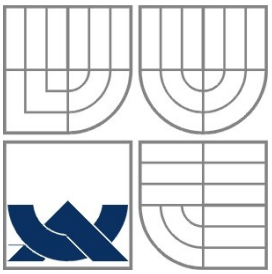


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

DEFORMAČNÍ, NAPJATOSTNÍ A PEVNOSTNÍ ANALÝZA RÁMOVÉ KONSTRUKCE

STRAIN, STRESS AND STRENGHT ANALYSIS OF THE FRAME CONSTRUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE JAROSLAV HRUBÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. RNDr. Ing. JAN VRBKA, DrSc.
SUPERVISOR

BRNO 2008

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá výpočtovým stanovením deformace, napjatosti a určením bezpečnosti obecného rovinného rámu zatíženého vektorovou veličinou tzn. silou F, jež v něm tuto deformaci a napjatost způsobuje. Cílem této práce není osvojení si používání nejmodernějších výpočetních programů ke stanovení této napjatosti a deformace, nýbrž naučit se prakticky využívat základních výpočtových metod obecné pružnosti a pevnosti a získání praktických zkušeností osvojením si těchto výpočtových metod.

KLÍČOVÁ SLOVA

Deformace, Napjatost, Energie, Moment, Pevnostní kontrola, Statická rovnováha, Řez, Rovinný rám, Síla

ABSTRACT

This work deals with the stress and strain calculation as well as with the safety evaluation at the plane (2-D) frame loaded by the individual force F. The aim of this work is not acquiring the use of cutting-edge computer programs to determine the stress and deformation, but to learn how to use practically the basic calculation methods being taught at the subject Strength of materials to get practical experience with the application of these calculation methods.

KEYWORDS

Strain, Stress, Energy, Moment, Strenght analysis, Static balance, Profile, Plane frame, Force

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRUBÝ, J. Deformační, napjatostní a pevnostní analýza rámové konstrukce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 80s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Deformační, napjatostní a pevnostní analýza a pevnostní analýza rámové konstrukce vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Ing. Jana Vrbky, DrSc. dr. h. c. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 20. Května 2008

_____

vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

V tomto odstavci bych chtěl především poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. RNDr. Ing. Janu Vrbkovi, DrSc. dr. h. c. za velmi cenné rady a připomínky, které mi udělil a také za jeho ochotu a obětavost. Dále bych poděkoval za cenné rady panu Doc. Ing. Miroslavu Suchánkovi, CSC a také soudnímu znalci Ing. Dušanu Hasoňovi.

OBSAH

ÚVOD **11**

1. ŘEŠENÝ PROBLÉM **12**

Nástin problému 13

2. VÝPOČET PŮSOBÍCÍCH SIL A URČENÍ PODMÍNEK SPOJITOSTI DEFORMACÍ **14**

výpočet nárazové síly F 14
Průřezové charakteristiky rámu 14
Volba souřadného systému, stanovení stykových sil a sestavení deformačních podmínek 15
Volba souřadného systému 16
Sestavení rovnic pro výpočet stykových sil: 17
Úplné uvolnění rámu 18
Částečné uvolnění rámu na úroveň úlohy staticky určité 19

3. STANOVENÍ VÝSLEDNÝCH SILOVÝCH ÚČINKŮ V ÚSECÍCH RÁMU NA ZÁKLADĚ ROVNIC ROVNOVÁHY UVOLNĚNÝCH PRVKŮ **20**

Úsek první (x1) 20
Úsek druhý (x2) 21
Úsek třetí (x3) 22
Úsek čtvrtý (x4) 23
Úsek pátý (x5) 24
Úsek šestý (x6) 25
Úsek sedmý (x7) 26
Úsek osmý (x8) 27
Úsek devátý (x9) 28
Úsek desátý (x10) 29
Úsek jedenáctý (x11) 30
Úsek dvanáctý (x12) 31
Úsek třináctý (x13) 32
Úsek čtrnáctý (x14) 33

4. DOSAZENÍ VZTAHŮ PRO OHYBOVÉ MOMENTY DO PODMÍNEK SPOJITOSTI DEFORMACÍ **34**

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C 34
Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě C 35
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C 36
Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B 37
Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě B 38
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B 39

5. INTEGRACE JEDNOTLIVÝCH PODMÍNEK SPOJITOSTI DEFORMACÍ **40**

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C 40
Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě C 41
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C 42
Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B 43
Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě B 44
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B 45

6. DOSAZENÍ MEZÍ DO PODMÍNEK SPOJITOSTI DEFORMACÍ PO INTEGRACI **46**

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C 46
Podmínka spojitosti deformace svislý posuv v bodě C 47
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C 48
Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B 49
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B 51

7. KONEČNÁ VERZE PODMÍNEK SPOJITOSTI DEFORMACÍ PO ALGEBRAICKÝCH ÚPRAVÁCH **52**

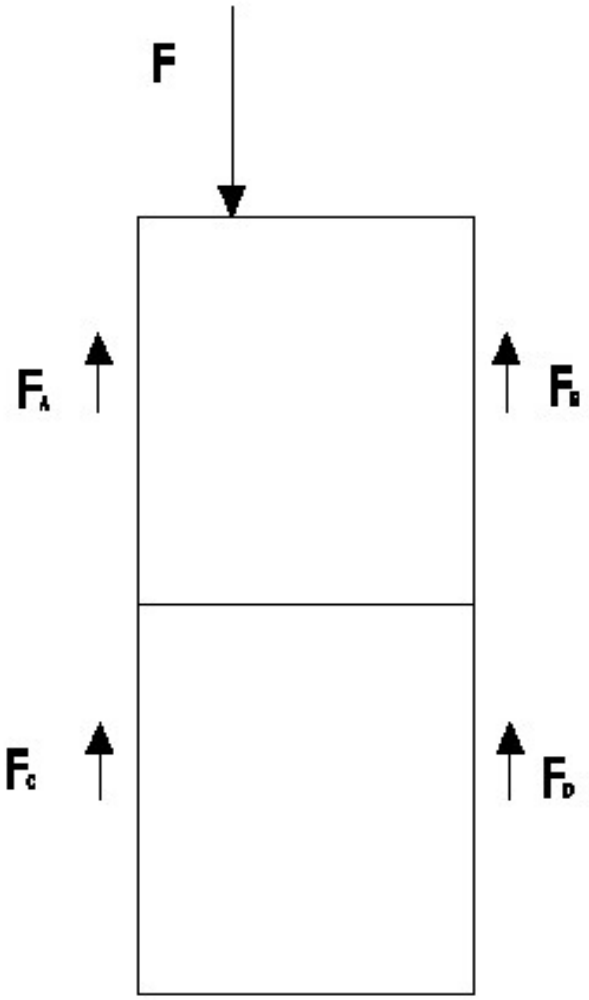
Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C....52
Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě C....52
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C....52
Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B....52
Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě B....53
Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B....53
8. ŘEŠENÍ SOUSTAVY ROVNIC POMOCÍ PROGRAMU MAPLE 54
9. PRŮBĚHY VNITŘNÍCH VÝSLEDNÝCH ÚČINKŮ (VVÚ)....55
Průběhy momentů....55
Průběhy tečných posouvajících sil....62
Průběhy normálových sil....69
10. PEVNOSTNÍ KONTROLA RÁMOVÉ KONSTRUKCE....76
ZÁVĚR....77
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ....78
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ....79
SEZNAM PŘÍLOH....80

ÚVOD

Současnou dobu je možno charakterizovat jako dobu technického rozvoje ve všech oblastech nevyjímaje strojírenství, jehož nedílnou součástí je výroba silničních motorových vozidel a jejich příslušenství.
Vysoké nároky, které jsou kladeny na výrobu, konstrukci, estetiku ale i ekonomiku silničních motorových vozidel jsou často v rozporu a je nutno hledat optimální řešení. Ve snaze o co nejekonomičtější výrobu a provoz je nutno volit materiály lehké a rozměrově nenáročné.
Tyto skutečnosti jsou však v rozporu s požadavky na zabezpečení pasivní bezpečnosti vozidel, jejich životnosti a odolnosti proti mechanickému poškození a hlavně proti působení vnějších nežádoucích sil a dynamických namáhání.
Pro hledání optimálního řešení je nezbytné mimo jiné znát průběhy namáhání, napjatosti a deformací, které vznikají při působení sil na danou soustavu. Ne vždy je možno pro dané řešení vzhledem k časovým podmínkám či materiálnímu vybavení využít pro řešení dané problematiky složitých výpočetních programů a ne vždy je to účelné. Proto jsem se ve své práci zaměřil na možnost aplikace a využití metod prosté pružnosti a pevnosti. Navíc tyto složité výpočetní programy v sobě skrývají použité teoretické principy a předpoklady, bez jejichž znalostí je potom používáme jako „černou skřínku“ bez možnosti jednoduchého ověření. Klasické přístupy prosté Pružnosti a pevnosti neztratily i v této moderní době svůj význam a používají se zejména při prvních přibližných pevnostních návrzích konstrukcí, nebo pro ověření správnosti výpočtů prováděných pomoci sofistikovaných numerických výpočtových metod, zejména Metody konečných prvků.
Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem považuji aplikaci metod prosté Pružnosti a pevnosti pro výpočtové stanovení deformace, napjatosti a pevnostní kontroly u jednoduché rámové konstrukce, jako první přibližný krok, k řešení dané problematiky. Podrobnější posouzení, zahrnující zejména dynamické efekty je možné provést následně pomocí Metody konečných prvků.

1. Řešený problém

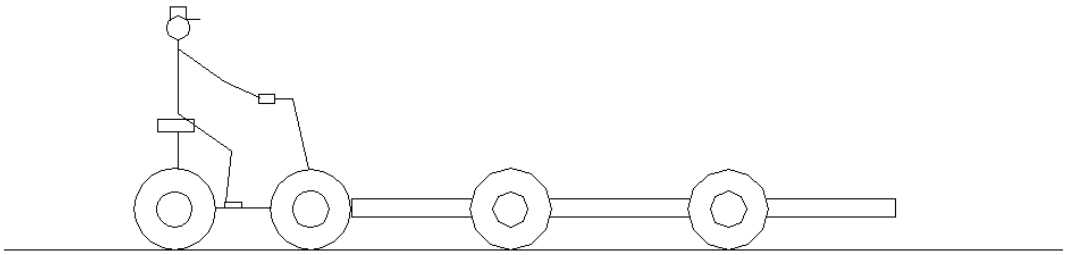
Předložená práce se zabývá napjatostní a pevnostní analýzou dvakrát uzavřeného rovinného rámu, zatíženého silou F způsobenou nárazem tělesa do čelní části rámu, viz. obrázek. Úlohu budeme řešit výpočetně na základě poznatků prosté Pružnosti a pevnosti.



Uzavřený rovinný rám zatížený silou *F*

Nástin problému

Vycházíme z následující modelové situace: Do zabrzděného vozíku narazí těleso, které zastaví nárazem o čelní stranu rámu. Těleso (např. motocykl) jede rychlostí v=50 km/hod a má hmotnost m=190 kg. Rychlost tělesa po rázu je 0 m/s. Situace je schematicky znázorněna na následujícím obrázku.



Zadané hodnoty (vstupní):

- rychlost motocyklu v = 50 km/h
- hmotnost motocyklu m = 190 kg
- doba nárazu t = 0,1 s

2. Výpočet působících sil a určení podmínek spojitosti deformací

Výpočet nárazové síly F

Při stanovení velikosti působící síly vyjdeme z Newtonova zákona o změně hybnosti v čase:

$$F = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{m \cdot v - m \cdot 0}{\Delta t} = \frac{m \cdot v}{\Delta t}$$

Kde Δt je doba trvání rázu. Podle ústního sdělení soudního znalce bývá tato doba 0,05-0,1 s. Pro náš výpočet budeme uvažovat hodnotu 0,1s
Po dosazení zadaných hodnot dostáváme

$$F = \frac{190 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{3600}}{0,1} = 26,4kN$$

Průřezové charakteristiky rámu

Je nutné si určit z jakého profilu je tento vozík vyroben a určit materiálové a statické charakteristiky tohoto profilu, jež jsou nutné k vlastnímu výpočtu.

tyč průřezu U třídy 11 válcovaná za tepla

materiál tyče 11 523

označení U180 s rozměry a statickými vlastnostmi (viz strojnické tabulky):

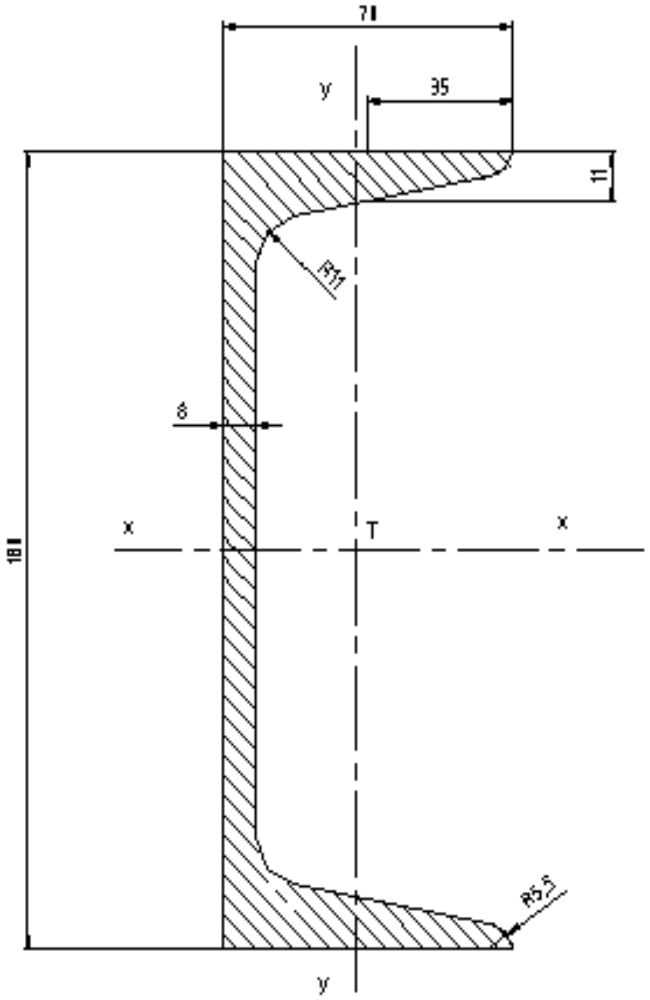
b = 70 mm
h = 180 mm
t_1 = 8 mm
t_2 = 11 mm
R = 11 mm
R_1 = 5,5 mm

