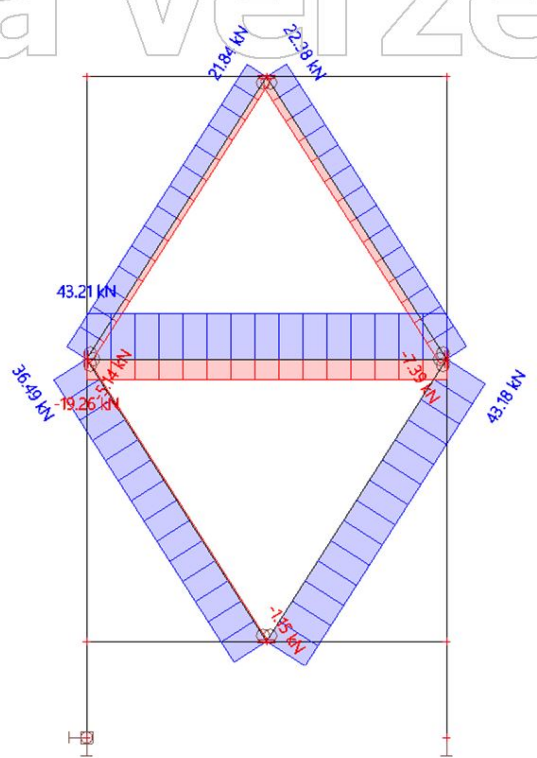
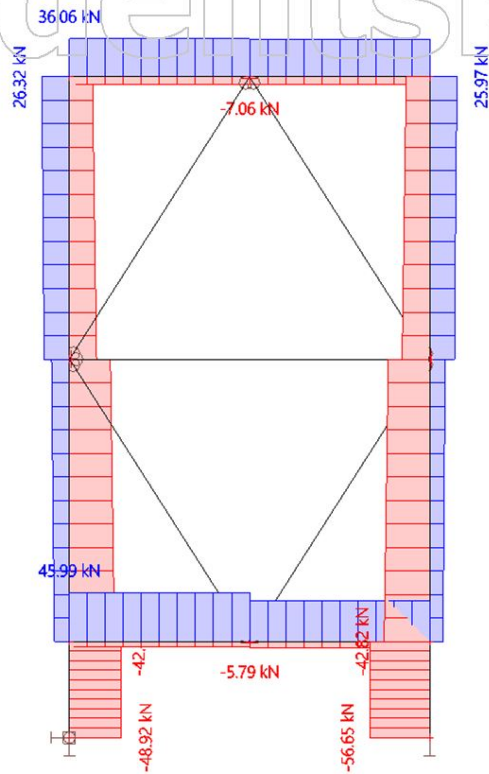
Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: Vše

Filtr: Vrstva = Vrstva1



## 2. 1D vnitřní síly; V\_z

Hodnoty: V<sub>z</sub>

Lineární výpočet

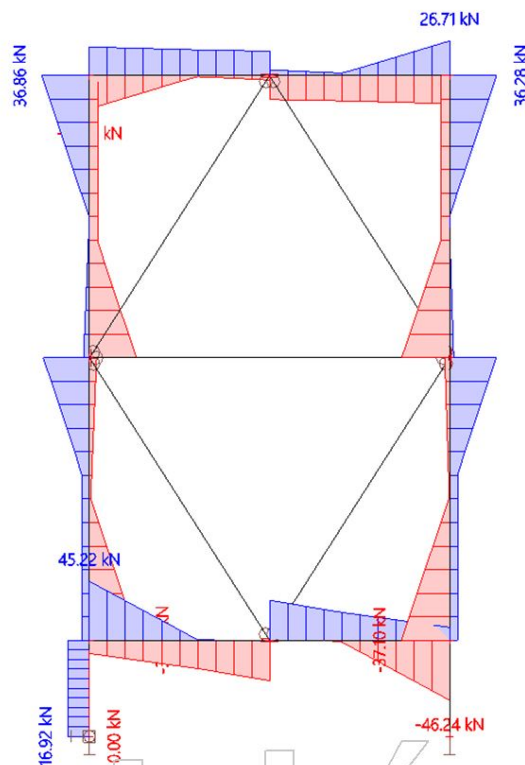
Třída: MSÚ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

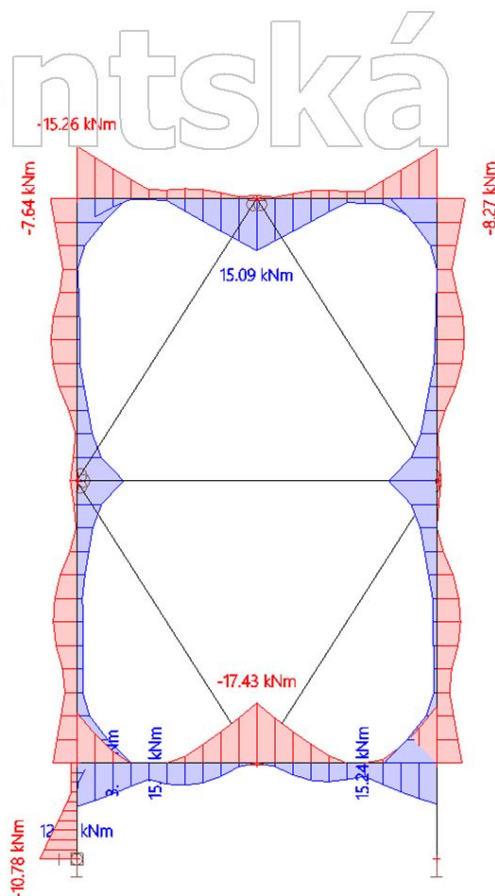
Výběr: Vše

Filtr: Vrstva = Vrstva1



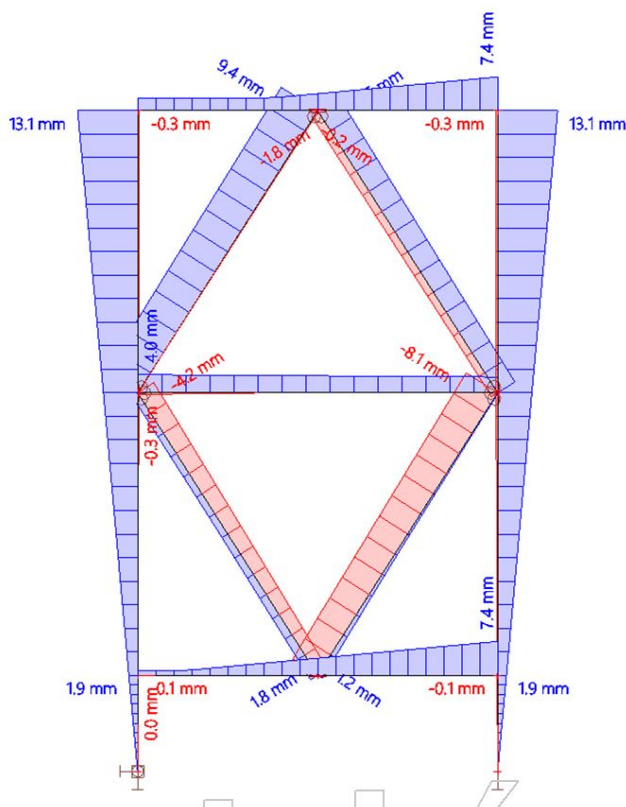
### 3. 1D vnitřní síly; $M_y$

Hodnoty:  $M_y$   
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: Vše  
Filtr: Vrstva = Vrstva1



### 4. 1D deformace; $u_x$

Hodnoty:  $u_x$   
Lineární výpočet  
Třída: MSÚ\_MSP  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Dílec  
Výběr: B602..B605, pricel 27,  
B606..B615, pricel 28, B616..B621