- Re_{min} = 490 MPa minimální mez kluzu

- $J_Y = Jo = 114\ cm^4$ kvadratický moment
- $Wy = W_O = 22,4\ cm^3$ průřezový modul v ohybu

- $S = 28\ cm^4$ plocha průřezu

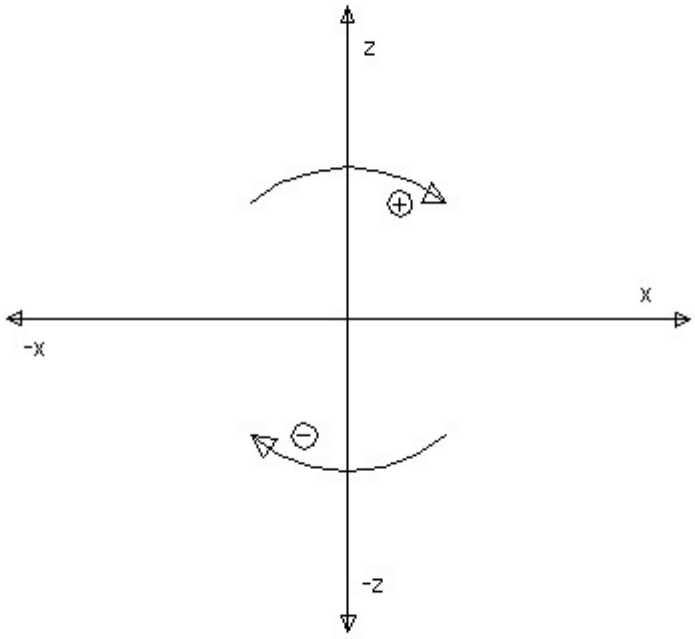
Náčrt:



Volba souřadného systému, stanovení stykových sil a sestavení deformačních podmínek

Nejprve si musíme určit stykové síly F_A, F_B, F_C a F_D od zabrzděných kol. Úlohu přitom zjednodušíme na únosnou míru, jmenovitě na úlohu vnějškově staticky určitou. Tyto síly nám působí ve vazbách, v nichž jsou umístěna kola. Při určování těchto sil budeme vycházet z podmínek statické rovnováhy. V tomto případě využijeme pro výpočet reakcí podmínku momentovou a silovou. Po vypočtení stykových, musíme provést úplné uvolnění rámu a provést statický rozbor, který nám odpoví na otázku, zda a kolikrát je daná úloha vnitřně staticky neurčitá. Poté provedeme částečné uvolnění a sestavíme deformační podmínky, ze kterých poté určíme silové působení, které probíhá uvnitř rámu. Důležité je, abychom si vhodným způsobem zvolili souřadný systém, z něhož po celou dobu výpočtu budeme vycházet. Volba tohoto souřadného systému je zcela libovolná.

Volba souřadného systému

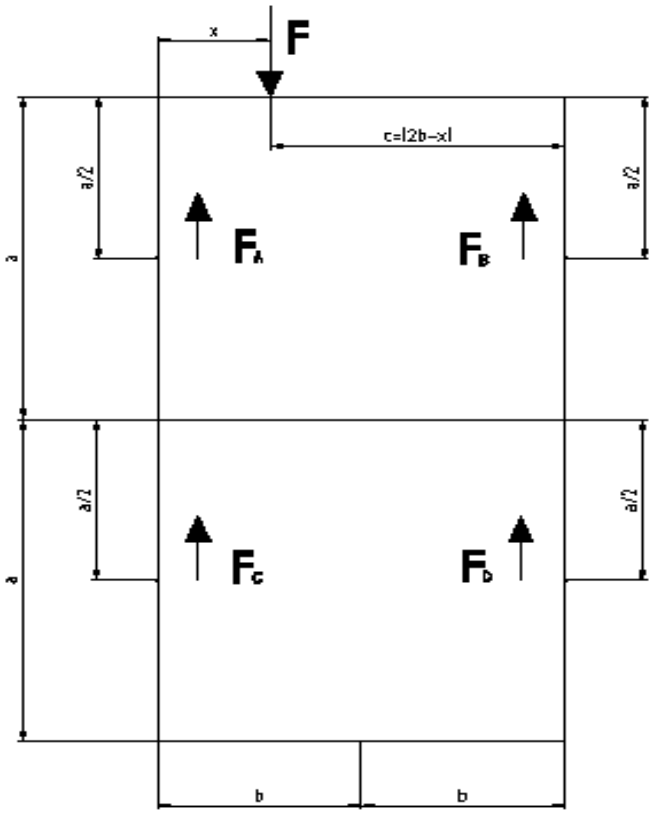


Souřadný systém je volen následujícím způsobem:

- Síly směřující směrem vpravo mají kladný charakter, síly směřující směrem vlevo mají charakter záporný.
- Síly směřující směrem nahoru mají kladný charakter, síly směřující směrem dolů mají charakter záporný.
- Moment směřující ve směru otáčení hodinových ručiček má kladný charakter.
- Moment směřující proti směru otáčení hodinových ručiček má záporný charakter.

Sestavení rovnic pro výpočet stykových sil:

U výpočtu stykových sil vycházíme z předpokladu, že kola na přední a zadní nápravě brzdí stejně tj. $F_A = F_B$ a $F_C = F_D$. Dále také předpokládáme, že stykové síly v kolech působí pouze ve směru vnější síly. Tím byla úloha zjednodušena na úroveň úlohy vnějškově staticky určité a stykové síly v kolech můžeme stanovit z podmínek statické rovnováhy. Jelikož jde o rovinnou soustavu rovnoběžných sil, máme k disposici dvě podmínky statické rovnováhy.



Z momentové podmínky k bodu A (tj. součet všech momentů ke vztažnému bodu je roven nule) a silové podmínky ve svislém směru plyne:

$$F_B = \frac{1}{2} F \cdot \frac{x}{2b}$$ síla ve vazbě

$$F_A = \frac{1}{2} F \cdot \frac{2b - x}{2b}$$ síla ve vazbě

$$F_D = \frac{1}{2} F \cdot \frac{x}{2b}$$ síla ve vazbě

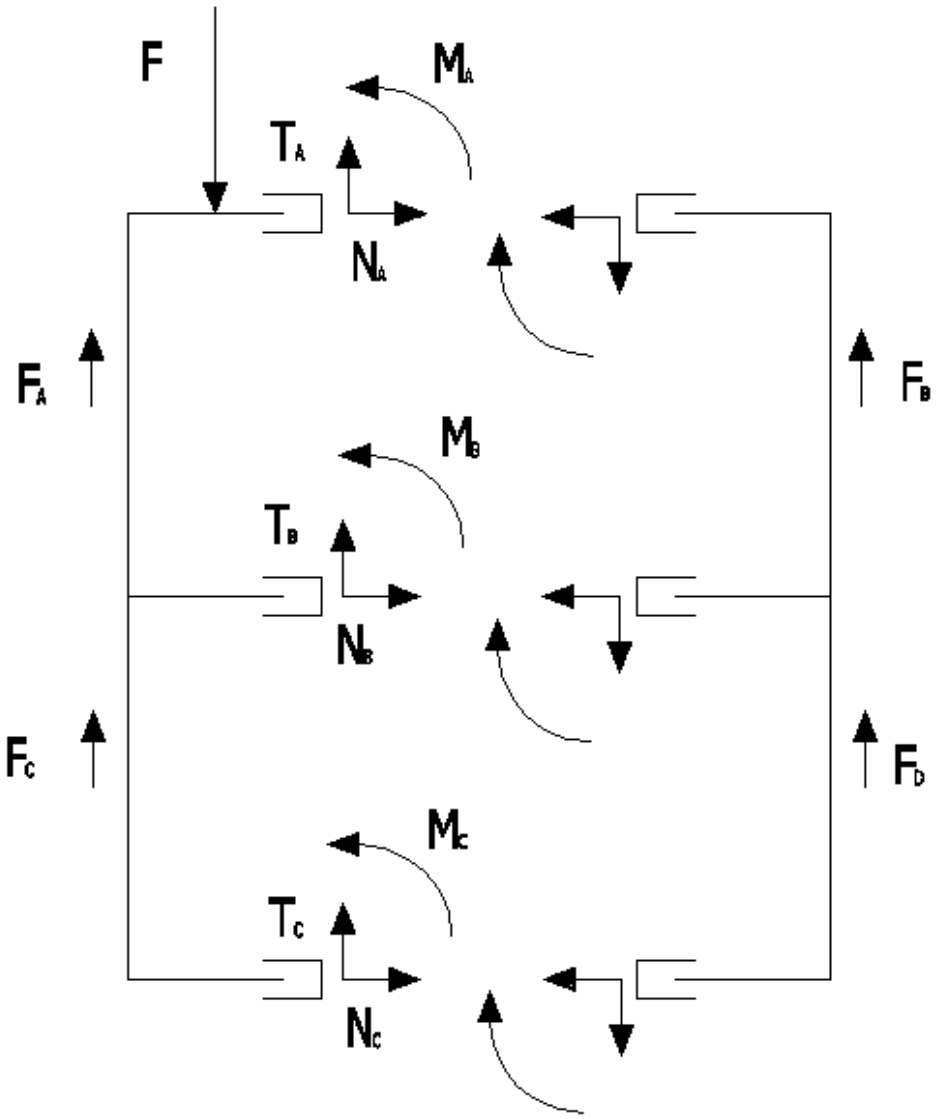
$$F_C = \frac{1}{2} F \cdot \frac{2b - x}{2b}$$ síla ve vazbě

Zkouška platnosti tohoto předpokladu:

$$\frac{1}{2}F\frac{x}{2b}+\frac{1}{2}F\cdot\frac{2b-x}{2b}=\frac{F\cdot x}{4b}+\frac{F\cdot(2b-x)}{4b}$$

$$\frac{F\cdot x+2Fb-F\cdot x}{4b}=\frac{2b\cdot F}{4b}=\frac{F}{2}\longrightarrow$$ předpoklad je platný

Úplné uvolnění rámu



Statický rozbor:

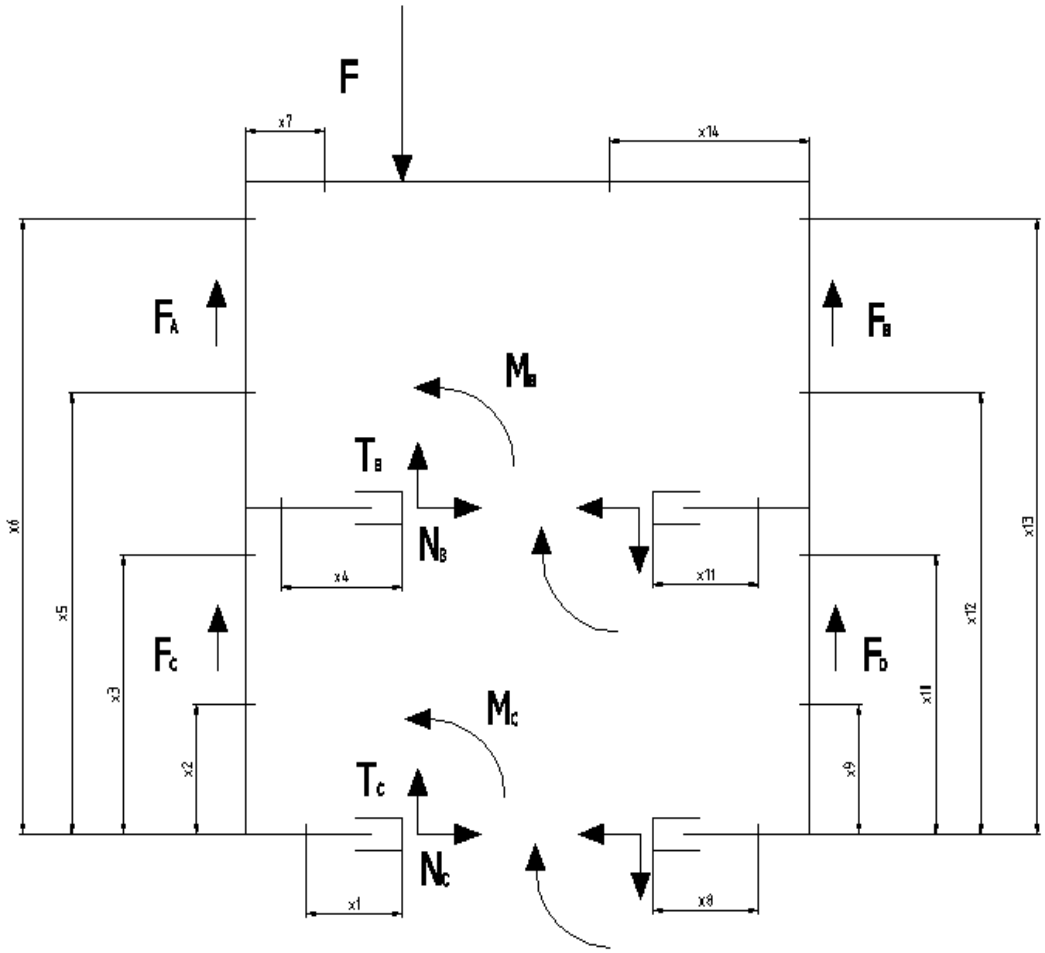
$\mu = 9$

$\upsilon = 3$ … v našem případě se jedná o rovinnou úlohu

$s = \mu - \upsilon = 9 - 3 = 6$

Ze statického rozboru plyne, že tato úloha je 6x staticky neurčitá.