## 5. 1D deformace; $u_z$

Hodnoty:  $M_z$

Lineární výpočet

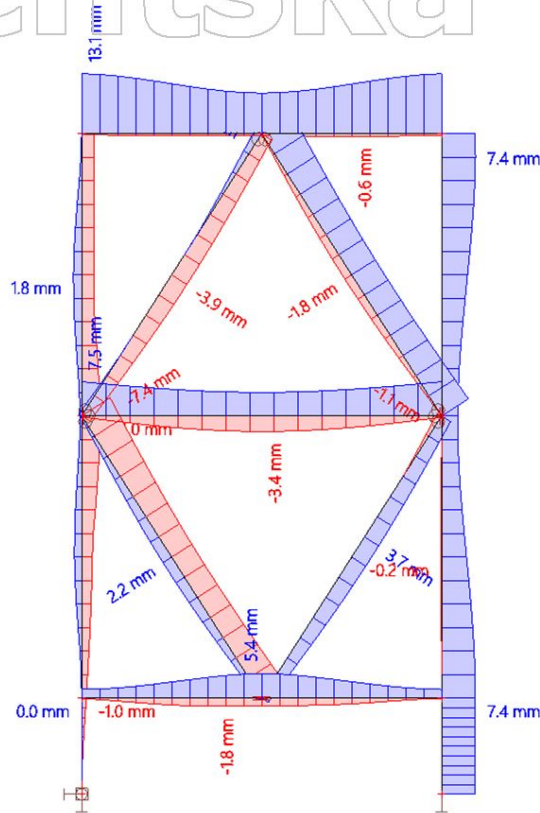
Třída: MSJ\_MSP

Souřadný systém: Hlavní

Extrém 1D: Dílec

Výběr: B602..B605, pricel 27,

B606..B615, pricel 28, B616..B621



Studentská verze

Studentská verze

# **PŘÍLOHA Č. 5**

OPTIMALIZACE V PROGRAMOVACÍM JAZYCE PYTHON

## Python\_main.py

```

1 import vypocty as vp
2 import bouleni as bou
3 import csv
4
5 # Ohybovy moment v kNm
6 M_ed_kNm = input("Zadej ohybovy moment [kN*m]: ")
7 M_ed = float(M_ed_kNm) * 10**3
8
9 # Mez kluzu v MPa
10 f_y = 235
11 f_yd = f_y * 10**6
12
13 # Prurezovy modul
14 Wy_min = M_ed/f_yd
15
16 # Funkce pro generovani desetinnych cisel s urcitym krokem
17 def float_range(start, stop, step):
18     while start < stop:
19         yield round(start, 1) # Zaokrouhleni na jedno desetinne misto
20         start += step
21
22 # PODMINKY PRO 1.ITERACI PROFILU
23 tloustka_min = 1
24 tloustka_max = 3.1
25 tloustka_krok = 0.1
26 tloustka_range = list(float_range(tloustka_min, tloustka_max, tloustka_krok))
27
28 delka_AB_min = 30 #0
29 delka_AB_max = 85 #80
30 delka_AB_krok = 5
31 delka_AB_range = range(delka_AB_min, delka_AB_max, delka_AB_krok)
32
33 delka_CD_min = 0
34 delka_CD_max = 150 #150
35 delka_CD_krok = 5
36 delka_CD_range = range(delka_CD_min, delka_CD_max, delka_CD_krok)
37
38
39 # Array
40 vyhovujici_profily = []
41
42 # 1.iterace vyhodnoceni
43 for tl in tloustka_range:
44     for AB in delka_AB_range:
45         for CD in delka_CD_range:
46             result = vp.vyhodnotProfil(tl, AB, CD, f_yd, Wy_min, M_ed)
47             if type(result) != bool:
48                 vyhovujici_profily.append(result)
49
50 # export csv file pro 1. iteraci
51 with open('vyhovujici_profily.csv', mode='w') as csvfile:
52     fieldnames = vyhovujici_profily[0].keys()
53     writer = csv.DictWriter(csvfile, fieldnames=fieldnames, delimiter=',', lineterminator=
54     '\n' )
55     writer.writeheader()
56     for row in vyhovujici_profily:
57         print(row)
58         writer.writerow(row)

```

```

58
59
60
61 # FILTROVANI PROFILU NA BOULENI
62 profilCount = 0
63 failCount = 0
64 vyboulene_profilu = []
65 for profil in vyhovujici_profilu:
66     print(f"Profil: {profil['tloustka [m]']}, {profil["AB [m]"]}, {profil["CD [m]"]}")
67     profilCount += 1
68     try:
69         result = bou.posudekBouleni(profil['tloustka [m]'], profil["AB [m]"], profil["CD [m]
70     ], M_ed)
71         result["m_profil"] = profil["m_profil [kg/m]"]
72         vyboulene_profilu.append(result)
73     except Exception:
74         print("\t## Profil byl vyrazen.")
75         failCount += 1
76         continue
77
78 if(len(vyboulene_profilu) > 0):
79     # print(vyboulene_profilu)
80     with open('vyboulene_profilu.csv', mode='w') as csvfile:
81         fieldnames = vyboulene_profilu[0].keys()
82         writer = csv.DictWriter(csvfile, fieldnames=fieldnames, delimiter=',',
83         lineterminator='\n')
84         writer.writeheader()
85         for row in vyboulene_profilu:
86             print(row)
87             writer.writerow(row)
88
89 else:
90     print("!!! Zadne profily nevyhovely.")
91
92 # PODMINKY PRO BOULENI
93 import math
94
95 ## Zatrizeni profilu
96 def ZatrizeniPasnice (c, t, epsilon):
97     pomer = c / t
98     if pomer <= 9 * epsilon:
99         trida_pasnice = ("trida pasnice: 1")
100        return trida_pasnice
101        print(trida_pasnice)
102    elif 9 * epsilon < pomer <= 10 * epsilon:
103        trida_pasnice = ("trida pasnice: 2")
104        return trida_pasnice
105    elif 10 * epsilon < pomer <= 14 * epsilon:
106        trida_pasnice = ("trida pasnice: 3")
107        return trida_pasnice
108    else:
109        trida_pasnice = ("trida pasnice: 4")
110        return trida_pasnice
111
112 def ZatrizeniStojiny(c, t, epsilon):
113     pomer = c / t
114     if pomer <= 9 * epsilon:
115         trida_w = ("trida w: 1")
116     elif 9 * epsilon < pomer <= 10 * epsilon:

```

```

116         trida_w = ("trida w: 2")
117     elif 10 * epsilon < pomer <= 14 * epsilon:
118         trida_w = ("trida w: 3")
119     else:
120         trida_w = ("trida w: 4")
121     return trida_w
122
123
124 ### 5.1. UCINNY PRUREZ
125 def k_sigma_VyztuhaTlacena(pomer_delek_vyztuhy_pasnice):
126     # Soucinitel kritickeho napeti (rovnomerny prubeh napeti na vyztuze)
127     if pomer_delek_vyztuhy_pasnice <= 0.35:
128         return 0.5
129     elif 0.35 < pomer_delek_vyztuhy_pasnice <= 0.6:
130         return 0.5 + 0.83 * ((pomer_delek_vyztuhy_pasnice-0.35)**2)**1/3
131     elif pomer_delek_vyztuhy_pasnice > 0.6:
132         # CSN EN 1993-1-5: Tabulka 4.2 - Precnivajici tlacene casti
133         # pokud pomer vyjde mimo limitni hodnotu 0.6, uvazuje se soucinitel kritickeho
napeti = 0.43
134         return 0.43
135
136 def k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi):
137     if psi == 1.0:
138         return 4.0
139     elif 1 > psi > 0:
140         return 8.2 / (1.05 + psi)
141     elif psi == 0:
142         return 7.81
143     elif 0 > psi > -1:
144         return 7.81 - 6.29 * psi + 9.78 * psi**2
145     elif psi == -1:
146         return 23.9
147     elif -1 > psi > -3:
148         return 5.98 * (1 - psi)**2
149     else:
150         raise Exception("ERROR psi !")
151
152 def lambda_p_PomernaStihlost(b, t, epsilon, k_sigma):
153     lambda_ = (b/t) / (28.4 * epsilon * math.sqrt(k_sigma))
154     return lambda_
155
156 # Soucinitel bouleni pro PRECNIVAJICI TLACENE CASTI - redukni soucinitel pro jednostranne
podeprene steny
157 def rho_AB_SoucinitelBouleni(lambda_p_PomernaStihlost):
158     if lambda_p_PomernaStihlost <=0.748:
159         return 1.0
160     else:
161         rho = (lambda_p_PomernaStihlost - 0.188) / (lambda_p_PomernaStihlost**2)
162         return min(rho, 1.0)
163
164 def rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_PomernaStihlost, psi):
165     if lambda_p_PomernaStihlost <= 0.673:
166         return 1.0
167     else:
168         rho_f1 = (lambda_p_PomernaStihlost - 0.055*(3+psi)) / (lambda_p_PomernaStihlost**2)
169         if 0 < rho_f1 < 1.0 and (3+psi) > 0:
170             return rho_f1
171         if rho_f1 > 1.0:
172             return 1.0
173

```

```

174 def c_eff_VyztuhaTlacena(rho, b):
175     if rho <= 1.0:
176         return rho * b
177     elif rho > 1.0:
178         return rho * b
179
180 def ucinneSirky_TlacenPrurez(rho, b):
181     b_eff = rho * b
182     be1 = 0.5 * b_eff
183     be2 = 0.5 * b_eff
184     return [b_eff, be1, be2]
185
186 def ucinneSirky(psi, rho, b):
187     if psi == 1:
188         b_eff = rho * b
189         be1 = 0.5 * b_eff
190         be2 = 0.5 * b_eff
191     elif 1 > psi >= 0:
192         b_eff = rho * B
193         be1 = 2*b_eff / (5-psi)
194         be2 = b_eff - be1
195     elif psi < 0:
196         b_eff = rho * b / (1-psi)
197         be1 = 0.4*b_eff
198         be2 = 0.6*b_eff
199     else:
200         raise Exception("psi > 1")
201     return [b_eff, be1, be2]
202
203
204 ## 5.1.4. Distorzni vyboceni - pasnice
205 def momentSetrvacnostiPasnice (b, t, zc, z):
206     return 1/12 * b * t**3 + b * t * (zc - z)**2
207 def momentSetrvacnostiVyztuha (c_eff, t, zc, z):
208     return 1/12 * t * c_eff**3 + c_eff * t * (zc - z)**2
209
210 def deformacePerovaTuhost(t_1, v, h_max, CD, b_w1, b_w3, E):
211     I_f1 = t_1**3 / (12 * (1-v**2))
212     M_124 = (1/3) * h_max**3 + h_max**2 * b_w1 + (h_max - CD)**2 * b_w3/2
213     M_3 = (1/6) * ((h_max * (2*h_max + (h_max-CD)) + (h_max-CD) * (h_max + 2*(h_max-CD))))
214     *CD
215     return (1000/ (E * I_f1) * (M_124 + M_3))
216
217 def perovaTuhost (u, delta):
218     return u / delta
219
220 def PruzneKritickeNapetiVyboceni (K, E, Is, As):
221     return (2 * math.sqrt(K*E*Is)) / As
222
223 def PomernaStihlost_lambda_p (f_yb, sigma_crs):
224     return math.sqrt(f_yb/sigma_crs)
225
226 def lambda_d_PomernaStihlost(f_yb, sigma_crs):
227     return math.sqrt(f_yb / sigma_crs)
228
229 def chi_SoucinitelVzpernosti(lambda_d_PomernaStihlost):
230     if lambda_d_PomernaStihlost <= 0.65:
231         return 1.0
232     elif 0.65 < lambda_d_PomernaStihlost < 1.38:
233         return 1.47 - 0.723 * lambda_d_PomernaStihlost

```



```

233     elif lambda_d_PomernaStihlost >= 1.38:
234         return 0.66 / lambda_d_PomernaStihlost
235     else:
236         raise Exception("chi < 0 !")
237
238 def redukovanaPlocha(chi, As):
239     if chi == 1.0:
240         return As
241     elif chi < 1.0:
242         return chi * As
243     return chi * As
244
245 def redukovanaTloustka(chi, t, As_red, As):
246     if chi < 1.0:
247         return t * As_red / As
248     elif chi == 1.0:
249         return t
250
251 ## 5.1.5. Distorzni vyboceni - stojina
252 def momentSetrvacnosti_w1_w3 (b, t, zc, z):
253     return 1/12 * b * t**3 + b * t * (zc - z)**2
254 def momentSetrvacnosti_w2 (b, t, zc, z):
255     return 1/12 * t * b**3 + b * t * (zc - z)**2
256
257 def deformacePerovaTuhost_Stojina (u, b1, b2, v, t, E):
258     return (u * b1**2 * b2**2 * 12*(1-v**2)) / (3 * (b1 + b2)* E * t**3)
259
260
261 ## 5.2. UCINNY PRUREZ PRI KLADNEM MOMENTU KOLEM OSY Y
262 def psi_pomerKoncovychNapetiKladnyMoment_Pasnice(z_Tc, h_max):
263     b_tah = h_max - abs(z_Tc)
264     b_tlak = abs(z_Tc)
265     psi = b_tah / -b_tlak
266     return psi
267
268 def psi_pomerKoncovychNapetiKladnyMoment_W2(z_Tc, b_w2, sigma_W1):
269     if abs(z_Tc) > b_w2:
270         sigma_1_tlak_vetsi = sigma_W1
271         sigma_2_tlak_mensi = (sigma_1_tlak_vetsi) * (abs(z_Tc) - b_w2) / b_w2
272         psi = sigma_2_tlak_mensi / sigma_1_tlak_vetsi
273     else: #abs(z_Tc) < b_w2:
274         b_tlak = abs(z_Tc)
275         b_tah = b_w2 - b_tlak
276         psi = b_tah / -b_tlak
277     return psi
278
279 def sigma_com_Ed_W3_KladnyMoment(z_Tc, b_w2, sigma_W1):
280     if abs(z_Tc) > b_w2:
281         sigma_1_tlak_vetsi = sigma_W1
282         sigma_2_tlak_mensi = (sigma_1_tlak_vetsi / b_w2) * (abs(z_Tc) - b_w2)
283         sigma_w3 = sigma_2_tlak_mensi
284     else:
285         b_tlak = abs(z_Tc)
286         b_tah = b_w2 - b_tlak
287         sigma_tah_w3 = sigma_W1 * (b_tah / -b_tlak)
288         sigma_w3 = sigma_tah_w3
289     return sigma_w3
290
291 def psi_pomerKoncovychNapetiZapornyMoment_Pasnice(z_Tc, h_max):
292     b_tah = abs(z_Tc)

```

```

293     b_tlak = h_max - abs(z_Tc)
294     psi = b_tah / -b_tlak
295     return psi
296
297 def psi_pomerKoncovychNapetiZapornyMoment_W2(z_Tc, b_w2, sigma_W1):
298     if abs(z_Tc) > b_w2:
299         sigma_1_tah_vetsi = sigma_W1
300         sigma_2_tah_mensi = (sigma_1_tah_vetsi) * (abs(z_Tc) - b_w2) / b_w2
301         psi = sigma_2_tah_mensi / sigma_1_tah_vetsi
302     else: #abs(z_Tc) < b_w2:
303         b_tah = abs(z_Tc)
304         b_tlak = b_w2 - b_tah
305         psi = b_tah / -b_tlak
306     return psi
307
308 def redukovanaPomernaStihlost(lambda_p, sigma_com_Ed, f_y, gama_M0):
309     return lambda_p * math.sqrt(abs(sigma_com_Ed) / (f_y/gama_M0))
310
311
312 ## 5.4. VZPER
313 def i_PolomerSetrvacnosti(I, A_eff):
314     return math.sqrt(I / A_eff)
315
316 def lambda_1_Vzper_PomernaStihlost(epsilon):
317     return 93.9 * epsilon
318
319 def lambda_Vzper_PomernaStihlost(L_cr, i_polomer_setrvacnosti, A_eff, Ac, lambda_1):
320     return (L_cr / i_polomer_setrvacnosti) * (math.sqrt(A_eff/Ac) / lambda_1)
321
322 def fi_SoucinitelVzperu(alfa, lambda_vzper):
323     return 0.5 * (1 + alfa * (lambda_vzper - 0.2) + lambda_vzper**2)
324
325 def chi_vzper(fi, lambda_vzper):
326     return 1 / (fi + math.sqrt(fi**2 - lambda_vzper**2))
327
328 def nb_Rd_tlak(chi, A_eff, f_y, gama_M1):
329     return (1/gama_M1) * (chi * A_eff * f_y)
330
331 def posudek_tlak(F_Ed, F_Rd):
332     vyuziti = F_Ed / F_Rd
333     if vyuziti < 1.0:
334         print(f"\tProfil vyhoví pro tlak s vyuzitim: {vyuziti*100:.2f} %")
335         return vyuziti
336     else: # vyuziti > 1.0:
337         message = "\tPROFIL NEVYHOVI PRO TLAK"
338         print(message)
339         raise Exception(message)
340
341 def posudek_KladnyOhybovyMoment(F_Ed, F_Rd):
342     vyuziti = F_Ed / F_Rd
343     if vyuziti < 1.0:
344         print(f"\tProfil vyhoví pro My+ s vyuzitim: {vyuziti*100:.2f} %")
345         return vyuziti
346     else: # vyuziti > 1.0:
347         message = "\tPROFIL NEVYHOVI PRO My+"
348         print(message)
349         raise Exception(message)
350
351 def posudek_ZapornyOhybovyMoment(F_Ed, F_Rd):
352     vyuziti = F_Ed / F_Rd

```

```
353     if vyuziti < 1.0:
354         print(f"\tProfil vyhovi pro My- s vyuzitim: {vyuziti*100:.2f} %")
355         return vyuziti
356     else: # vyuziti > 1.0:
357         message = "\tPROFIL NEVYHOVI PRO My-"
358         print(message)
359         raise Exception(message)
360
361 def posudek_KladnyOhybTlak(N_Ed, Nb_Rd, M_Ed, delta_M, M_Rd):
362     posudek = ((N_Ed / Nb_Rd)**0.8) + (((M_Ed + delta_M) / M_Rd)**0.8)
363     if posudek < 1.0:
364         print(f"\tProfil vyhovi pro tlak + My+ s vyuzitim: {posudek*100:.2f} %")
365         return posudek
366     else:
367         message = "\tPROFIL NEVYHOVI NA TLAK + My+ 0 {(posudek - 1)*100:.2f} %"
368         print(f"{message}")
369         raise Exception(message)
370
371 def posudek_ZapornyOhybTlak(N_Ed, Nb_Rd, M_Ed, delta_M, M_Rd):
372     posudek = ((N_Ed / Nb_Rd)**0.8) + (((M_Ed + delta_M) / M_Rd)**0.8)
373     if posudek < 1.0:
374         print(f"\tProfil vyhovi pro tlak + My- s vyuzitim: {posudek*100:.2f} %")
375         return posudek
376     else:
377         print(f"\tPROFIL NEVYHOVI NA TLAK + My- 0 {(posudek - 1)*100:.2f} %")
378
379 def my_Rd_MomentUnosnosti(W_eff, f_y, gama_M1):
380     return (1/gama_M1) * (W_eff * f_y)
381
382 def delta_M(eN, M_Ed):
383     return eN * M_Ed
```

## Python2\_bouleni.py

```

1  import math
2  import bouleni_podminky as bp
3  import section_properties as ch
4  import a_plny_prurez as pp
5  import a_eff_tlak as aet
6  import a_eff_m1 as aem1
7  import a_eff_m2 as aem2
8
9
10 def posudekBouleni(t_1, AB, CD, M_Ed):
11     # Materialove vlastnosti
12     E = 210 * 10 ** 9      # (Pa) modul pruznosti
13     f_y = 235 * 10 ** 6   # (Pa) mez kluzu oceli S235
14     f_yb = f_y
15
16     # Soucinitele
17     gama_M0 = 1.0
18     gama_M1 = 1.0
19     epsilon = math.sqrt(235 * 10 ** 6 / f_y)
20
21     # Rozmery ramu
22     H = 4.7               # (m) vyska konstrukce ramoveho sloupu
23     B = 1.35             # (m) sirka ramu = delka pricle
24     # print(B)
25
26     # Rozmery profilu
27     h_max = 0.15         # (m) delka pasnice
28     b_max = 0.4          # (m) maximalni delka stojiny
29     r_1 = 0.003         # (m) polomer zaobleni
30
31     # Vnitрни vyztuha
32     b_w1 = 0.12
33     b_w2 = CD
34     b_w3 = 0.16
35
36     # Rozmery vnitрни vyztuhy pro zatrideni
37     c_w1 = b_w1
38     c_w2 = b_w2
39     c_w3 = b_w3
40
41     # Distorzni vybozeni
42     v = 0.3
43     u = 1000
44
45     # Vzper
46     alfa_b = 0.34
47
48     ## analyzuj_Tlak
49     [c_eff_AB, b_eff_f1, be1_f1, be2_f1, t_red_f1, be1_w1, be2_w1, b_eff_w2, be1_w2, be2_w2,
50     be1_w3, be2_w3, t_red_w, lambda_p_w1, lambda_p_w2, lambda_p_w3] = analyzuj_tlak(
51         E, f_yb, epsilon, h_max, t_1, AB, CD, r_1, b_w1, b_w2, b_w3, c_w1, c_w2, c_w3)
52
53     # Prurezove charakteristiky - plny prurez
54     [Ac_plnyPrurez, z_Tc, Iy_c, Wy] = pp.prurezPlny(h_max, b_max, t_1, AB, CD, b_w1, b_w3,
55     be1_f1, be1_w1, be1_w2, be1_w3, be2_f1, be2_w1, be2_w3)