Částečné uvolnění rámu na úroveň úlohy staticky určité

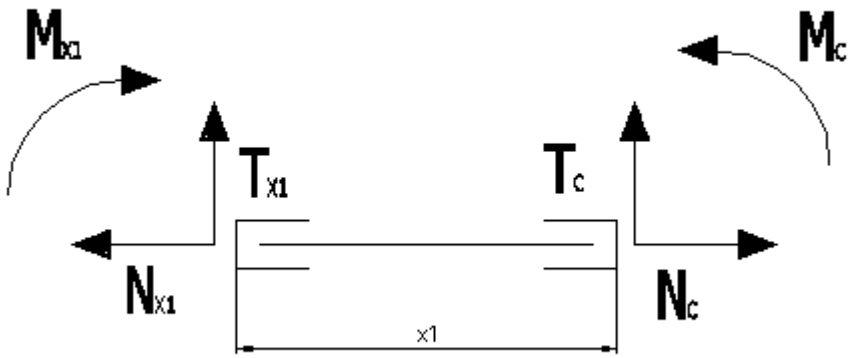


Deformační podmínky, vyjadřující podmínky spojitosti posuvů a natočení v místech řezů vypadají následovně:

$$\frac{\partial W}{\partial N_B} = \emptyset; \quad \frac{\partial W}{\partial T_B} = \emptyset; \quad \frac{\partial W}{\partial M_B} = \emptyset; \quad \frac{\partial W}{\partial N_C} = \emptyset; \quad \frac{\partial W}{\partial T_C} = \emptyset; \quad \frac{\partial W}{\partial M_C} = \emptyset$$

3. Stanovení výsledných silových účinků v úsecích rámu na základě rovnic rovnováhy uvolněných prvků.

Úsek první (x_1)



$$\sum M_R = Ø$$

$$Mx_1 - M_C - T_C \cdot x_1 = Ø$$

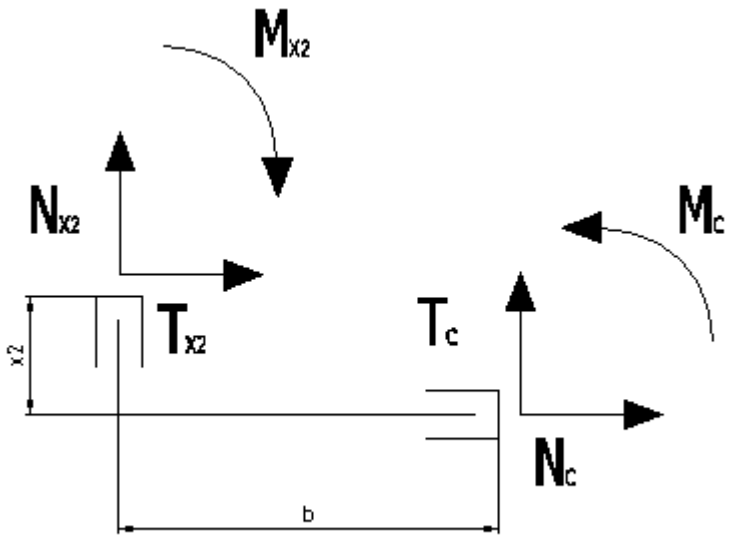
$$\sum F_Z = Ø$$

$$Tx_1 + T_C = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$- Nx_1 + N_C = Ø$$

Úsek druhý (x_2)



$$\sum M_R = Ø$$

$$Mx_2 - M_C - T_c \cdot b - N_c \cdot x_2 = Ø$$

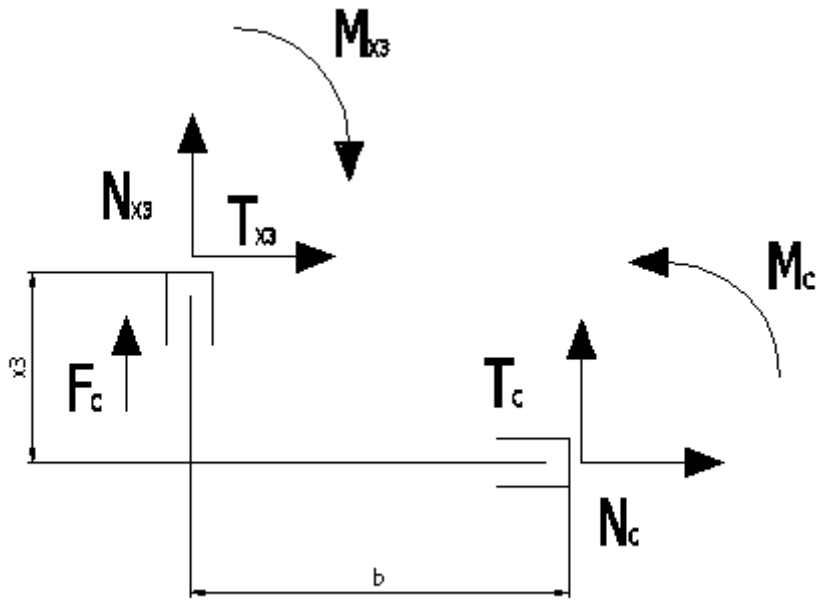
$$\sum F_Z = Ø$$

$$Nx_2 + T_c = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

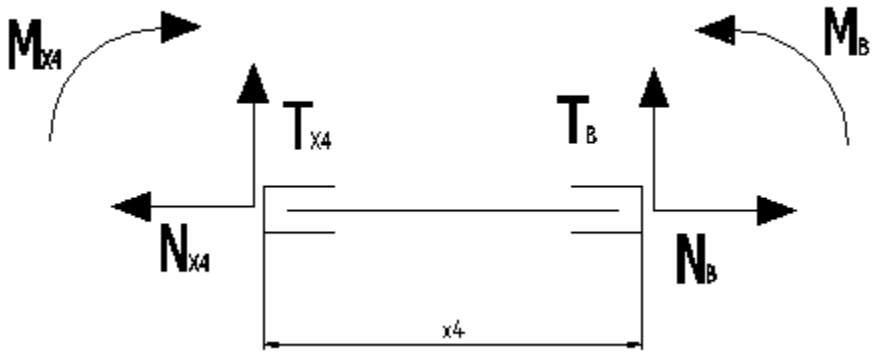
$$N_C + Tx_2 = Ø$$

Úsek třetí (x_3)



$$\sum M_R = Ø$$
$$Mx_3 - M_C - T_c \cdot b - N_c \cdot x_3 = Ø$$
$$\sum F_Z = Ø$$
$$Nx_3 + F_C + T_c = Ø$$
$$\sum F_Y = Ø$$
$$N_C + Tx_3 = Ø$$

Úsek čtvrtý (x_4)



$\sum M_R = Ø$

$Mx_4 - M_B - T_B \cdot x_4 = Ø$

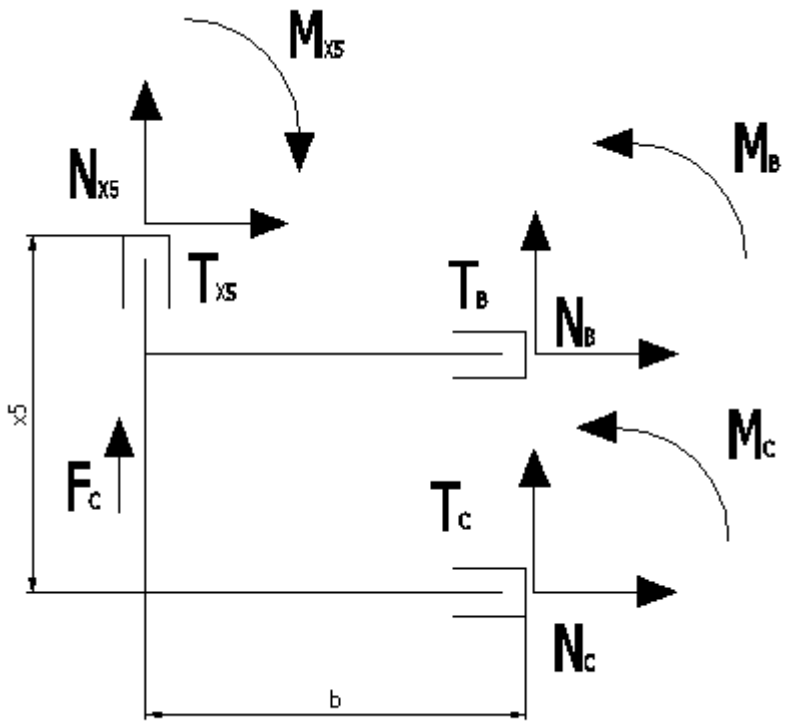
$\sum F_Y = Ø$

$T_B + Tx_4 = Ø$

$\sum F_4 = Ø$

$N_B - Nx_4 = Ø$

Úsek pátý (x_5)



$$\sum M_R = Ø$$

$$Mx_5 - M_B - M_C - T_B \cdot b - T_C \cdot b - N_C \cdot x_5 - N_B \cdot (x_5 - a) = Ø$$

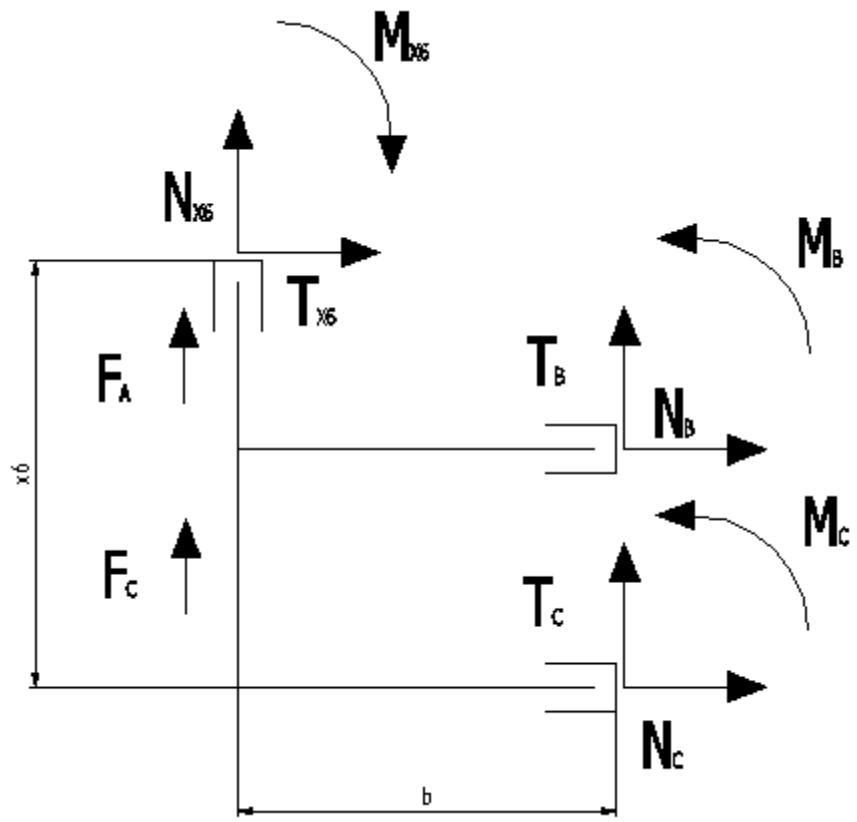
$$\sum F_Z = Ø$$

$$F_C + T_C + T_B + Nx_5 = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$N_C + N_B + Tx_5 = Ø$$

Úsek šestý (x_6)



$$\sum M_R = Ø$$

$$Mx_6 - M_B - M_C - T_C \cdot b - T_B \cdot b - N_C \cdot x_6 - N_B \cdot (x_6 - a) = Ø$$