```

```

56 [A_eff_tlak, z_Tc_tlak, Iy_c_tlak, Wy_tlak] = aet.prurezTlak(h_max, b_max, t_1, AB, CD,
r_1, b_w1, b_w2, b_w3, c_w1, c_w2, c_w3, c_eff_AB, b_eff_f1, b_eff_w2, be1_f1, be1_w1,
be1_w2, be1_w3, be2_f1, be2_w1, be2_w2, be2_w3, t_red_f1, t_red_w)
57
58 e_N_PosunTeziste = posunTezistove0sy(z_Tc=z_Tc, z_Tc_tlak=z_Tc_tlak)
59 # print(round(e_N_PosunTeziste*1000,2), "mm")
60
61 ## analyzuj_KladnyOhybovyMoment
62 [c_eff_AB_m1, b_eff_f_m1, be1_f_m1, be2_f_m1, psi_f_m1, be1_w1_m1, be2_w1_m1,
b_eff_w2_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1, be1_w3_m1, be2_w3_m1, lambda_p_w1, lambda_p_w2,
lambda_p_w3, t_red_f_m1, t_red_w_m1] = analyzuj_KladnyOhybovyMoment(E, f_y, f_yb, gama_M0,
epsilon, h_max, t_1, AB, CD, b_w1, b_w2, b_w3, z_Tc, lambda_p_w1, lambda_p_w2, lambda_p_w3,
63 u, v)
64
65 # Prurezove charakteristiky - kladny ohybovy moment
66 [A_eff_m1, z_Tc_m1, Iy_c_m1, Wy_m1] = aem1.prurez_m1(z_Tc, h_max, b_max, t_1, CD, b_w2,
b_w3, c_eff_AB_m1, be1_f_m1, be2_f_m1, be1_w1_m1, be2_w1_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1,
be1_w3_m1, be2_w3_m1, t_red_f_m1, t_red_w_m1)
67
68 # analyzuj_ZapornyOhybovyMoment
69 [c_eff_AB_m2, b_eff_f_m2, be1_f_m2, be2_f_m2, t_red_f_m2, t_red_w_m2, b_eff_w1_m2,
be1_w1_m2, be2_w1_m2, b_eff_w2_m2, be1_w2_m2, be2_w2_m2, b_eff_w3_m2, be1_w3_m2, be2_w3_m2]
= analyzuj_ZapornyOhybovyMoment(b_w2, f_y, E, f_yb, epsilon,
70 h_max, t_1, AB,
71 CD, b_w1, b_w3,
72 z_Tc, v, u, gama_M0, lambda_p_w2, lambda_p_w3)
73
74 # Prurezove charakteristiky - zaporny ohybovy moment
75 [A_eff_m2, z_Tc_m2, Iy_c_m2, Wy_m2] = aem2.prurez_m2(z_Tc, h_max, b_max, t_1, CD, b_w2,
b_w3, c_eff_AB_m2, be1_f_m2, be2_f_m2, be1_w1_m2, be2_w1_m2, be1_w2_m2, be2_w2_m2,
be1_w3_m2, be2_w3_m2, t_red_f_m2, t_red_w_m2)
76
77 ## VZPER
78 [chi_vzper, N_b_Rd, vyuziti_N, My_Rd_m1, vyuziti_m1, My_Rd_m2, vyuziti_m2, tlak_ohyb_m1,
tlak_ohyb_m2] = analyzuj_Vzper(Iy_c_m1, Iy_c_m2, z_Tc, z_Tc_tlak, B, alfa_b, epsilon,
A_eff_tlak, Iy_c_tlak, Ac_plnyPrurez, f_y, gama_M1, Wy_m1, Wy_m2, M_Ed)
79
80 # return {"t_1":t_1*1000, "AB":AB*1000, "CD":CD*1000, "A_eff_tlak":A_eff_tlak*10**6, "
Iy_c_m2":Iy_c_m2*10**12, "vyuziti N": vyuziti_N*100, "vyuziti My+": vyuziti_m1*100, "vyuziti
My-": vyuziti_m2*100, "vyuziti N+My+": tlak_ohyb_m1*100, "vyuziti N+My-": tlak_ohyb_m2*100,}
81 return {"c_eff_AB":c_eff_AB*1000, "c_eff_AB_m1":c_eff_AB_m1*1000, "c_eff_AB_m2"
:c_eff_AB_m2*1000, "Ac_plnyPrurez": Ac_plnyPrurez*10**6, "A_eff_tlak":A_eff_tlak*10**6, "
A_eff_m1":A_eff_m1*10**6, "A_eff_m2":A_eff_m2*10**6, "Iy_c": Iy_c*10**12, "Iy_c_tlak"
:Iy_c_tlak*10**12, "Iy_c_m1":Iy_c_m1*10**12, "Iy_c_m2":Iy_c_m2*10**12, "Wy":Wy*10**9, "
Wy_tlak":Wy_tlak*10**9, "Wy_m1":Wy_m1*10**9, "Wy_m2":Wy_m2*10**9, "t_1":t_1*1000, "AB"
:AB*1000, "CD":CD*1000, "N_b_Rd":N_b_Rd*10**-3, "My_Rd_m1":My_Rd_m1*10**-3, "My_Rd_m2"
:My_Rd_m2*10**-3, "z_Tc": z_Tc*1000}
82 # return {"c_eff_AB":c_eff_AB*1000, "c_eff_AB_m1":c_eff_AB_m1*1000, "c_eff_AB_m2"
:c_eff_AB_m2*1000, "Ac_plnyPrurez": Ac_plnyPrurez*10**6, "A_eff_tlak":A_eff_tlak*10**6, "
A_eff_m1":A_eff_m1*10**6, "A_eff_m2":A_eff_m2*10**6, "Iy_c": Iy_c*10**12, "Iy_c_tlak"
:Iy_c_tlak*10**12, "Iy_c_m1":Iy_c_m1*10**12, "Iy_c_m2":Iy_c_m2*10**12, "Wy":Wy*10**9, "
Wy_tlak":Wy_tlak*10**9, "Wy_m1":Wy_m1*10**9, "Wy_m2":Wy_m2*10**9, "t_1":t_1*1000, "AB"
:AB*1000, "CD":CD*1000, "N_b_Rd":N_b_Rd*10**-3, "My_Rd_m1":My_Rd_m1*10**-3, "My_Rd_m2"
:My_Rd_m2*10**-3, "z_Tc": z_Tc*1000, "pomer_Iy": Iy_c_m2/Iy_c, "t_new":(Iy_c_m2/Iy_c)
*t_1*1000}
83
84 # return {"c_eff_AB":c_eff_AB*1000, "Wy_tlak":Wy_tlak*10**9, "c_eff_AB_m1"
:c_eff_AB_m1*1000, "c_eff_AB_m2":c_eff_AB_m2*1000, "Ac_plnyPrurez": Ac_plnyPrurez*10**6, "
A_eff_tlak":A_eff_tlak*10**6, "A_eff_m1":A_eff_m1*10**6, "A_eff_m2":A_eff_m2*10**6, "Iy_c":
Iy_c*10**12, "Iy_c_tlak":Iy_c_tlak*10**12, "Iy_c_m1":Iy_c_m1*10**12, "Iy_c_m2"
:Iy_c_m2*10**12, "t_1":t_1*1000, "AB":AB*1000, "CD":CD*1000, "N_b_Rd":N_b_Rd*10**-3, "
My_Rd_m1":My_Rd_m1*10**-3, "My_Rd_m2":My_Rd_m2*10**-3, "z_Tc": z_Tc*1000, "pomer_Iy":
Iy_c_m2/Iy_c, "t_new":(Iy_c_m2/Iy_c)*t_1*1000}
85
86
87

```

```

88  ### Posouzeni pricle ramu na bouleni CSN EN 1993-1-5
89
90  def lokalniBouleniAB(AB, h_max, t_1, epsilon):
91      psi_AB = 1.0 # dle tabulky 4.2 CSN EN 1993-1-5
92      # Soucinitel kritického napeti pro vyztuhu "k_sigma"
93      pomer_delek_vyztuhy_pasnice = AB / h_max
94      k_sigma_AB = bp.k_sigma_VyztuhaTlacena(pomer_delek_vyztuhy_pasnice)
95      # Pomerna stihlost vyztuhy "lambda_p"
96      lambda_p_AB = bp.lambda_p_PomernaStihlost(AB, t_1, epsilon, k_sigma_AB)
97      # Soucinitel bouleni pro PRECNIVAJICI TLACENE CASTI - redukni soucinitel pro
jednostranne podeprene steny
98      rho_AB = bp.rho_AB_SoucinitelBouleni(lambda_p_AB)
99      # Ucinna sirka vyztuhy AB
100     c_eff_AB = bp.c_eff_VyztuhaTlacena(rho_AB, AB)
101     return c_eff_AB
102
103  def lokalniBouleniPasnice(h_max, t_1, epsilon):
104     # Pomer koncovych napeti pro rovnomerny tlak po cele sirce
105     psi_f1 = 1.0
106     # Soucinitel kritického napeti k_sigma
107     k_sigma_f1 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_f1)
108     # Pomerna stihlost pasnice
109     lambda_p_f1 = bp.lambda_p_PomernaStihlost(h_max, t_1, epsilon, k_sigma_f1)
110     # # Soucinitel bouleni pro VNITRNI TLACENE CASTI - redukni soucinitel pro oboustranne
podeprene steny
111     rho_f1 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_f1, psi_f1)
112     # Ucinne sirky pasnice f1
113     [b_eff_f1, be1_f1, be2_f1] = bp.ucinneSirky_TlacenyPrurez(rho_f1, h_max)
114     return [b_eff_f1, be1_f1, be2_f1]
115
116  def lokalniBouleniStojina(h_max, b_w1, b_w2, b_w3, t_1, epsilon):
117     # # Pomer koncovych napeti pro rovnomerny tlak po cele sirce
118     psi_w1 = 1.0
119     psi_w2 = 1.0 # dle tabulky 4.2 CSN EN 1993-1-5
120     psi_w3 = 1.0
121
122     # Soucinitel kritického napeti k_sigma
123     k_sigma_w1 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_w1)
124     k_sigma_w2 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_w2)
125     k_sigma_w3 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_w3)
126     # Pomerna stihlost w1, w2, w3
127     lambda_p_w1 = bp.lambda_p_PomernaStihlost(b_w1, t_1, epsilon, k_sigma_w1)
128     lambda_p_w2 = bp.lambda_p_PomernaStihlost(b_w2, t_1, epsilon, k_sigma_w2)
129     lambda_p_w3 = bp.lambda_p_PomernaStihlost(b_w3, t_1, epsilon, k_sigma_w3)
130     # Soucinitel bouleni pro VNITRNI TLACENE CASTI - redukni soucinitel pro oboustranne
podeprene steny
131     rho_w1 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w1, psi_w1)
132     rho_w2 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w2, psi_w2)
133     rho_w3 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w3, psi_w3)
134     # Ucinna sirka w1, w2, w3
135     [b_eff_w1, be1_w1, be2_w1] = bp.ucinneSirky_TlacenyPrurez(rho_w1, b_w1)
136     [b_eff_w2, be1_w2, be2_w2] = bp.ucinneSirky_TlacenyPrurez(rho_w2, b_w2)
137     [b_eff_w3, be1_w3, be2_w3] = bp.ucinneSirky_TlacenyPrurez(rho_w3, b_w3)
138
139     return [be1_w1, be2_w1, b_eff_w1, be1_w2, be2_w2, b_eff_w2, be1_w3, be2_w3, b_eff_w3,
lambda_p_w1, lambda_p_w2, lambda_p_w3]
140
141  def distorzniVybozeniPasnice(b_p_f1, be2_f1, c_eff_AB, t_1, E, f_yb, v, u, h_max, CD, b_w1,
b_w3):
142     # Ucinna prurezova plocha "A_s"
143     A1_f1 = ch.plocha_dilci(be2_f1, t_1)