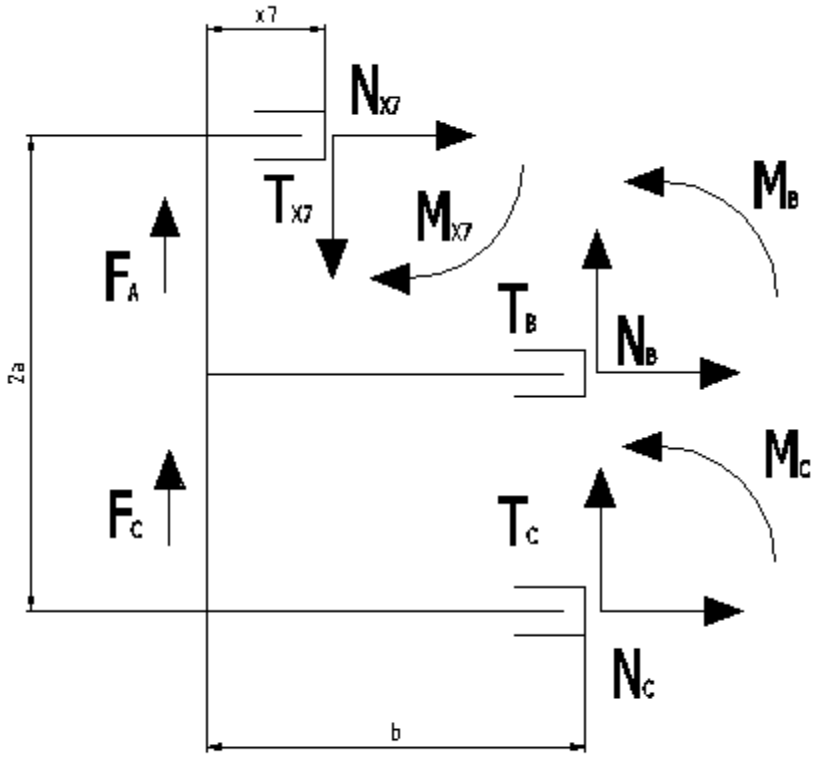
$$\sum F_Z = Ø$$

$$Nx_6 + F_A + F_C + T_B + T_C = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$Tx_6 + N_B + N_C = Ø$$

Úsek sedmý (x_7)



$$\sum M_R = Ø$$

$$Mx_7 - M_B - M_C + F_A \cdot x_7 + F_C \cdot x_7 - T_B(b - x_7) - T_C(b - x_7) - N_B \cdot a - N_C \cdot 2a = Ø$$

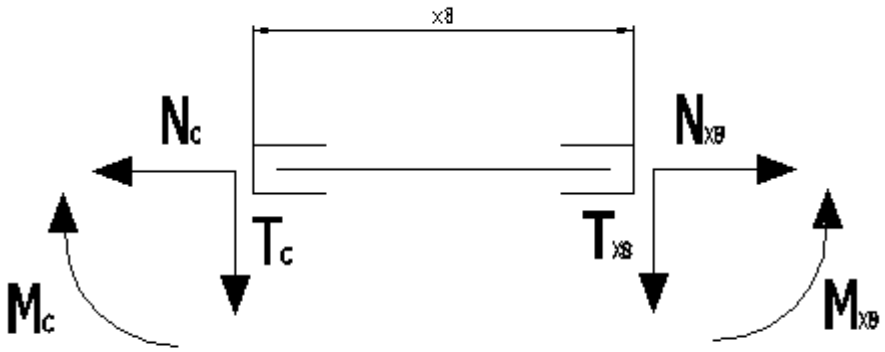
$$\sum F_Z = Ø$$

$$- Tx_7 + F_A + F_C + T_B + T_C = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$Nx_7 + N_B + N_C = Ø$$

Úsek osmý (x_8)



$$\sum M_R = Ø$$

$$M_C - Mx_8 - T_C \cdot x_8 = Ø$$

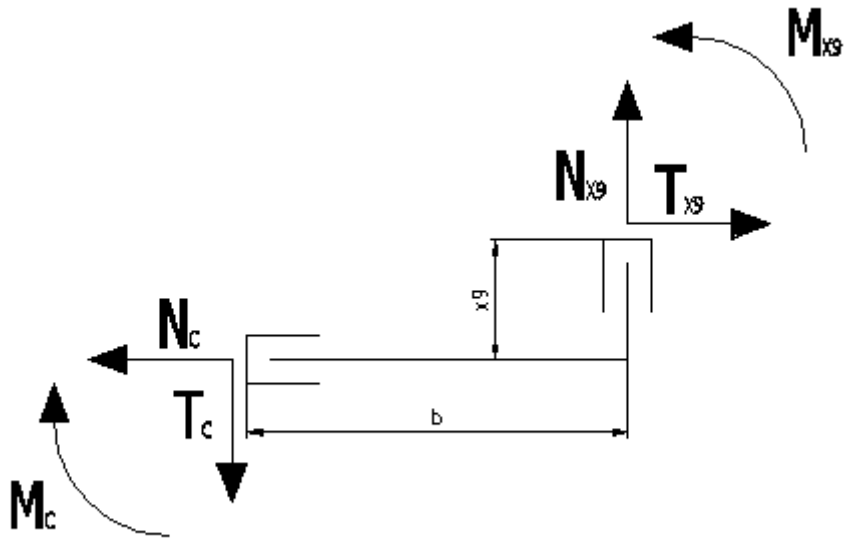
$$\sum F_Z = Ø$$

$$- Tx_8 - T_C = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$Nx_8 - N_C = Ø$$

Úsek devátý (x_9)



$\sum M_R = Ø$

$M_C - Mx_9 - T_C \cdot b + N_C \cdot x_9 = Ø$

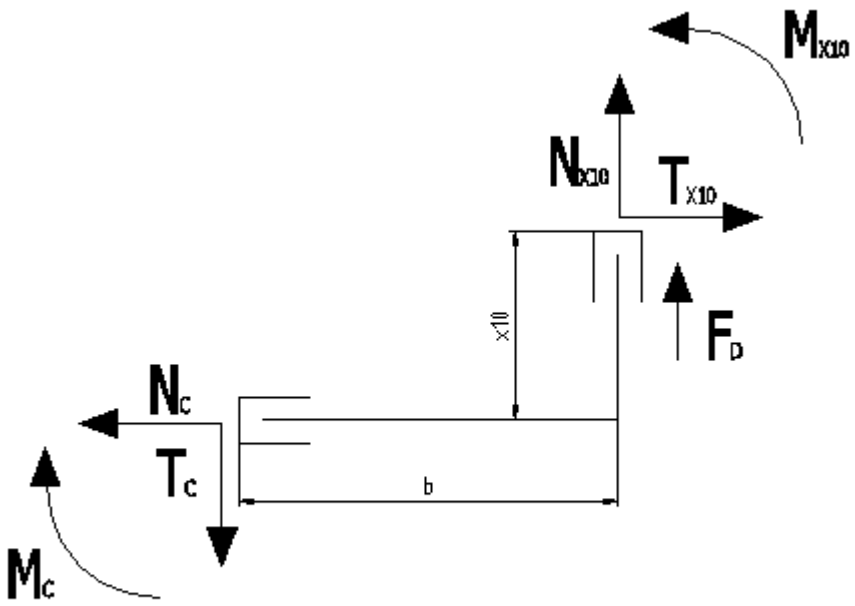
$\sum F_Z = Ø$

$Nx_9 - T_C = Ø$

$\sum F_X = Ø$

$Tx_9 - N_C = Ø$

Úsek desátý (x_{10})



$$\sum M_R = Ø$$

$$M_C - Mx_{10} + N_C \cdot x_{10} - T_C \cdot b = Ø$$

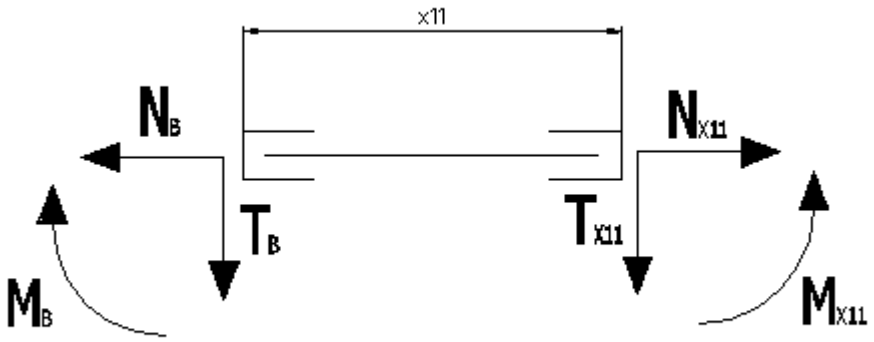
$$\sum F_Z = Ø$$

$$- T_C + Nx_{10} + F_D = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$Tx_{10} - N_C = Ø$$

Úsek jedenáctý (x_{11})



$$\sum M_R = Ø$$

$$M_B - Mx_{11} - T_B \cdot x_{11} = Ø$$

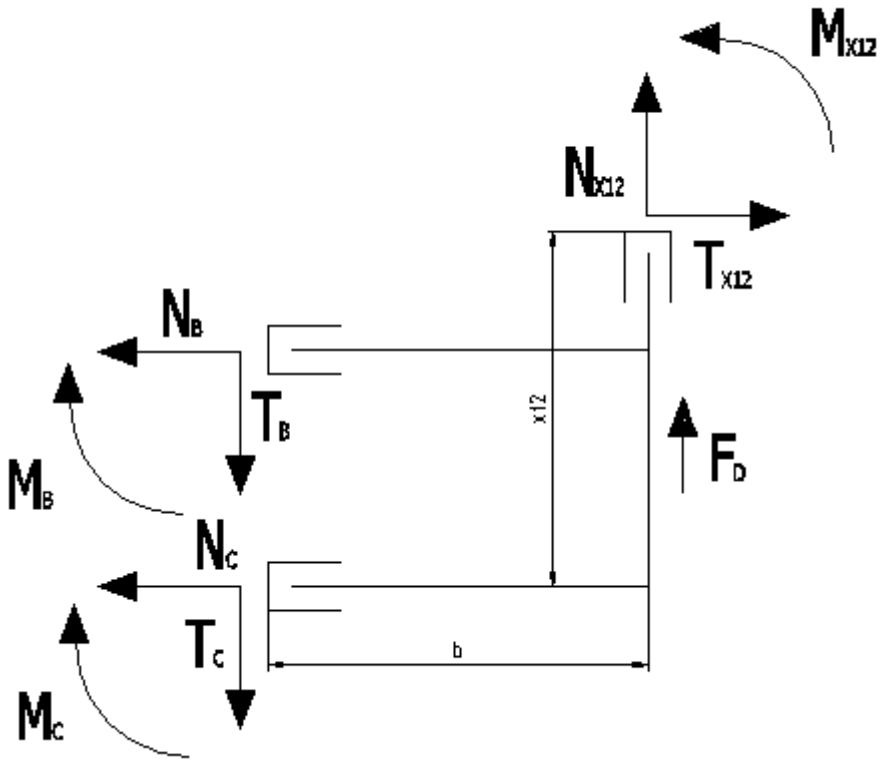
$$\sum F_Z = Ø$$

$$- Tx_{11} - T_B = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$Nx_{11} - N_B = Ø$$

Úsek dvanáctý (x_{12})



$$\sum M_R = Ø$$

$$M_B + M_C - Mx_{12} + N_B(x_{12} - a) + N_C \cdot x_{12} - T_B \cdot b - T_C \cdot b = Ø$$

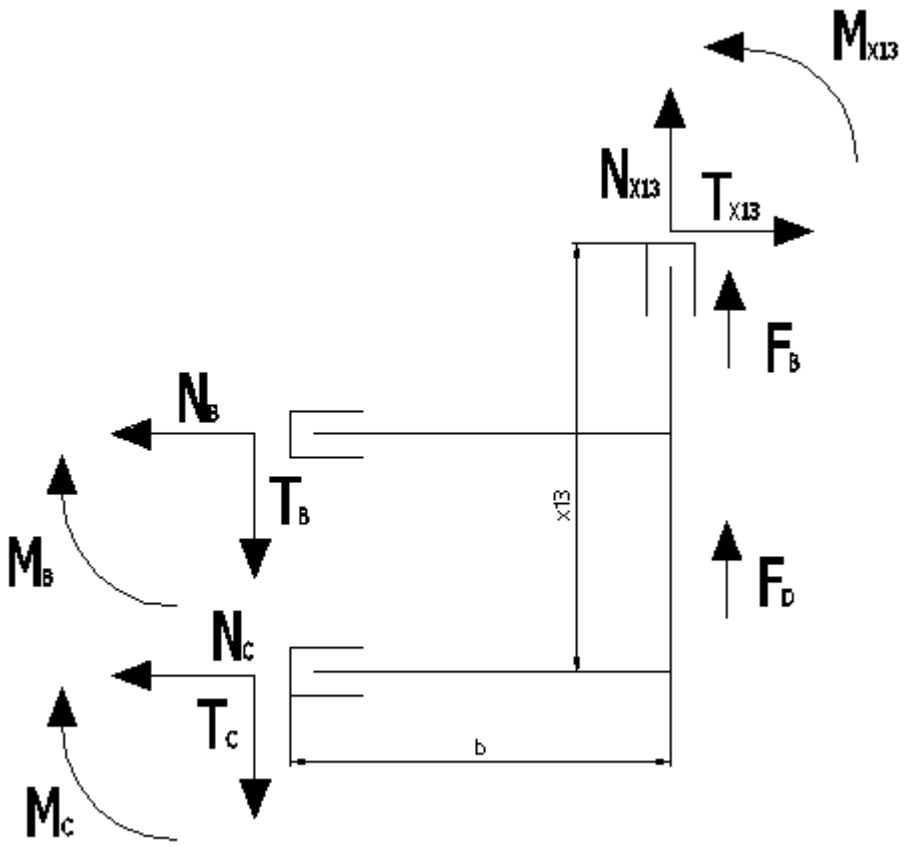
$$\sum F_Z = Ø$$

$$Nx_{12} + F_D - T_B - T_C = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$Tx_{12} - N_B - N_C = Ø$$