```

```

144     A2_f1 = ch.plocha_dilci(c_eff_AB, t_1)
145     As_f1 = ch.celkova_plocha(A1_f1, A2_f1)
146     # Souradnice
147     y1_f1 = be2_f1/2
148     y2_f1 = be2_f1
149     z1_f1 = 0
150     z2_f1 = c_eff_AB/2
151     #Teziste
152     yc_f1 = (y1_f1*A1_f1 + y2_f1*A2_f1) / As_f1
153     zc_f1 = (z1_f1*A1_f1 + z2_f1*A2_f1) / As_f1
154     # Moment setrvacnosti - pasnice
155     Is1_f1 = bp.momentSetrvacnostiPasnice(be2_f1, t_1, zc_f1, z1_f1)
156     Is2_f1 = bp.momentSetrvacnostiVyztuha(c_eff_AB, t_1, zc_f1, z2_f1)
157     Is_f1 = Is1_f1 + Is2_f1
158     # Perova tuhost K
159     delta_f1 = bp.deformacePerovaTuhost(t_1, v, h_max, CD, b_w1, b_w3, E)
160     K_f1 = bp.perovaTuhost(u, delta_f1)
161     sigma_crs_f1 = bp.PruzneKritickeNapetiVybozeni(K_f1, E, Is_f1, As_f1)
162     lambda_d_f1 = bp.lambda_d_PomernaStihlost(f_yb, sigma_crs_f1)
163     chi_d_f1 = bp.chi_SoucinitelVzpernosti(lambda_d_f1)
164     # Redukovana ucinna plocha a tloustka
165     As_red_f1 = bp.redukovanaPlocha(chi_d_f1, As_f1)
166     t_red_f1 = bp.redukovanaTloustka(chi_d_f1, t_1, As_red_f1, As_f1)
167
168     return t_red_f1
169
170 def distorzniVybozeniStojina(be2_w1, be1_w2, be2_w2, b_eff_w2, be2_w3, t_1, b_w2, b_w3, E,
171 f_yb, v, u):
172     # Ucinna prurezova plocha "A_s"
173     A1_w = ch.plocha_dilci(be2_w1, t_1)
174     A2a_w = ch.plocha_dilci(be1_w2, t_1)
175     A2b_w = ch.plocha_dilci(be2_w2, t_1)
176     A3_w = ch.plocha_dilci(be2_w3, t_1)
177     A4_w = A3_w
178     A5a_w = A2a_w
179     A5b_w = A2b_w
180     A6_w = A1_w
181     As_w = 2* (A1_w + A2a_w + A2b_w + A3_w)
182
183     # Teziste
184     y1_w = -(b_w3/2 + be2_w1/2)
185     y2a_w = -b_w3/2
186     y2b_w = -b_w3/2
187     y3_w = -(b_w3/2 - be2_w3/2)
188     y4_w = -y3_w
189     y5a_w = -y2a_w
190     y5b_w = -y2b_w
191     y6_w = -y1_w
192
193     z1_w = 0
194     z2a_w = -(be1_w2/2)
195     z2b_w = -(b_w2 - be2_w2/2)
196     z3_w = -b_w2
197     z4_w = z3_w
198     z5a_w = z2a_w
199     z5b_w = z2b_w
200     z6_w = z1_w
201
202     Ay1_w = ch.Ay_OsaY(A1_w, y1_w)
203     Ay2a_w = ch.Ay_OsaY(A2a_w, y2a_w)

```

```

203 Ay2b_w = ch.Ay_OsaY(A2b_w, y2b_w)
204 Ay3_w = ch.Ay_OsaY(A3_w, y3_w)
205 Ay4_w = -Ay3_w
206 Ay5a_w = -Ay2a_w
207 Ay5b_w = -Ay2b_w
208 Ay6_w = -Ay1_w
209
210 Az1_w = ch.Az_OsaZ(A1_w, z1_w)
211 Az2a_w = ch.Az_OsaZ(A2a_w, z2a_w)
212 Az2b_w = ch.Az_OsaZ(A2b_w, z2b_w)
213 Az3_w = ch.Az_OsaZ(A3_w, z3_w)
214 Az4_w = Az3_w
215 Az5a_w = Az2a_w
216 Az5b_w = Az2b_w
217 Az6_w = Az1_w
218
219 # # Teziste
220 yc_w = (1/As_w) * (Ay1_w + Ay2a_w + Ay2b_w + Ay3_w + Ay4_w + Ay5a_w + Ay5b_w + Ay6_w)
221 zc_w = (1/As_w) * (Az1_w + Az2a_w + Az2b_w + Az3_w + Az4_w + Az5a_w + Az5b_w + Az6_w)
222 # Moment setrvacnosti - stojina
223 Is1_w = bp.momentSetrvacnosti_w1_w3(be2_w1, t_1, zc_w, z1_w)
224 Is2a_w = bp.momentSetrvacnosti_w2(be1_w2, t_1, zc_w, z2a_w)
225 Is2b_w = bp.momentSetrvacnosti_w2(be2_w2, t_1, zc_w, z2b_w)
226 Is3_w = bp.momentSetrvacnosti_w1_w3(be2_w3, t_1, zc_w, z3_w)
227 Is_w = 2 * (Is1_w + Is2a_w + Is2b_w + Is3_w)
228
229 # # perova tuhost K pro stojinu
230 # u = 1000 # N/m
231 b1_w = b_w3 / 2
232 b2_w = b1_w
233
234 delta_w = bp.deformacePerovaTuhost_Stojina(u, b1_w, b2_w, v, t_1, E)
235 K_w = bp.perovaTuhost(u,delta_w)
236 sigma_crs_w = bp.PruzneKritickeNapetiVybozeni(K_w, E, Is_w, As_w)
237 lambda_d_w = bp.lambda_d_PomernaStihlost(f_yb, sigma_crs_w)
238 # Reduckni soucinitel vzpernosti pro unosnost v distorzni vybozeni
239 chi_d_w = bp.chi_SoucinitelVzpernosti(lambda_d_w)
240 # Redukovana ucinna plocha a tloustka
241 As_red_w = bp.redukovanaPlocha(chi_d_w, As_w)
242 t_red_w = bp.redukovanaTloustka(chi_d_w, t_1, As_red_w, As_w)
243
244 return t_red_w
245
246 ## 5.1. UCINNY PRUREZ V TLAKU
247 def analyzuj_tlak(E, f_yb, epsilon, h_max, t_1, AB, CD, r_1, b_w1, b_w2, b_w3, c_w1, c_w2,
248 c_w3):
249     # Zatrizeni prurezu - pasnice
250     c_f1 = h_max - 2 * r_1
251     zatrizeni_pasnice = bp.ZatrizeniPasnice(c_f1, t_1, epsilon)
252     # Zatrizeni prurezu - stojina rozdelena na 3 casti (w1, w2, w3)
253     zatrizeni_w1 = bp.ZatrizeniStojiny(c_w1, t_1, epsilon)
254     zatrizeni_w2 = bp.ZatrizeniStojiny(c_w2, t_1, epsilon)
255     zatrizeni_w3 = bp.ZatrizeniStojiny(c_w3, t_1, epsilon)
256
257     # 5.1.1. LOKALNI BOULENI - VYZTUHA AB
258     c_eff_AB = lokalniBouleniAB(AB, h_max, t_1, epsilon)
259     # 5.1.2. LOKALNI BOULENI - PASNICE
260     [b_eff_f1, be1_f1, be2_f1] = lokalniBouleniPasnice(h_max, t_1, epsilon)
261     # 5.1.3. LOKALNI BOULENI - STOJINA
262     [be1_w1, be2_w1, b_eff_w1, be1_w2, be2_w2, b_eff_w2, be1_w3, be2_w3, b_eff_w3,
lambda_p_w1, lambda_p_w2, lambda_p_w3] = lokalniBouleniStojina(h_max, b_w1, b_w2, b_w3, t_1,

```



```

epsilon)
262
263     # 5.1.4. DISTORZNI VYBOCENI - PASNICE
264     # Perova tuhost K
265     v = 0.3
266     u = 1000          # N/m
267     b_p_f1 = h_max
268     t_red_f1 = distorzniVyboцениPasnice(b_p_f1, be2_f1, c_eff_AB, t_1, E, f_yb, v, u, h_max,
CD, b_w1, b_w3)
269
270     # 5.1.5. DISTORZNI VYBOCENI STOJINY
271     t_red_w = distorzniVyboцениStojina(be2_w1, be1_w2, be2_w2, b_eff_w2, be2_w3, t_1, b_w2,
b_w3, E, f_yb, v, u)
272     return [c_eff_AB, b_eff_f1, be1_f1, be2_f1, t_red_f1, be1_w1, be2_w1, b_eff_w2, be1_w2,
be2_w2, be1_w3, be2_w3, t_red_w, lambda_p_w1, lambda_p_w2, lambda_p_w3]
273
274 ## 5.1.7. POSUN TEZISTOVE OSY V TLAKU
275 def posunTezistoveOsy(z_Tc, z_Tc_tlak):
276     e_N_PosunTeziste = abs(z_Tc_tlak - z_Tc)
277     return e_N_PosunTeziste
278
279 ## 5.2. UCINNY PRUREZ PRI KLADNEM MOMENTU KOLEM OSY Y
280 def lokalniBouleniAB_M1(AB):
281     rho_AB_m1 = 1.0
282     c_eff_AB_m1 = bp.c_eff_VyztuhaTlacena(rho_AB_m1, AB)
283     return c_eff_AB_m1
284
285 def lokalniBouleniPasnice_M1(h_max, z_Tc, t_1, epsilon):
286     b_tah_f1 = h_max - abs(z_Tc)
287     b_tlak_f1 = abs(z_Tc)
288     psi_f_m1 = b_tah_f1 / (-b_tlak_f1)
289     k_sigma_f_m1 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_f_m1)
290     lambda_pf_m1 = bp.lambda_p_PomernaStihlost(h_max, t_1, epsilon, k_sigma_f_m1)
291     rho_f_m1 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_pf_m1, psi_f_m1)
292     # Ucinna plocha a sirka
293     [b_eff_f_m1, be1_f_m1, be2_f_m1] = bp.ucinneSirky(psi_f_m1, rho_f_m1, h_max)
294     return [b_eff_f_m1, be1_f_m1, be2_f_m1, psi_f_m1]
295
296 def lokalniBouleni_W1_M1(f_y, gama_M0, b_w1, psi_f_m1, lambda_p_w1):
297     psi_w1_m1 = 1.0
298     k_sigma_w1_m1 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_w1_m1)
299     sigma_com_Ed_m1 = f_y / psi_f_m1
300     lambda_p_w1_red_m1 = bp.redukovanaPomernaStihlost(lambda_p_w1, sigma_com_Ed_m1, f_y,
gama_M0)
301     rho_w1_m1 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w1_red_m1, psi_w1_m1)
302     [b_eff_w1_m1, be1_w1_m1, be2_w1_m1] = bp.ucinneSirkyTlacenyPrurez(rho_w1_m1, b_w1)
303     return [b_eff_w1_m1, be1_w1_m1, be2_w1_m1, sigma_com_Ed_m1]
304
305 def lokalniBouleni_W2_M1(z_Tc, b_w2, sigma_com_Ed_m1, lambda_p_w2, f_y, gama_M0):
306     psi_w2_m1 = bp.psi_pomerKoncovychNapetiKladnyMoment_W2(z_Tc, b_w2, sigma_com_Ed_m1)
307     k_sigma_w2_m1 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_w2_m1)
308     lambda_p_w2_m1 = bp.redukovanaPomernaStihlost(lambda_p_w2, sigma_com_Ed_m1, f_y,
gama_M0)
309     rho_w2_m1 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w2_m1, psi_w2_m1)
310     [b_eff_w2_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1] = bp.ucinneSirky(psi_w2_m1, rho_w2_m1, b_w2)
311     return [b_eff_w2_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1]
312
313 def lokalniBouleni_W3_M1(z_Tc, b_w2, b_w3, sigma_com_Ed_m1, lambda_p_w3, f_y, gama_M0):
314     psi_w3_m1 = 1.0
315     sigma_com_Ed_w3_m1 = bp.sigma_com_Ed_W3_KladnyMoment(z_Tc, b_w2, sigma_com_Ed_m1)
316     lambda_p_w3_m1 = bp.redukovanaPomernaStihlost(lambda_p_w3, sigma_com_Ed_w3_m1, f_y,

```

```

gama_M0)
317     rho_w3_m1 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w3_m1, psi_w3_m1)
318     [b_eff_w3_m1, be1_w3_m1, be2_w3_m1] = bp.ucinneSirky_TlacenyPrurez(rho_w3_m1, b_w3)
319     return [b_eff_w3_m1, be1_w3_m1, be2_w3_m1]
320
321 def distorzniVyboceniPasnice_M1(b_p_f1, be2_f_m1, c_eff_AB_m1, t_1, E, f_yb, v, u, h_max,
CD, b_w1, b_w3):
322     # # Ucinna prurezova plocha "A_s"
323     A1_f_m1 = ch.plocha_dilci(be2_f_m1, t_1)
324     A2_f_m1 = ch.plocha_dilci(c_eff_AB_m1, t_1)
325     As_f_m1 = ch.celkova_plocha(A1_f_m1, A2_f_m1)
326     chi_d_f_m1 = 1.0 # nedochazi k distorzniemu vyboceni pasnice v tlacene casti
327     As_red_f_m1 = bp.redukovanaPlocha(chi_d_f_m1, As_f_m1)
328     t_red_f_m1 = bp.redukovanaTloustka(chi_d_f_m1, t_1, As_red_f_m1, As_f_m1)
329     return t_red_f_m1
330
331 def distorzniVyboceniStojina_M1(z_Tc, be2_w1_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1, be2_w3_m1, t_1, b_w2,
b_w3, E, f_yb, u, v):
332     be2_w2_m1 = (b_w2 - abs(z_Tc) + be2_w2_m1)
333     # Ucinna prurezova plocha "A_s"
334     A1_w = ch.plocha_dilci(be2_w1_m1, t_1)
335     A2a_w = ch.plocha_dilci(be1_w2_m1, t_1)
336     A2b_w = ch.plocha_dilci(be2_w2_m1, t_1)
337     A3_w = ch.plocha_dilci(be2_w3_m1, t_1)
338     A4_w = A3_w
339     A5a_w = A2a_w
340     A5b_w = A2b_w
341     A6_w = A1_w
342     As_w = 2* (A1_w + A2a_w + A2b_w + A3_w)
343     # Teziste
344     y1_w = -(b_w3/2 + be2_w1_m1/2)
345     y2a_w = -b_w3/2
346     y2b_w = -b_w3/2
347     y3_w = -(b_w3/2 - be2_w3_m1/2)
348     y4_w = -y3_w
349     y5a_w = -y2a_w
350     y5b_w = -y2b_w
351     y6_w = -y1_w
352     z1_w = 0
353     z2a_w = -(be1_w2_m1/2)
354     z2b_w = -(b_w2 - be2_w2_m1/2)
355     z3_w = -b_w2
356     z4_w = z3_w
357     z5a_w = z2a_w
358     z5b_w = z2b_w
359     z6_w = z1_w
360     Ay1_w = ch.Ay_OsaY(A1_w, y1_w)
361     Ay2a_w = ch.Ay_OsaY(A2a_w, y2a_w)
362     Ay2b_w = ch.Ay_OsaY(A2b_w, y2b_w)
363     Ay3_w = ch.Ay_OsaY(A3_w, y3_w)
364     Ay4_w = -Ay3_w
365     Ay5a_w = -Ay2a_w
366     Ay5b_w = -Ay2b_w
367     Ay6_w = -Ay1_w
368     Az1_w = ch.Az_OsaZ(A1_w, z1_w)
369     Az2a_w = ch.Az_OsaZ(A2a_w, z2a_w)
370     Az2b_w = ch.Az_OsaZ(A2b_w, z2b_w)
371     Az3_w = ch.Az_OsaZ(A3_w, z3_w)
372     Az4_w = Az3_w
373     Az5a_w = Az2a_w