Úsek třináctý (x_{13})



$$\sum M_R = Ø$$

$$M_B + M_C - Mx_{13} + N_B(x_{13} - a) + N_C \cdot x_{13} - T_B \cdot b - T_C \cdot b = Ø$$

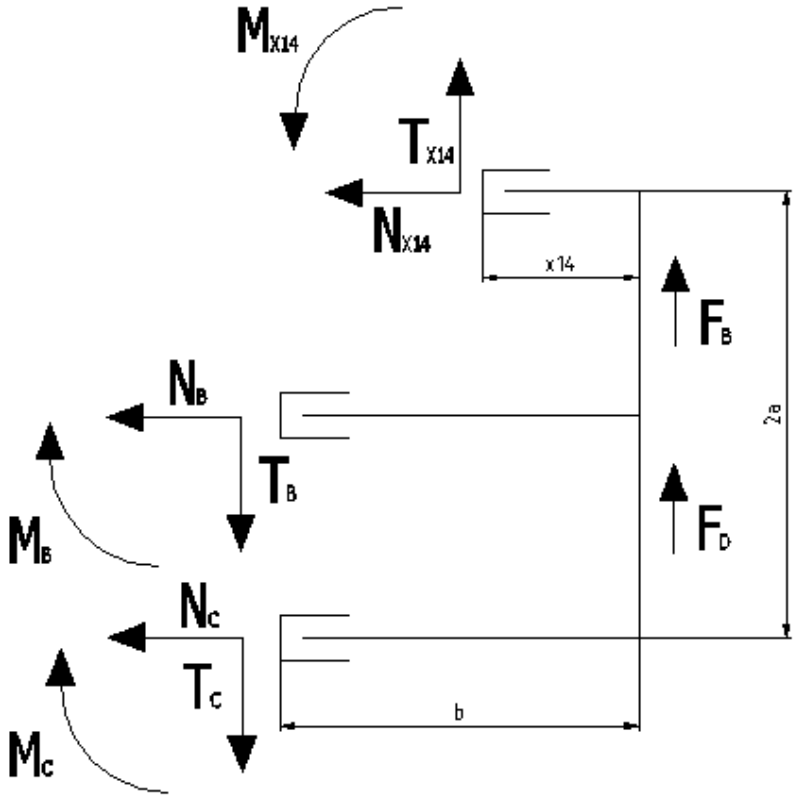
$$\sum F_Z = Ø$$

$$Nx_{13} + F_B + F_D - T_B - T_C = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$Tx_{13} - N_B - N_C = Ø$$

Úsek čtrnáctý (x_{14})



$$\sum M_R = Ø$$

$$M_B + M_C - Mx_{14} - T_B(b - x_{14}) - T_C(b - x_{14}) + N_B \cdot a + N_c \cdot 2a - F_B \cdot x_{14} - F_D \cdot x_{14} = Ø$$

$$\sum F_Z = Ø$$

$$Tx_{14} - T_B - T_C + F_B + F_D = Ø$$

$$\sum F_X = Ø$$

$$- Nx_{14} - N_B - N_C = Ø$$

Dominantním namáháním v tomto případě je ohyb. Při řešení deformačních podmínek pomocí Castiglianovy věty, budeme proto počítat pouze s ohybovou energií napjatosti W, kterou budeme počítat pomocí ohybových momentů stanovených ve všech čtrnácti uvolněných prvcích postupně, jak jdou za sebou. Tyto rovnice dosazujeme ve tvarech, ve kterých jsou vyjádřeny momenty M_{x1} až M_{x14}. To znamená, že dosazujeme pouze pravou stranu rovnice uvedené níže.

Názorná ukázka:

$$Mx_1 = M_C + T_C \cdot x_1$$

.

.

Atd.

4. Dosazení vztahů pro ohybové momenty do podmínek spojitosti deformací

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C

$$\frac{\partial W}{\partial N_C} = Ø$$

$$Ø = \int_{\chi} \frac{M_{(S)}}{E \cdot J_y} \cdot \frac{\partial M_{(S)}}{\partial N_C} d_S$$

$$Ø = \frac{1}{E \cdot J_y} \int_0^b (M_C + T_C \cdot x_1) \cdot (Ø) dx_1 + \int_0^{a/2} (M_C + T_C \cdot b + N_C \cdot x_2) \cdot (x_2) dx_2 + \int_{a/2}^a (M_C + T_C b + N \cdot_c x_3) \cdot (x_3) dx_3 +$$

$$+ \int_0^b (M_B + T_B \cdot x_4) \cdot (Ø) dx_4 + \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + T_B \cdot b + T_C \cdot b + N_C \cdot x_5 + N_B \cdot (x_5 - a)) \cdot (x_5) dx_5 +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + T_C \cdot b + T_B \cdot b + N_C \cdot x_6 + N_B \cdot (x_6 - a)) \cdot (x_6) dx_6 +$$

$$+ \int_o^x (M_B + M_C - F_A \cdot x_7 - F_C \cdot x_7 + T_B \cdot (b - x_7) + T_C \cdot (b - x_7) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a) \cdot (2a) dx_7 +$$

$$+ \int_o^b (M_C - T_C \cdot x_8) \cdot (Ø) dx_8 + \int_o^{a/2} (M_C - T_C \cdot b + N_C \cdot x_9) \cdot (x_9) dx_9 + \int_{a/2}^a (M_C + N_C \cdot x_{10} - T_C \cdot b) \cdot (x_{10}) dx_{10} +$$

$$+ \int_0^b (M_B - T_B \cdot x_{11}) \cdot (Ø) dx_{11} + \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{12} - a) + N_C \cdot x_{12} - T_B \cdot b - T_C \cdot b) \cdot (x_{12}) dx_{12} +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{13} - a) + N_C \cdot x_{13} - T_B \cdot b - T_C \cdot b) \cdot (x_{13}) dx_{13} +$$

$$+ \int_0^c (M_B + M_C - T_B \cdot (b - x_{14}) - T_C \cdot (b - x_{14}) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a - F_B \cdot x_{14} - F_D \cdot x_{14}) \cdot (2a) dx_{14}$$

Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě C

$$\frac{\partial W}{\partial T_C} = Ø$$

$$Ø = \int \frac{M_{(S)}}{EJ_y} \cdot \frac{\partial M_{(S)}}{\partial T_C} d_S$$

$$Ø = \frac{1}{EJ_y}\left[\int_0^b (M_C + T_C \cdot x_1)\cdot(\mathrm{x}_1)dx_1 + \int_0^{a/2} (M_C + T_C \cdot b + N_C \cdot x_2)\cdot(b)dx_2 + \int_{a/2}^{a} (M_C + T_C \cdot b + N_c \cdot x_3)\cdot(b)dx_3 + \right.$$

$$+ \int_0^b (M_B + T_B \cdot x_4)\cdot(Ø)dx_4 + \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + T_B \cdot b + T_C \cdot b + N_C \cdot x_5 + N_B \cdot (x_5 - a))\cdot(b)dx_5 +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + T_B \cdot b + T_C \cdot b + N_C \cdot x_6 + N_B \cdot (x_6 - a))\cdot(b)dx_6 +$$

$$+ \int_o^x (M_B + M_C - F_A \cdot x_7 - F_C \cdot x_7 + T_B \cdot (b - x_7) + T_C \cdot (b - x_7) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a)\cdot(b - x_7)dx_7 + \int_o^b (M_C - T_C \cdot x_8)\cdot(-\mathrm{x}_8)dx_8 +$$

$$+ \int_o^{a/2} (M_C - T_C \cdot b + N_C \cdot x_9)\cdot(-b)dx_9 + \int_{a/2}^{a} (M_C + N_C \cdot x_{10} - T_C \cdot b)\cdot(-b)dx_{10} + \int_0^b (M_B - T_B \cdot x_{11})\cdot(Ø)dx_{11} +$$

$$+ \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{12} - a) + N_C \cdot x_{12} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(-b)dx_{12} +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{13} - a) + N_C \cdot x_{13} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(-b)dx_{13} +$$

$$\left. + \int_0^c (M_B + M_C - T_B \cdot (b - x_{14}) - T_C \cdot (b - x_{14}) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a - F_B \cdot x_{14} - F_D \cdot x_{14})\cdot(-b + x_{14})dx_{14}\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C

$$\frac{\partial W}{\partial M_C} = Ø$$

$$Ø = \int_{\chi} \frac{M_{(S)}}{EJ_y} \cdot \frac{\partial M_{(S)}}{\partial M_C} d_S$$

$$Ø = \frac{1}{EJ_y}\left[\int_0^b (M_C + T_C \cdot x_1)\cdot(1)dx_1 + \int_0^{a/2}(M_C + T_C \cdot b + N_C \cdot x_2)\cdot(1)dx_2 + \int_{a/2}^{a}(M_C + T_C \cdot b + N_c \cdot x_3)\cdot(1)dx_3 +\right.$$

$$+ \int_0^b (M_B + T_B \cdot x_4)\cdot(Ø)dx_4 + \int_a^{3/2a}(M_B + M_C + T_B \cdot b + T_C \cdot b + N_C \cdot x_5 + N_B \cdot (x_5 - a))\cdot(1)dx_5 +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a}(M_B + M_C + T_C \cdot b + T_B \cdot b + N_C \cdot x_6 + N_B \cdot (x_6 - a))\cdot(1)dx_6 +$$

$$+ \int_o^x (M_B + M_C - F_A \cdot x_7 - F_C \cdot x_7 + T_B \cdot (b - x_7) + T_C \cdot (b - x_7) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a)\cdot(1)dx_7 + \int_o^b (M_C - T_C \cdot x_8)\cdot(1)dx_8 +$$

$$+ \int_o^{a/2}(M_C - T_C \cdot b + N_C \cdot x_9)\cdot(1)dx_9 + \int_{a/2}^{a}(M_C + N_C \cdot x_{10} - T_C \cdot b)\cdot(1)dx_{10} + \int_0^b (M_B - T_B \cdot x_{11})\cdot(Ø)dx_{11} +$$

$$+ \int_a^{3/2a}(M_B + M_C + N_B \cdot (x_{12} - a) + N_C \cdot x_{12} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(1)dx_{12} +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a}(M_B + M_C + N_B \cdot (x_{13} - a) + N_C \cdot x_{13} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(1)dx_{13} +$$

$$\left. + \int_0^c (M_B + M_C - T_B \cdot (b - x_{14}) - T_C \cdot (b - x_{14}) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a - F_B \cdot x_{14} - F_D \cdot x_{14})\cdot(1)dx_{14}\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B

$$\frac{\partial W}{\partial N_B} = Ø$$

$$Ø = \int_{\chi} \frac{M_{(S)}}{EJ_y} \cdot \frac{\partial M_{(S)}}{\partial N_B} d_S$$

$$Ø = \frac{1}{EJ_y}\left[\int_0^b (M_C + T_C \cdot x_1)\cdot(Ø)dx_1 + \int_0^{a/2} (M_C + T_C \cdot b + N_C \cdot x_2)\cdot(Ø)dx_2 + \int_{a/2}^{a} (M_C + T_C \cdot b + N_c \cdot x_3)\cdot(Ø)dx_3 +\right.$$

$$+ \int_0^b (M_B + T_B \cdot x_4)\cdot(Ø)dx_4 + \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + T_B \cdot b + T_C \cdot b + N_C \cdot x_5 + N_B \cdot (x_5 - a))\cdot(x_5 - a)dx_5 +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + T_C \cdot b + T_B \cdot b + N_C \cdot x_6 + N_B \cdot (x_6 - a))\cdot(x_6 - a)dx_6 +$$

$$+ \int_o^x (M_B + M_C - F_A \cdot x_7 - F_C \cdot x_7 + T_B \cdot (b - x_7) + T_C \cdot (b - x_7) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a)\cdot(a)dx_7 + \int_o^b (M_C - T_C \cdot x_8)\cdot(Ø)dx_8 +$$

$$+ \int_o^{a/2} (M_C - T_C \cdot b + N_C \cdot x_9)\cdot(Ø)dx_9 + \int_{a/2}^{a} (M_C + N_C \cdot x_{10} - T_C \cdot b)\cdot(Ø)dx_{10} + \int_0^b (M_B - T_B \cdot x_{11})\cdot(Ø)dx_{11} +$$

$$+ \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{12} - a) + N_C \cdot x_{12} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(x_{12} - a)dx_{12} +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{13} - a) + N_C \cdot x_{13} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(x_{13} - a)dx_{13} +$$

$$\left. + \int_0^c (M_B + M_C - T_B \cdot (b - x_{14}) - T_C \cdot (b - x_{14}) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a - F_B \cdot x_{14} - F_D \cdot x_{14})\cdot(a)dx_{14}\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě B

$$\frac{\partial W}{\partial T_B} = Ø$$

$$Ø = \int_{\chi} \frac{M_{(S)}}{EJ_y} \cdot \frac{\partial M_{(S)}}{\partial T_B} d_S$$

$$Ø = \frac{1}{EJ_y}\left[\int_0^b (M_C + T_C \cdot x_1)\cdot(Ø)dx_1 + \int_0^{a/2} (M_C + T_C \cdot b + N_C \cdot x_2)\cdot(Ø)dx_2 + \int_{a/2}^a (M_C + T_C \cdot b + N_c \cdot x_3)\cdot(Ø)dx_3 +\right.$$