```

```

374     Az5b_w = Az2b_w
375     Az6_w = Az1_w
376     # # Teziste
377     yc_w = (1/As_w) * (Ay1_w + Ay2a_w + Ay2b_w + Ay3_w + Ay4_w + Ay5a_w + Ay5b_w + Ay6_w)
378     zc_w = (1/As_w) * (Az1_w + Az2a_w + Az2b_w + Az3_w + Az4_w + Az5a_w + Az5b_w + Az6_w)
379     # Moment setrvacnosti - stojina
380     Is1_w = bp.momentSetrvacnosti_w1_w3(be2_w1_m1, t_1, zc_w, z1_w)
381     Is2a_w = bp.momentSetrvacnosti_w2(be1_w2_m1, t_1, zc_w, z2a_w)
382     Is2b_w = bp.momentSetrvacnosti_w2(be2_w2_m1, t_1, zc_w, z2b_w)
383     Is3_w = bp.momentSetrvacnosti_w1_w3(be2_w3_m1, t_1, zc_w, z3_w)
384     Is_w = 2 * (Is1_w + Is2a_w + Is2b_w + Is3_w)
385     # # perova tuhost K pro stojinu
386     b1_w = b_w3 / 2
387     b2_w = b1_w
388     delta_w = bp.deformacePerovaTuhostStojina(u, b1_w, b2_w, v, t_1, E)
389     K_w = bp.perovaTuhost(u,delta_w)
390     sigma_crs_w = bp.PruzneKritickeNapetiVyboceni(K_w, E, Is_w, As_w)
391     lambda_d_w = bp.lambda_d_PomernaStihlost(f_yb, sigma_crs_w)
392     # Reduckni soucinitel vzpernosti pro unosnost v distorzni vyboceni
393     chi_d_w = bp.chi_SoucinitelVzpernosti(lambda_d_w)
394     # Redukovana ucinna plocha a tloustka
395     As_red_w_m1 = bp.redukovanaPlocha(chi_d_w, As_w)
396     t_red_w_m1 = bp.redukovanaTloustka(chi_d_w, t_1, As_red_w_m1, As_w)
397     return t_red_w_m1
398
399 def analyzuj_KladnyOhybovyMoment(E, f_y, f_yb, gama_M0, epsilon, h_max, t_1, AB, CD, b_w1,
b_w2, b_w3, z_Tc,
400                                     lambda_p_w1, lambda_p_w2, lambda_p_w3, u, v):
401     ## 5.2.1. LOKALNI BOULENI - VYZTUHA nebouli
402     c_eff_AB_m1 = lokalniBouleniAB_M1(AB)
403     ## 5.2.2. LOKALNI BOULENI - PASNICE
404     [b_eff_f_m1, be1_f_m1, be2_f_m1, psi_f_m1] = lokalniBouleniPasnice_M1(h_max, z_Tc, t_1,
epsilon)
405     ## 5.2.3. LOKALNI BOULENI - W1
406     [b_eff_w1_m1, be1_w1_m1, be2_w1_m1, sigma_com_Ed_m1] = lokalniBouleni_W1_M1(f_y,
gama_M0, b_w1, psi_f_m1, lambda_p_w1)
407     ## 5.2.4. LOKALNI BOULENI - W2
408     [b_eff_w2_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1] = lokalniBouleni_W2_M1(z_Tc, b_w2, sigma_com_Ed_m1,
lambda_p_w2, f_y, gama_M0)
409     ## 5.2.5. LOKALNI BOULENI - W3
410     [b_eff_w3_m1, be1_w3_m1, be2_w3_m1] = lokalniBouleni_W3_M1(z_Tc, b_w2, b_w3,
sigma_com_Ed_m1, lambda_p_w3, f_y, gama_M0)
411     # t_red_f1 = distorzniVyboceniPasnice(h_max, be2_f_m1, c_eff_AB_m1, t_1, E, f_yb, v, u)
412     t_red_f_m1 = distorzniVyboceniPasnice_M1(h_max, be1_f_m1, c_eff_AB_m1, t_1, E, f_yb, v,
u, h_max, CD, b_w1, b_w3)
413     ## 5.5.6. DISTORZNI VYBOCENI - STOJINA
414     t_red_w_m1 = distorzniVyboceniStojina_M1(z_Tc, be2_w1_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1,
be2_w3_m1, t_1, b_w2, b_w3, E, f_yb, u, v)
415     return [c_eff_AB_m1, b_eff_f_m1, be1_f_m1, be2_f_m1, psi_f_m1, be1_w1_m1, be2_w1_m1,
b_eff_w2_m1, be1_w2_m1, be2_w2_m1, be1_w3_m1, be2_w3_m1, lambda_p_w1, lambda_p_w2,
lambda_p_w3, t_red_f_m1, t_red_w_m1]
416
417
418 ## 5.3. UCINNY PRUREZ PRI ZAPORNEM MOMENTU KOLEM OSY Y
419 def lokalniBouleniAB_M2(b_p_f1, b_p_c, t_1, epsilon):
420     # Soucinitel kritickeho napeti k_sigma (rovnomerny prubeh napeti na vyztuze)
421     psi_AB = 1.0 # dle tabulky 4.2 CSN EN 1993-1-5
422     pomer_delek_vyztuhy_pasnice = b_p_c / b_p_f1
423     k_sigma_AB_m2 = bp.k_sigma_VyztuhaTlacena(pomer_delek_vyztuhy_pasnice)
424     lambda_p_AB_m2 = bp.lambda_p_PomernaStihlost(b_p_c, t_1, epsilon, k_sigma_AB_m2)
425     # Soucinitel bouleni pro PRECNIVAJICI TLACENE CASTI - redukni soucinitel pro
jednostranne podeprene steny

```

```

426     rho_AB_m2 = bp.rho_AB_SoucinitelBouleni(lambda_p_AB_m2)
427     c_eff_AB_m2 = bp.c_eff_VyztuhaTlacena(rho_AB_m2, b_p_c)
428     return c_eff_AB_m2
429
430 def lokalniBouleniPasnice_M2(h_max, z_Tc, t_1, epsilon):
431     b_cf_m2 = h_max - abs(z_Tc)
432     b_tf_m2 = abs(z_Tc)
433     # Pomer koncovych napeti
434     psi_f_m2 = b_tf_m2 / (-b_cf_m2)
435     k_sigma_f_m2 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_f_m2)
436     lambda_pf_m2 = bp.lambda_p_PomernaStihlost(h_max, t_1, epsilon, k_sigma_f_m2)
437     rho_f_m2 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_pf_m2, psi_f_m2)
438     [b_eff_f_m2, be1_f_m2, be2_f_m2] = bp.ucinneSirky(psi_f_m2, rho_f_m2, h_max)
439     return [b_eff_f_m2, be1_f_m2, be2_f_m2, psi_f_m2]
440
441 def distorzniVybeceniPasnice_M2(be1_f_m2, c_eff_AB_m2, t_1, E, f_yb, v, u, h_max, CD, b_w1,
442     b_w3):
443     # Ucinna prurezova plocha "A_s"
444     A1_f_m2 = ch.plocha_dilci(be1_f_m2, t_1)
445     A2_f_m2 = ch.plocha_dilci(c_eff_AB_m2, t_1)
446     As_f_m2 = ch.celkova_plocha(A1_f_m2, A2_f_m2)
447     # Souradnice
448     y1_f_m2 = be1_f_m2/2
449     y2_f_m2 = be1_f_m2
450     z1_f_m2 = 0
451     z2_f_m2 = c_eff_AB_m2/2
452     #Teziste
453     yc_f_m2 = (y1_f_m2*A1_f_m2 + y2_f_m2*A2_f_m2) / As_f_m2
454     zc_f_m2 = (z1_f_m2*A1_f_m2 + z2_f_m2*A2_f_m2) / As_f_m2
455     # Moment setrvacnosti - pasnice
456     Is1_f_m2 = bp.momentSetrvacnostiPasnice(be1_f_m2, t_1, zc_f_m2, z1_f_m2)
457     Is2_f_m2 = bp.momentSetrvacnostiVyztuha(c_eff_AB_m2, t_1, zc_f_m2, z2_f_m2)
458     Is_f_m2 = Is1_f_m2 + Is2_f_m2
459     # # Perova tuhost K
460     delta_f_m2 = bp.deformacePerovaTuhost(t_1, v, h_max, CD, b_w1, b_w3, E)
461     K_f_m2 = bp.perovaTuhost(u, delta_f_m2)
462     sigma_crs_f_m2 = bp.PruzneKritickeNapetiVybeceni(K_f_m2, E, Is_f_m2, As_f_m2)
463     lambda_d_f_m2 = bp.lambda_d_PomernaStihlost(f_yb, sigma_crs_f_m2)
464     chi_d_f_m2 = bp.chi_SoucinitelVzpernosti(lambda_d_f_m2)
465     # Redukovana ucinna plocha a tloustka
466     As_red_f_m2 = bp.redukovanaPlocha(chi_d_f_m2, As_f_m2)
467     t_red_f_m2 = bp.redukovanaTloustka(chi_d_f_m2, t_1, As_red_f_m2, As_f_m2)
468     return t_red_f_m2
469
470 # LOKALNI BOULENI STOJINA M2
471 def lokalniBouleni_W1_M2(b_w1):
472     rho_w1_m2 = 1.0
473     [b_eff_w1_m2, be1_w1_m2, be2_w1_m2] = bp.ucinneSirky_TlacenyPrurez(rho_w1_m2, b_w1)
474     return [b_eff_w1_m2, be1_w1_m2, be2_w1_m2]
475
476 def lokalniBouleni_W2_M2(f_y, h_max, z_Tc, b_w2, lambda_p_w2, gama_M0):
477     b_tah_w2 = abs(z_Tc)
478     b_tlak_w2 = b_w2 - b_tah_w2
479     sigma_f_tlak = - f_y
480     sigma_f_tah = sigma_f_tlak * (z_Tc / (h_max - abs(z_Tc)))
481     sigma_w1_tah = sigma_f_tah
482     sigma_w2_tah = sigma_w1_tah
483     sigma_w2_tlak = sigma_w2_tah * (-b_tlak_w2 / b_tah_w2)
484     sigma_com_Ed_w2 = max(abs(sigma_w2_tah), abs(sigma_w2_tlak))
485     psi_w2_m2 = sigma_w2_tlak / sigma_w2_tah

```

```

485     k_sigma_w2_m2 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_w2_m2)
486     lambda_p_w2_red_m2 = bp.redukovanaPomernaStihlost(lambda_p_w2, sigma_com_Ed_w2, f_y,
gama_M0)
487     rho_w2_m2 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w2_red_m2, psi_w2_m2)
488     [b_eff_w2_m2, be2_w2_m2, be1_w2_m2] = bp.ucinneSirky(psi_w2_m2, rho_w2_m2, b_w2)
489     return [b_eff_w2_m2, be1_w2_m2, be2_w2_m2, sigma_w2_tlak]
490
491 def lokalniBouleni_W3_M2(b_w3, sigma_w2_tlak, lambda_p_w3, f_y, gama_M0):
492     psi_w3_m2 = 1.0
493     k_sigma_w3_m2 = bp.k_sigma_SoucinitelKritickehoNapeti(psi_w3_m2)
494     sigma_com_Ed_w3 = sigma_w2_tlak
495     # Redukovana pomerna stihlost
496     lambda_p_w3_m3 = bp.redukovanaPomernaStihlost(lambda_p_w3, sigma_com_Ed_w3, f_y,
gama_M0)
497     rho_w3_m2 = bp.rho_SoucinitelBouleni(lambda_p_w3_m3, psi_w3_m2)
498     [b_eff_w3_m2, be1_w3_m2, be2_w3_m2] = bp.ucinneSirky(psi_w3_m2, rho_w3_m2, b_w3)
499     return [b_eff_w3_m2, be1_w3_m2, be2_w3_m2]
500
501 def distorzniVybeceniStojina_M2(z_Tc, be2_w1_m2, be1_w2_m2, be2_w2_m2, be2_w3_m2, t_1, b_w2,
b_w3, E, f_yb, u, v):
502     be1_w2_m2 = abs(z_Tc) + be1_w2_m2
503     # Ucinna prurezova plocha "A_s"
504     A1_w = ch.plocha_dilci(be2_w1_m2, t_1)
505     A2a_w = ch.plocha_dilci(be1_w2_m2, t_1)
506     A2b_w = ch.plocha_dilci(be2_w2_m2, t_1)
507     A3_w = ch.plocha_dilci(be2_w3_m2, t_1)
508     A4_w = A3_w
509     A5a_w = A2a_w
510     A5b_w = A2b_w
511     A6_w = A1_w
512     As_w = 2* (A1_w + A2a_w + A2b_w + A3_w)
513     # Teziste
514     y1_w = -(b_w3/2 + be2_w1_m2/2)
515     y2a_w = -b_w3/2
516     y2b_w = -b_w3/2
517     y3_w = -(b_w3/2 - be2_w3_m2/2)
518     y4_w = -y3_w
519     y5a_w = -y2a_w
520     y5b_w = -y2b_w
521     y6_w = -y1_w
522     z1_w = 0
523     z2a_w = -(be1_w2_m2/2)
524     z2b_w = -(b_w2 - be2_w2_m2/2)
525     z3_w = -b_w2
526     z4_w = z3_w
527     z5a_w = z2a_w
528     z5b_w = z2b_w
529     z6_w = z1_w
530     Ay1_w = ch.Ay_OsaY(A1_w, y1_w)
531     Ay2a_w = ch.Ay_OsaY(A2a_w, y2a_w)
532     Ay2b_w = ch.Ay_OsaY(A2b_w, y2b_w)
533     Ay3_w = ch.Ay_OsaY(A3_w, y3_w)
534     Ay4_w = -Ay3_w
535     Ay5a_w = -Ay2a_w
536     Ay5b_w = -Ay2b_w
537     Ay6_w = -Ay1_w
538     Az1_w = ch.Az_OsaZ(A1_w, z1_w)
539     Az2a_w = ch.Az_OsaZ(A2a_w, z2a_w)
540     Az2b_w = ch.Az_OsaZ(A2b_w, z2b_w)
541     Az3_w = ch.Az_OsaZ(A3_w, z3_w)
542     Az4_w = Az3_w