$$+ \int_0^b (M_B + T_B \cdot x_4)\cdot(x_4)dx_4 + \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + T_B \cdot b + T_C \cdot b + N_C \cdot x_5 + N_B \cdot (x_5 - a))\cdot(b)dx_5 +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + T_C \cdot b + T_B \cdot b + N_C \cdot x_6 + N_B \cdot (x_6 - a))\cdot(b)dx_6 +$$

$$+ \int_o^x (M_B + M_C - F_A \cdot x_7 - F_C \cdot x_7 + T_B \cdot (b - x_7) + T_C \cdot (b - x_7) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a)\cdot(b - x_7)dx_7 + \int_o^b (M_C - T_C \cdot x_8)\cdot(Ø)dx_8 +$$

$$+ \int_o^{a/2} (M_C - T_C \cdot b + N_C \cdot x_9)\cdot(Ø)dx_9 + \int_{a/2}^a (M_C + N_C \cdot x_{10} - T_C \cdot b)\cdot(Ø)dx_{10} + \int_0^b (M_B - T_B \cdot x_{11})\cdot(-x_{11})dx_{11} +$$

$$+ \int_a^{3/2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{12} - a) + N_C \cdot x_{12} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(-b)dx_{12} +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a} (M_B + M_C + N_B \cdot (x_{13} - a) + N_C \cdot x_{13} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(-b)dx_{13} +$$

$$\left. + \int_0^c (M_B + M_C - T_B \cdot (b - x_{14}) - T_C \cdot (b - x_{14}) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a - F_B \cdot x_{14} - F_D \cdot x_{14})\cdot(-b + x_{14})dx_{14}\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B

$$\frac{\partial W}{\partial M_B} = Ø$$

$$Ø = \int_{\chi} \frac{M_{(S)}}{EJ_y} \cdot \frac{\partial M_{(S)}}{\partial N_B} d_S$$

$$Ø = \frac{1}{EJ_y}\left[\int_0^b (M_C + T_C \cdot x_1)\cdot(Ø)dx_1 + \int_0^{a/2}(M_C + T_C \cdot b + N_C \cdot x_2)\cdot(Ø)dx_2 + \int_{a/2}^{a}(M_C + T_C \cdot b + N_c \cdot x_3)\cdot(Ø)dx_3 +\right.$$

$$+ \int_0^b (M_B + T_B \cdot x_4)\cdot(1)dx_4 + \int_a^{3/2a}(M_B + M_C + T_B \cdot b + T_C \cdot b + N_C \cdot x_5 + N_B \cdot (x_5 - a))\cdot(1)dx_5 +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a}(M_B + M_C + T_C \cdot b + T_B \cdot b + N_C \cdot x_6 + N_B \cdot (x_6 - a))\cdot(1)dx_6 +$$

$$+ \int_o^x (M_B + M_C - F_A \cdot x_7 - F_C \cdot x_7 + T_B \cdot (b - x_7) + T_C \cdot (b - x_7) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a)\cdot(1)dx_7 + \int_o^b (M_C - T_C \cdot x_8)\cdot(Ø)dx_8 +$$

$$+ \int_o^{a/2}(M_C - T_C \cdot b + N_C \cdot x_9)\cdot(Ø)dx_9 + \int_{a/2}^{a}(M_C + N_C \cdot x_{10} - T_C \cdot b)\cdot(Ø)dx_{10} + \int_0^b (M_B - T_B \cdot x_{11})\cdot(1)dx_{11} +$$

$$+ \int_a^{3/2a}(M_B + M_C + N_B \cdot (x_{12} - a) + N_C \cdot x_{12} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(1)dx_{12} +$$

$$+ \int_{3/2a}^{2a}(M_B + M_C + N_B \cdot (x_{13} - a) + N_C \cdot x_{13} - T_B \cdot b - T_C \cdot b)\cdot(1)dx_{13} +$$

$$\left. + \int_0^c (M_B + M_C - T_B \cdot (b - x_{14}) - T_C \cdot (b - x_{14}) + N_B \cdot a + N_C \cdot 2a - F_B \cdot x_{14} - F_D \cdot x_{14})\cdot(1)dx_{14}\right]$$

5. Integrace jednotlivých podmínek spojitosti deformací

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C

$$Ø = \frac{1}{EJ_y}\left(\left[\left(M_C\frac{x_2^2}{2} + T_Cb\frac{x_2^2}{2} + N_C\frac{x_2^3}{3}\right)\right]_0^{a/2} + \left[\left(M_C\frac{x_3^2}{2} + T_Cb\frac{x_3^2}{2} + N_C\frac{x^3}{3} - M_C\frac{x_3^2}{2} - T_Cb\frac{x_3^2}{2} - N_C\frac{x_3^3}{3}\right)\right]_{a/2}^{a} +$$

$$+ \left[\left(M_B\frac{x_5^2}{2} + M_C\frac{x_5^2}{2} + T_Bb\frac{x_5^2}{2} + T_Cb\frac{x_5^2}{2} + N_C\frac{x_5^2}{3} + N_B\frac{x_5^3}{3} - N_Ba\frac{x_2^2}{2} - M_B\frac{x_5^2}{2} - M_C\frac{x_5^2}{2} - T_Bb\frac{x_5^2}{2} -\right.\right.$$

$$\left.\left. - T_Cb\frac{x_5^2}{2} - N_C\frac{x_5^3}{3} - N_B\frac{x_5^3}{3} + N_Ba\frac{x_5^2}{2}\right)\right]_a^{3/2} + \left[\left(M_B\frac{x_6^2}{2} + M_C\frac{x_6^2}{2} + T_Cb\frac{x_6^2}{2} + T_Bb\frac{x_6^2}{2} + N_C\frac{x_6^3}{3} + N_B\frac{x_6^3}{3} -\right.\right.$$

$$\left.\left. - N_Ba\frac{x_6^2}{2} - M_B\frac{x_6^2}{2} - M_C\frac{x_6^2}{2} - T_Cb\frac{x_6^2}{2} - T_Bb\frac{x_6^2}{2} - N_C\frac{x_6^3}{3} - N_B\frac{x_6^3}{3} + N_Ba\frac{x_6^2}{2}\right)\right]_{3/2a}^{2a} +$$

$$+ \left[\left(M_B2ax_7 + M_C2ax_7 - F_a2ax_7\frac{x_7^2}{2} - F_C2a\frac{x_7^2}{2} + T_Bbx_72a - T_B\frac{x_7^2}{2}2a + T_Cbx_72a - T_C\frac{x_7^2}{2}2a +\right.\right.$$

$$\left.\left. + N_Ba2ax_7 + N_C2a2ax_7\right)\right]_0^x + \left[\left(M_C\frac{x_9^2}{2} - T_Cb\frac{x_9^2}{2} + N_C\frac{x_9^2}{3}\right)\right]_0^{a/2} + \left[\left(M_C\frac{x_{10}^2}{2} + N_C\frac{x_{10}^3}{3} - T_Cb\frac{x_{10}^2}{2} - M_C\frac{x_{10}^2}{2} -\right.\right.$$

$$\left.\left. - N_C\frac{x_{10}^3}{3} + T_Cb\frac{x_{10}^2}{2}\right)\right]_{a/2}^{a} + \left[\left(M_B\frac{x_{12}^2}{2} + M_C\frac{x_{12}^2}{2} + N_B\frac{x_{12}^3}{3} - N_Ba\frac{x_{12}^2}{2} + N_C\frac{x_{12}^3}{3} - T_Bb\frac{x_{12}^2}{2} - T_Cb\frac{x_{12}^2}{2} - M_B\frac{x_{12}^2}{2} -\right.\right.$$

$$\left.\left. - M_C\frac{x_{12}^2}{2} - N_B\frac{x_{12}^3}{3} + N_Ba\frac{x_{12}^2}{2} - N_C\frac{x_{12}^3}{3} + T_Bb\frac{x_{12}^2}{2} + T_Cb\frac{x_{12}^2}{2}\right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(M_B\frac{x_{13}^2}{2} + M_C\frac{x_{13}^2}{2} + N_B\frac{x_{13}^3}{3} -\right.\right.$$

$$\left.\left. - N_Ba\frac{x_{13}^2}{2} + N_C\frac{x_{13}^3}{3} - T_Bb\frac{x_{13}^2}{2} - T_Cb\frac{x_{13}^2}{2} - M_B\frac{x_{13}^2}{2} - M_C\frac{x_{13}^2}{2} - N_B\frac{x_{13}^3}{3} + N_Ba\frac{x_{13}^2}{2} - N_C\frac{x_{13}^3}{3} +\right.$$

$$\left. + T_Bb\frac{x_{13}^2}{2} + T_Cb\frac{x_{13}^2}{2}\right)\Big]_{3/2a}^{2a} + \left[\left(M_B2ax_{14} + M_C2ax_{14} - T_B2abx_{14} + T_B\frac{x_{14}^2}{2}2a - T_C2abx_{14} +\right.\right.$$

$$\left.\left. + T_C2a\frac{x_{14}^2}{2} + N_B2aax_{14} + N_C2a2ax_{14} - F_B2a\frac{x_{14}^2}{2} - F_D2a\frac{x_{14}^2}{2}\right)\right]_0^C\Bigg)$$

Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě C

$$\text{Ø} = \frac{1}{EJ_y}\left(\left[\left[\left(M_C\frac{x_1^2}{2} + T_C\frac{x_1^3}{3}\right)\right]_0^b + \left[\left(M_C bx_2 + T_C bbx_2 + N_C b\frac{x_2^2}{2}\right)\right]_0^{a/2} + \left[\left(M_C bx_3 + T_C bbx_3 + N_C b\frac{x_3^2}{2} - - M_C bx_3 - \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - T_C bbx_3 - N_c b\frac{x_3^2}{2}\right)\right]_{a/2}^{a} + \left[\left(M_B bx_5 + M_C bx_5 + T_B bbx_5 + T_C bbx_5 + N_C b\frac{x_5^2}{2} + N_B b\frac{x_5^2}{2} - N_B bax_5 - M_B bx_5 - \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - M_C bx_5 - T_B bbx_5 - T_C bbx_5 - N_C b\frac{x_5^2}{2} - N_B b\frac{x_5^2}{2} + N_B bax_5\right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(M_B bx_6 + M_C bx_6 + T_B bbx_6 + T_C bbx_6 + N_C b\frac{x_6^2}{2} + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + N_B b\frac{x_6^2}{2} - N_B abx_6 - M_B bx_6 - M_C bx_6 - T_B bbx_6 - T_C bbx_6 - N_C b\frac{x_6^2}{2} - N_B b\frac{x_6^2}{2} + N_B abx_6\right)\right]_{3/2a}^{2a} + \left[\left(M_B bx_7 - \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - M_B\frac{x_7^2}{2} + M_C bx_7 - M_C\frac{x_7^2}{2} - F_A b\frac{x_7^2}{2} + F_A\frac{x_7^3}{3} - F_C b\frac{x_7^2}{2} + F_C\frac{x_7^3}{3} + T_B bbx_7 - T_B b\frac{x_7^2}{2} - T_B b\frac{x_7^2}{2} + T_B\frac{x_7^3}{3} + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + T_C bbx_7 - T_C b\frac{x_7^2}{2} - T_C b\frac{x_7^2}{2} + T_C\frac{x_7^3}{3} + N_B abx_7 - N_B a\frac{x_7^2}{2} + N_C 2abx_7 - N_C 2a\frac{x_7^2}{2}\right)\right]_0^x + \left[\left(-M_C x_8 + T_C\frac{x_8^3}{3}\right)\right]_0^b + \right.$$

$$\left. + \left[\left(-M_C bx_9 + T_C bbx_9 - N_C b\frac{x_9^2}{2}\right)\right]_0^{a/2} + \left[\left(-M_C bx_{10} - N_C b\frac{x_{10}^2}{2} + T_C bbx_{10} + M_C bx_{10} + N_C b\frac{x_{10}^2}{2} - T_C bbx_{10}\right)\right]_{a/2}^{a} + \right.$$

$$\left. + \left[\left(-M_B bx_{12} - M_C bx_{12} - N_B b\frac{x_{12}^2}{2} + N_B bax_{12} - N_C b\frac{x_{12}^2}{2} + T_B bbx_{12} + T_C bbx_{12} + M_B bx_{12} + M_C bx_{12} + N_B b\frac{x_{12}^2}{2} - \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - N_B bax_{12} + N_C b\frac{x_{12}^2}{2} - T_B bbx_{12} - T_C bbx_{12}\right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(-M_B bx_{13} - M_C bx_{13} - N_B b\frac{x_{13}^2}{2} + N_B abx_{13} - N_C b\frac{x_{13}^2}{2} + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + T_B bbx_{13} + T_C bbx_{13} + M_B bx_{13} + M_C bx_{13} + N_B b\frac{x_{13}^2}{2} - N_B abx_{13} + N_C b\frac{x_{13}^2}{2} - T_B bbx_{13} - T_C bbx_{13}\right)\right]_{3/2a}^{2a} + \right.$$

$$\left. + \left[\left(-M_B bx_{14} + M_B\frac{x_{14}^2}{2} - M_C bx_{14} + M_C\frac{x_{14}^2}{2} + T_B bbx_{14} - T_B b\frac{x_{14}^2}{2} - T_B b\frac{x_{14}^2}{2} + T_B\frac{x_{14}^3}{3} + T_C bbx_{14} - T_C b\frac{x_{14}^2}{2} - \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - T_C b\frac{x_{14}^2}{2} + T_C\frac{x_{14}^3}{3} - N_B abx_{14} + N_B a\frac{x_{14}^2}{2} - N_C 2abx_{14} + N_C 2a\frac{x_{14}^2}{2} + F_B b\frac{x_{14}^2}{2} - F_B\frac{x_{14}^3}{3} + F_D b\frac{x_{14}^2}{2} - F_D\frac{x_{14}^3}{3}\right)\right]_0^C\right)$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C

$$\varnothing = \frac{1}{EJ_y}\left(\left[\left(M_C x_1 + T_C \frac{x_1^2}{2}\right)\right]_0^b + \left[\left(M_C x_2 + T_C b x_2 + N_C \frac{x_2^2}{2}\right)\right]_0^{a/2} + \left[\left(M_C x_3 + T_C b x_3 + N_C \frac{x_3^2}{2} - M_C x_3 - \right.\right.\right.$$

$$- T_C b x_3 - N_c \frac{x_3^2}{2}\Bigg)\Bigg]_{a/2}^{a} + \left[\left(M_B x_5 + M_C x_5 + T_B b x_5 + T_C b x_5 + N_C \frac{x_5^2}{2} + N_B \frac{x_5^2}{2} - N_B a x_5 - M_B x_5 - M_C x_5 - T_B b x_5 - \right.\right.$$

$$\left.\left. - T_C b x_5 - N_C \frac{x_5^2}{2} - N_B \frac{x_5^2}{2} + N_B a x_5 \right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(M_B x_6 + M_C x_6 + T_B b x_6 + T_C b x_6 + N_C \frac{x_6^2}{2} + N_B \frac{x_6^2}{2} - N_B a x_6 - M_B x_6 - \right.\right.$$

$$\left.\left. - M_C x_6 - T_B b x_6 - T_C b x_6 - N_C \frac{x_6^2}{2} - N_B \frac{x_6^2}{2} + N_B a x_6 \right)\right]_{3/2a}^{2a} + \left[\left(M_B x_7 + M_C x_7 - F_A \frac{x_7^2}{2} - F_C \frac{x_7^2}{2} + T_B b x_7 - T_B \frac{x_7^2}{2} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + T_C b x_7 - T_C \frac{x_7^2}{2} + N_B a x_7 + N_C 2 a x_7\right)\right]_0^x + \left[\left(M_C x_8 - T_C \frac{x_8^2}{2}\right)\right]_0^b + \left[\left(M_C x_9 - T_C b x_9 + N_C \frac{x_9^2}{2}\right)\right]_0^{a/2} + \left[\left(M_C x_{10} + N_C \frac{x_{10}^2}{2} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - T_C b x_{10} - M_C x_{10} - N_C \frac{x_{10}^2}{2} + T_C b x_{10}\right)\right]_{a/2}^{a} + \left[\left(M_B x_{12} + M_C x_{12} + N_B \frac{x_{12}^2}{2} - N_B a x_{12} + N_C \frac{x_{12}^2}{2} - T_B b x_{12} - T_C b x_{12} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - M_B x_{12} - M_C x_{12} - N_B \frac{x_{12}^2}{2} + N_B a x_{12} - N_C \frac{x_{12}^2}{2} + T_B b x_{12} + T_C b x_{12}\right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(M_B x_{13} + M_C x_{13} + N_B \frac{x_{13}^2}{2} - N_B a x_{13} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + N_C \frac{x_{13}^2}{2} - T_B b x_{13} - T_C b x_{13} - M_B x_{13} - M_C x_{13} - N_B \frac{x_{13}^2}{2} + N_B a x_{13} - N_C \frac{x_{13}^2}{2} + T_B b x_{13} + T_C b x_{13}\right)\right]_{3/2a}^{2a} +$$

$$+ \left[\left(M_B x_{14} + M_C x_{14} - T_B b x_{14} + T_B \frac{x_{14}^2}{2} - T_C b x_{14} + T_C \frac{x_{14}^2}{2} + N_B a x_{14} + N_C 2 a x_{14} - F_B \frac{x_{14}^2}{2} - F_D \frac{x_{14}^2}{2}\right)\right]_0^C\Bigg)$$

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B

$$\text{Ø} = \frac{1}{EJ_y}\Bigg(\Bigg[\Bigg(\Bigg(M_B\frac{x_5^2}{2} - M_B a x_5 + M_C\frac{x_5^2}{2} - M_C a x_5 + T_B b\frac{x_5^2}{2} - T_B a b x_5 + T_C b\frac{x_5^2}{2} - T_C b a x_5 + N_C\frac{x_5^3}{3} -$$

$$- N_C a\frac{x_5^2}{2} + N_B\frac{x_5^3}{3} - N_B a\frac{x_5^2}{2} - N_B a\frac{x_5^2}{2} + N_B a a x_5 - M_B\frac{x_5^2}{2} + M_B a x_5 - M_C\frac{x_5^2}{2} + M_C a x_5 - T_B b\frac{x_5^2}{2} +$$

$$+ T_B a b x_5 - T_C b\frac{x_5^2}{2} + T_C b a x_5 - N_C\frac{x_5^3}{3} + N_C a\frac{x_5^2}{2} - N_B\frac{x_5^3}{3} + N_B a\frac{x_5^2}{2} + N_B a\frac{x_5^2}{2} - N_B a a x_5 \Bigg)\Big]_a^{3/2a} +$$

$$+ \Bigg[\Bigg(M_B\frac{x_6^2}{2} - M_B a x_6 + M_C\frac{x_6^2}{2} - M_C a x_6 + T_B b\frac{x_6^2}{2} - T_B a b x_6 + T_C b\frac{x_6^2}{2} - T_C b a x_6 + N_C\frac{x_6^3}{3} - N_C a\frac{x_6^2}{2} +$$

$$+ N_B\frac{x_6^3}{3} - N_B a\frac{x_6^2}{2} - N_B a\frac{x_6^2}{2} + N_B a a x_6 - M_B\frac{x_6^2}{2} + M_B a x_6 - M_C\frac{x_6^2}{2} + M_C a x_6 - T_B b\frac{x_6^2}{2} + T_B a b x_6 -$$

$$- T_C b\frac{x_6^2}{2} + T_C b a x_6 - N_C\frac{x_6^3}{3} + N_C a\frac{x_6^2}{2} - N_B\frac{x_6^3}{3} + N_B a\frac{x_6^2}{2} + N_B a\frac{x_6^2}{2} - N_B a a x_6 \Bigg)\Bigg]_{3/2a}^{2a} + \Big[\Big(M_B a x_7 +$$

$$+ M_C a x_7 - F_A a\frac{x_7^2}{2} - F_C a\frac{x_7^2}{2} + T_B b a x_7 - T_B a\frac{x_7^2}{2} + T_C a b x_7 - T_C a\frac{x_7^2}{2} + N_B a a x_7 + N_C 2 a a x_7\Big)\Big]_0^x +$$

$$+ \Bigg[\Bigg(M_B\frac{x_{12}^2}{2} - M_B a x_{12} + M_C\frac{x_{12}^2}{2} - M_C a x_{12} + N_B\frac{x_{12}^3}{3} - N_B a\frac{x_{12}^2}{2} - N_B a\frac{x_{12}^2}{2} + N_B a a x_{12} + N_C\frac{x_{12}^3}{3} -$$

$$- N_C a\frac{x_{12}^2}{2} - T_B b\frac{x_{12}^2}{2} + T_B b a x_{12} - T_C b\frac{x_{12}^2}{2} + T_C b a x_{12} - M_B\frac{x_{12}^2}{2} + M_B a x_{12} - M_C\frac{x_{12}^2}{2} + M_C a x_{12} -$$

$$- N_B\frac{x_{12}^3}{3} + N_B a\frac{x_{12}^2}{2} + N_B a\frac{x_{12}^2}{2} - N_B a a x_{12} - N_C\frac{x_{12}^3}{3} + N_C a\frac{x_{12}^2}{2} + T_B b\frac{x_{12}^2}{2} - T_B b a x_{12} + T_C b\frac{x_{12}^2}{2} -$$

$$- T_C b a x_{12}\Big)\Big]_a^{3/2a} + \Big[\Big(M_B\frac{x_{13}^2}{2} - M_B a x_{13} + M_C\frac{x_{13}^2}{2} - M_C a x_{13} + N_B\frac{x_{13}^3}{3} - N_B a\frac{x_{13}^2}{2} - N_B a\frac{x_{13}^2}{2} +$$

$$+ N_B a a x_{13} + N_C\frac{x_{13}^3}{3} - N_C a\frac{x_{13}^2}{2} - T_B b\frac{x_{13}^2}{2} + T_B b a x_{13} - T_C b\frac{x_{13}^2}{2} + T_C b a x_{13} - M_B\frac{x_{13}^2}{2} + M_B a x_{13} -$$

$$- M_C\frac{x_{13}^2}{2} + M_C a x_{13} - N_B\frac{x_{13}^3}{3} + N_B a\frac{x_{13}^2}{2} + N_B a\frac{x_{13}^2}{2} - N_B a a x_{13} - N_C\frac{x_{13}^3}{3} + N_C a\frac{x_{13}^2}{2} + T_B b\frac{x_{13}^2}{2} -$$

$$- T_B b a x_{13} + T_C b\frac{x_{13}^2}{2} - T_C b a x_{13}\Big)\Big]_{3/2a}^{2a} + \Big[\Big(M_B a x_{14} + M_C a x_{14} - T_B b a x_{14} + T_B a\frac{x_{14}^2}{2} - T_C b a x_{14}$$

$$+ T_C a\frac{x_{14}^2}{2} + N_B a a x_{14} + N_C 2 a a x_{14} - F_B b\frac{x_{14}^2}{2} - F_D\frac{x_{14}^2}{2}\Big)\Bigg]_0^C\Bigg)$$

Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě B

$$Ø = \frac{1}{EJ_y}\left(\left[\left(M_B\frac{x_4^2}{2} - T_B\frac{x_4^3}{3}\right)\right]_0^b + \left[\left(M_B bx_5 + M_C bx_5 + T_B bbx_5 + T_C bbx_5 + N_C b\frac{x_5^2}{2} + N_B b\frac{x_5^2}{2} - \right.\right.\right.$$

$$- N_B bax_5 - M_B bx_5 - M_C bx_5 - T_B bbx_5 - T_C bbx_5 - N_C b\frac{x_5^2}{2} - N_B b\frac{x_5^2}{2} + N_B bax_5 \left.\right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(M_B bx_6 + \right.\right.$$

$$+ M_C bx_6 + T_B bbx_6 + T_C bbx_6 + N_C b\frac{x_6^2}{2} + N_B b\frac{x_6^2}{2} - N_B bax_6 - M_B bx_6 - M_C bx_6 - T_B bbx_6 - T_C bbx_6 -$$

$$- N_C b\frac{x_6^2}{2} - N_B b\frac{x_6^2}{2} + N_B bax_6 \left.\right)\right]_{3/2a}^{2a} + \left[\left(M_B bx_7 - M_B\frac{x_7^2}{2} + M_C bx_7 - M_C\frac{x_7^2}{2} - F_A b\frac{x_7^2}{2} + F_A\frac{x_7^3}{3} - \right.\right.$$

$$- F_C b\frac{x_7^2}{2} + F_C\frac{x_7^3}{3} + T_B bbx_7 - T_B b\frac{x_7^2}{2} - T_B b\frac{x_7^2}{2} + T_B\frac{x_7^3}{3} + T_C bbx_7 - T_C b\frac{x_7^2}{2} - T_C b\frac{x_7^2}{2} + T_C\frac{x_7^3}{3} +$$

$$\left.\left.\left. + N_B bax_7 - N_B a\frac{x_7^2}{2} + N_C 2abx_7 - N_C 2a\frac{x_7^2}{2}\right)\right]_0^x + \left[\left(-M_B\frac{x_{11}^2}{2} + T_B\frac{x_{11}^3}{3}\right)\right]_0^b + \left[\left(-M_B bx_{12} - M_C bx_{12} - \right.\right.\right.$$

$$- N_B b\frac{x_{12}^2}{2} + N_B abx_{12} - N_C b\frac{x_{12}^2}{2} + T_B bbx_{12} + T_C bbx_{12} + M_B bx_{12} + M_C bx_{12} + N_B b\frac{x_{12}^2}{2} - N_B abx_{12} +$$

$$\left.\left.\left. + N_C b\frac{x_{12}^2}{2} - T_B bbx_{12} - T_C bbx_{12}\right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(-M_B bx_{13} - M_C bx_{13} - N_B b\frac{x_{13}^2}{2} + N_B abx_{13} - N_C b\frac{x_{13}^2}{2} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + T_B bbx_{13} + T_C bbx_{13} + M_B bx_{13} + M_C bx_{13} + N_B b\frac{x_{13}^2}{2} - N_B abx_{13} + N_C b\frac{x_{13}^2}{2} - T_B bbx_{13} - T_C bbx_{13}\right)\right]_{3/2a}^{2a} +$$

$$+ \left[\left(-M_B bx_{14} + M_B\frac{x_{14}^2}{2} - M_C bx_{14} + M_C\frac{x_{14}^2}{2} + T_B bbx_{14} - T_B b\frac{x_{14}^2}{2} - T_B b\frac{x_{14}^2}{2} + T_B\frac{x_{14}^3}{3} + T_C bbx_{14} - \right.\right.$$