```

```

543     Az5a_w = Az2a_w
544     Az5b_w = Az2b_w
545     Az6_w = Az1_w
546     # Teziste
547     yc_w = (1/As_w) * (Ay1_w + Ay2a_w + Ay2b_w + Ay3_w + Ay4_w + Ay5a_w + Ay5b_w + Ay6_w)
548     zc_w = (1/As_w) * (Az1_w + Az2a_w + Az2b_w + Az3_w + Az4_w + Az5a_w + Az5b_w + Az6_w)
549     # Moment setrvacnosti - stojina
550     Is1_w = bp.momentSetrvacnosti_w1_w3(be2_w1_m2, t_1, zc_w, z1_w)
551     Is2a_w = bp.momentSetrvacnosti_w2(be1_w2_m2, t_1, zc_w, z2a_w)
552     Is2b_w = bp.momentSetrvacnosti_w2(be2_w2_m2, t_1, zc_w, z2b_w)
553     Is3_w = bp.momentSetrvacnosti_w1_w3(be2_w3_m2, t_1, zc_w, z3_w)
554     Is_w = 2 * (Is1_w + Is2a_w + Is2b_w + Is3_w)
555     # perova tuhost K pro stojinu
556     b1_w = b_w3 / 2
557     b2_w = b1_w
558     delta_w = bp.deformacePerovaTuhostStojina(u, b1_w, b2_w, v, t_1, E)
559     K_w = bp.perovaTuhost(u,delta_w)
560     sigma_crs_w = bp.PruzneKritickeNapetiVybozeni(K_w, E, Is_w, As_w)
561     lambda_d_w = bp.lambda_d_PomernaStihlost(f_yb, sigma_crs_w)
562     # Reduckni soucinitel vzpernosti pro unosnost v distorzni vybozeni
563     chi_d_w = bp.chi_SoucinitelVzpernosti(lambda_d_w)
564     # Redukovana ucinna plocha a tloustka
565     As_red_w_m2 = bp.redukovanaPlocha(chi_d_w, As_w)
566     t_red_w_m2 = bp.redukovanaTloustka(chi_d_w, t_1, As_red_w_m2, As_w)
567     return t_red_w_m2
568
569 def analyzuj_ZapornyOhybovyMoment(b_w2, f_y, E, f_yb, epsilon, h_max, t_1, AB, CD, b_w1,
b_w3, z_Tc, v, u, gama_M0, lambda_p_w2, lambda_p_w3):
570     # 5.3.1. LOKALNI BOULENI - AB
571     c_eff_AB_m2 = lokalniBouleniAB_M2(h_max, AB, t_1, epsilon)
572     # 5.3.2. LOKALNI BOULENI - PASNICE
573     [b_eff_f_m2, be1_f_m2, be2_f_m2, psi_f_m2] = lokalniBouleniPasnice_M2(h_max, z_Tc, t_1,
epsilon)
574     ## 5.3.3. DISTORZNI VYBOZENI - PASNICE
575     t_red_f_m2 = distorzniVybozeniPasnice_M2(be1_f_m2, c_eff_AB_m2, t_1, E, f_yb, v, u,
h_max, CD, b_w1, b_w3)
576     # LOKALNI BOULENI - STOJINA
577     [b_eff_w1_m2, be1_w1_m2, be2_w1_m2] = lokalniBouleni_W1_M2(b_w1)
578     [b_eff_w2_m2, be1_w2_m2, be2_w2_m2, sigma_w2_tlak] = lokalniBouleni_W2_M2(f_y, h_max,
z_Tc, b_w2, lambda_p_w2, gama_M0)
579     [b_eff_w3_m2, be1_w3_m2, be2_w3_m2] = lokalniBouleni_W3_M2(b_w3, sigma_w2_tlak,
lambda_p_w3, f_y, gama_M0)
580     t_red_w_m2 = distorzniVybozeniStojina_M2(z_Tc, be2_w1_m2, be1_w2_m2, be2_w2_m2,
be2_w3_m2, t_1, b_w2, b_w3, E, f_yb, u, v)
581     return [c_eff_AB_m2, b_eff_f_m2, be1_f_m2, be2_f_m2, t_red_f_m2, t_red_w_m2,
b_eff_w1_m2, be1_w1_m2, be2_w1_m2, b_eff_w2_m2, be1_w2_m2, be2_w2_m2, b_eff_w3_m2,
be1_w3_m2, be2_w3_m2]
582
583 def vzperVstup(B, alfa_b, epsilon, A_eff_tlak, Iy_c_tlak, Ac_plnyPrurez):
584     alfa_b = 0.34
585     # Polomery setrvacnosti
586     i_y_t = bp.i_PolomerSetrvacnosti(Iy_c_tlak, A_eff_tlak)
587     # Pomerne stihlosti (L_cr = B)
588     lambda_1y_t = bp.lambda_1_Vzper_PomernaStihlost(epsilon)
589     lambda_y_t = bp.lambda_Vzper_PomernaStihlost(B, i_y_t, A_eff_tlak, Ac_plnyPrurez,
lambda_1y_t)
590     # Soucinitel vzperu
591     fi_y_t = bp.fi_SoucinitelVzperu(alfa_b, lambda_y_t)
592     chi_y_t = bp.chi_vzper(fi_y_t, lambda_y_t)
593     chi_vzper = min(1.0, chi_y_t)
594     return chi_vzper
595

```

```

596 def tlak_ohyb(z_Tc, z_Tc_tlak, chi_vzper, A_eff_tlak, f_y, gama_M1, Wy_m1, Wy_m2, M_Ed):
597     e_N_PosunTeziste = posunTezistoveOsy(z_Tc, z_Tc_tlak)
598     # Vnitřní síly SCIA
599     N_Ed = 42.85 * 10**3 # N
600     # posouzení tlak ohyb
601     N_b_Rd = bp.nb_Rd_tlak(chi_vzper, A_eff_tlak, f_y, gama_M1)
602     vyuziti_N = bp.posudek_tlak(N_Ed, N_b_Rd)
603     My_Rd_m1 = bp.my_Rd_MomentUnosnosti(Wy_m1, f_y, gama_M1)
604     vyuziti_m1 = bp.posudek_KladnyOhybovyMoment(M_Ed, My_Rd_m1)
605     My_Rd_m2 = bp.my_Rd_MomentUnosnosti(Wy_m2, f_y, gama_M1)
606     vyuziti_m2 = bp.posudek_ZapornyOhybovyMoment(M_Ed, My_Rd_m2)
607     # Kombinace ohyb + tlak
608     delta_M = bp.delta_M(e_N_PosunTeziste, N_Ed)
609     tlak_ohyb_m1 = bp.posudek_KladnyOhybTlak(N_Ed, N_b_Rd, M_Ed, delta_M, My_Rd_m1)
610     tlak_ohyb_m2 = bp.posudek_ZapornyOhybTlak(N_Ed, N_b_Rd, M_Ed, delta_M, My_Rd_m2)
611
612     return [N_b_Rd, vyuziti_N, My_Rd_m1, vyuziti_m1, My_Rd_m2, vyuziti_m2, tlak_ohyb_m1,
613            tlak_ohyb_m2]
614
615 def analyzuj_Vzper(Iy_c_m1, Iy_c_m2, z_Tc, z_Tc_tlak, B, alfa_b, epsilon, A_eff_tlak,
616 Iy_c_tlak, Ac_plnyPrurez, f_y, gama_M1, Wy_m1, Wy_m2, M_Ed):
617     chi_vzper = vzperVstup(B, alfa_b, epsilon, A_eff_tlak, Iy_c_tlak, Ac_plnyPrurez)
618     # TLAK, OHYB
619     [N_b_Rd, vyuziti_N, My_Rd_m1, vyuziti_m1, My_Rd_m2, vyuziti_m2, tlak_ohyb_m1,
620     tlak_ohyb_m2] = tlak_ohyb(z_Tc, z_Tc_tlak, chi_vzper, A_eff_tlak, f_y, gama_M1, Wy_m1,
621     Wy_m2, M_Ed)
622
623     print(A_eff_tlak, Iy_c_tlak, Iy_c_m1, Iy_c_m2)
624
625     return [chi_vzper, N_b_Rd, vyuziti_N, My_Rd_m1, vyuziti_m1, My_Rd_m2, vyuziti_m2,
626            tlak_ohyb_m1, tlak_ohyb_m2]

```