$$- T_C b\frac{x_{14}^2}{2} - T_c b\frac{x_{14}^2}{2} + T_C\frac{x_{14}^3}{3} - N_B abx_{14} + N_B a\frac{x_{14}^2}{2} - N_C 2abx_{14} + N_C 2a\frac{x_{14}^2}{2} + F_B b\frac{x_{14}^2}{2} - F_B\frac{x_{14}^3}{3} +$$

$$\left.\left.\left. + F_D b\frac{x_{14}^2}{2} - F_D\frac{x_{14}^3}{3}\right)\right]_0^C\right)$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B

$$\text{Ø} = \frac{1}{EJ_y}\left(\left[\left(M_B x_4 + T_B \frac{x_4^2}{2}\right)\right]_0^b + \left[\left(M_B x_5 + M_C x_5 + T_B b x_5 + T_C b x_5 + N_C \frac{x_5^2}{2} + N_B \frac{x_5^2}{2} - N_B a x_5 - \right.\right.\right.$$

$$- M_B x_5 - M_C x_5 - T_B b x_5 - T_C b x_5 - N_C \frac{x_5^2}{2} - N_B \frac{x_5^2}{2} + N_B a x_5 \left.\right)\right]_a^{3/2a} + \left[\left(M_B x_6 + M_C x_6 + T_B b x_6 + \right.\right.$$

$$+ T_C b x_6 + N_C \frac{x_6^2}{2} + N_B \frac{x_6^2}{2} - N_B a x_6 - M_B x_6 - M_C x_6 - T_B b x_6 - T_C b x_6 - N_C \frac{x_6^2}{2} - N_B \frac{x_6^2}{2} +$$

$$\left.\left. + N_B a x_6 \right)\right]_{3/2a}^{2a} + \left[\left(M_B x_7 + M_C x_7 - F_A \frac{x_7^2}{2} - F_C \frac{x_7^2}{2} + T_B b x_7 - T_B \frac{x_7^2}{2} + T_C b x_7 - T_C \frac{x_7^2}{2} + N_B a x_7 + \right.\right.$$

$$\left.\left. + N_C 2a x_7\right)\right]_0^x + \left[\left(M_B x_{11} - T_B \frac{x_{11}^2}{2}\right)\right]_0^b + \left[\left(M_B x_{12} + M_C x_{12} + N_B \frac{x_{12}^2}{2} - N_B a x_{12} + N_C \frac{x_{12}^2}{2} - T_B b x_{12} - \right.\right.$$

$$\left. - T_C b x_{12} - M_B x_{12} - M_C x_{12} - N_B \frac{x_{12}^2}{2} + N_B a x_{12} - N_C \frac{x_{12}^2}{2} + T_B b x_{12} + T_C b x_{12}\right)\Big]_a^{3/2a} + \left[\left(M_B x_{13} + M_C x_{13} + \right.\right.$$

$$+ N_B \frac{x_{13}^2}{2} - N_B a x_{13} + N_C \frac{x_{13}^2}{2} - T_B b x_{13} - T_C b x_{13} - M_B x_{13} - M_C x_{13} - N_B \frac{x_{13}^2}{2} + N_B a x_{13} - N_C \frac{x_{13}^2}{2} +$$

$$\left.\left. + T_B b x_{13} + T_C b x_{13}\right)\right]_{3/2a}^{2a} + \left[\left(M_B x_{14} + M_C x_{14} - T_B b x_{14} + T_B \frac{x_{14}^2}{2} - T_C b x_{14} + T_C \frac{x_{14}^2}{2} + N_B a x_{14} + N_C 2a x_{14} - \right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - F_B \frac{x_{14}^2}{2} - F_D \frac{x_{14}^2}{2}\right)\right]_0^C\right)$$

6. Dosazení mezí do podmínek spojitosti deformací po integraci

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C

$$\varnothing = \frac{1}{EJ_y}\left[\left(M_C\frac{a^2}{8}+T_Cb\frac{a^2}{8}+N_C\frac{a^3}{16}\right)+\left(M_C\frac{a^2}{2}+T_Cb\frac{a^2}{2}+N_C\frac{a^3}{3}-M_C\frac{a^2}{8}-T_Cb\frac{a^2}{8}-N_C\frac{a^3}{16}\right)+\right.$$
$$+\left(M_B\frac{9a^2}{8}+M_C\frac{9a^2}{8}+T_Bb\frac{9a^2}{8}+T_Cb\frac{9a^2}{8}+N_C\frac{27a^3}{24}+N_B\frac{27a^3}{24}-N_Ba\frac{9a^2}{8}-M_B\frac{a^2}{2}-M_C\frac{a^2}{2}-\right.$$
$$\left.-T_Bb\frac{a^2}{2}-T_Cb\frac{a^2}{2}-N_C\frac{a^3}{3}-N_B\frac{a^3}{3}+N_Ba\frac{a^2}{2}\right)+\left(M_B\frac{4a^2}{2}+M_C\frac{4a^2}{2}+T_Cb\frac{4a^2}{2}+T_Bb\frac{4a^2}{2}+\right.$$
$$+N_C\frac{8a^3}{3}+N_B\frac{8a^3}{3}-N_Ba\frac{4a^2}{2}-M_B\frac{9a^2}{8}-M_C\frac{9a^2}{8}-T_Cb\frac{9a^2}{8}-T_Bb\frac{9a^2}{8}-N_C\frac{27a^3}{24}-N_B\frac{27a^3}{24}+$$
$$\left.+N_Ba\frac{9a^2}{8}\right)+\left(M_B2ax+M_C2ax-F_A2a\frac{x^2}{2}-F_C2a\frac{x^2}{2}+T_B2abx-T_B2a\frac{x^2}{2}+T_C2abx-T_C2a\frac{x^2}{2}+\right.$$
$$\left.+N_Ba2ax+N_C2a2ax\right)+\left(M_C\frac{a^2}{8}-T_Cb\frac{a^2}{8}+N_C\frac{a^3}{16}\right)+\left(M_C\frac{a^2}{2}+N_C\frac{a^3}{3}-T_Cb\frac{a^2}{2}-M_C\frac{a^2}{8}-N_C\frac{a^3}{16}+\right.$$
$$\left.+T_Cb\frac{a^2}{8}\right)+\left(M_B\frac{9a^2}{8}+M_C\frac{9a^2}{8}+N_B\frac{27a^3}{24}-N_Ba\frac{9a^2}{8}+N_C\frac{27a^3}{24}-T_Bb\frac{9a^2}{8}-T_Cb\frac{9a^2}{8}-M_B\frac{a^2}{2}-\right.$$
$$\left.-M_C\frac{a^2}{2}-N_B\frac{a^3}{3}+N_Ba\frac{a^2}{2}-N_C\frac{a^3}{3}+T_Bb\frac{a^2}{2}+T_Cb\frac{a^2}{2}\right)+\left(M_B\frac{4a^2}{2}+M_C\frac{4a^2}{2}+N_B\frac{8a^3}{3}-\right.$$
$$-N_Ba\frac{4a^2}{2}+N_C\frac{8a^3}{3}-T_Bb\frac{4a^2}{2}-T_Cb\frac{4a^2}{2}-M_B\frac{9a^2}{8}-M_C\frac{9a^2}{8}-N_B\frac{27a^3}{24}+N_Ba\frac{9a^2}{8}-N_C\frac{27a^3}{24}+$$
$$\left.+T_Bb\frac{9a^2}{8}+T_Cb\frac{9a^2}{8}\right)+\left(M_B2ac+M_C2ac-T_B2abc+T_B\frac{c^2}{2}2a-T_C2abc+T_C2a\frac{c^2}{2}+\right.$$
$$\left.\left.+N_B2aac+N_C2a2ac-F_B2a\frac{c^2}{2}-F_D2a\frac{c^2}{2}\right)\right]$$

Podmínka spojitosti deformace svislý posuv v bodě C

$$\text{Ø} = \frac{1}{EJ_y}\left[\left(M_C\frac{b^2}{2} + T_C\frac{b^3}{3}\right) + \left(M_Cb\frac{a}{2} + T_Cbb\frac{a}{2} + N_Cb\frac{a^2}{8}\right) + \left(M_Cba + T_Cbba + N_Cb\frac{a^2}{2} - M_Cb\frac{a}{2} - \right.\right.$$

$$- T_Cbb\frac{a}{2} - N_cb\frac{a^2}{8}\Big) + \left(M_Bb\frac{3a}{2} + M_Cb\frac{3a}{2} + T_Bbb\frac{3a}{2} + T_Cbb\frac{3a}{2} + N_Cb\frac{9a^2}{8} + N_Bb\frac{9a^2}{8} - N_Bba\frac{3a}{2} - M_Bba - \right.$$

$$- M_Cba - T_Bbba - T_Cbba - N_Cb\frac{a^2}{2} - N_Bb\frac{a^2}{2} + N_Bbaa\Big) + \left(M_Bb2a + M_Cb2a + T_Bbb2a + T_Cbb2a + N_Cb\frac{4a^2}{2} + \right.$$

$$\left. + N_Bb\frac{4a^2}{2} - N_Bab2a - M_Bb\frac{3a}{2} - M_Cb\frac{3a}{2} - T_Bbb\frac{3a}{2} - T_Cbb\frac{3a}{2} - N_Cb\frac{9a^2}{8} - N_Bb\frac{9a^2}{8} + N_Bab\frac{3a}{2}\right) + \left(M_Bbx - \right.$$

$$- M_B\frac{x^2}{2} + M_Cbx - M_C\frac{x^2}{2} - F_Ab\frac{x^2}{2} + F_A\frac{x^3}{3} - F_Cb\frac{x^2}{2} + F_C\frac{x^3}{3} + T_Bbbx - T_Bb\frac{x^2}{2} - T_Bb\frac{x^2}{2} + T_B\frac{x^3}{3} + \right.$$

$$\left. + T_Cbbx - T_Cb\frac{x^2}{2} - T_Cb\frac{x^2}{2} + T_C\frac{x^3}{3} + N_Babx - N_Ba\frac{x^2}{2} + N_C2abx - N_C2a\frac{x^2}{2}\right) + \left(-M_C\frac{b^2}{2} + T_C\frac{b^3}{3}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(-M_Cb\frac{a}{2} + T_Cbb\frac{a}{2} - N_Cb\frac{a^2}{8}\right) + \left(-M_Cba - N_Cb\frac{a^2}{2} + T_Cbba + M_Cb\frac{a}{2} + N_Cb\frac{a^2}{8} - T_Cbb\frac{a}{2}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(-M_Bb\frac{3a}{2} - M_Cb\frac{3a}{2} - N_Bb\frac{9a^2}{8} + N_Bba\frac{3a}{2} - N_Cb\frac{9a^2}{8} + T_Bbb\frac{3a}{2} + T_Cbb\frac{3a}{2} + M_Bba + M_Cba + N_Bb\frac{a^2}{2} - \right.\right.$$

$$- N_Bbaa + N_Cb\frac{a^2}{2} - T_Bbba - T_Cbba\Big) + \left(-M_Bb2a - M_Cb2a - N_Bb\frac{4a^2}{2} + N_Bab2a - N_Cb\frac{4a^2}{2} + \right.$$

$$\left. + T_Bbb2a + T_Cbb2a + M_Bb\frac{3a}{2} + M_Cb\frac{3a}{2} + N_Bb\frac{9a^2}{8} - N_Bab\frac{3a}{2} + N_Cb\frac{9a^2}{8} - T_Bbb\frac{3a}{2} - T_Cbb\frac{3a}{2}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(-M_Bbc + M_B\frac{c^2}{2} - M_Cbc + M_C\frac{c^2}{2} + T_Bbbc - T_Bb\frac{c^2}{2} - T_Bb\frac{c^2}{2} + T_B\frac{c^3}{3} + T_Cbbc - T_Cb\frac{c^2}{2} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - T_Cb\frac{c^2}{2} + T_C\frac{c^3}{3} - N_Babc + N_Ba\frac{c^2}{2} - N_C2abc + N_C2a\frac{c^2}{2} + F_Bb\frac{c^2}{2} - F_B\frac{c^3}{3} + F_Db\frac{c^2}{2} - F_D\frac{c^3}{3}\right)\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C

$$\varnothing = \frac{1}{EJ_y}\left[\left(M_C b + T_C \frac{b^2}{2}\right) + \left(M_C \frac{a}{2} + T_C b \frac{a}{2} + N_C \frac{a^2}{8}\right) + \left(M_C a + T_C b a + N_C \frac{a^2}{2} - M_C \frac{a}{2} - \right.\right.$$

$$- T_C b \frac{a}{2} - N_c \frac{a^2}{8}\Big) + \left(M_B \frac{3a}{2} + M_C \frac{3a}{2} + T_B b \frac{3a}{2} + T_C b \frac{3a}{2} + N_C \frac{9a^2}{8} + N_B \frac{9a^2}{8} - N_B a \frac{3a}{2} - M_B a - M_C a - T_B b a - \right.$$

$$- T_C b a - N_C \frac{a^2}{2} - N_B \frac{a^2}{2} + N_B a a\Big) + \left(M_B 2a + M_C 2a + T_B b 2a + T_C b 2a + N_C \frac{4a^2}{2} + N_B \frac{4a^2}{2} - N_B a 2a - M_B \frac{3a}{2} - \right.$$

$$- M_C \frac{3a}{2} - T_B b \frac{3a}{2} - T_C b \frac{3a}{2} - N_C \frac{9a^2}{8} - N_B \frac{9a^2}{8} + N_B a \frac{3a}{2}\Big) + \left(M_B x + M_C x - F_A \frac{x^2}{2} - F_C \frac{x^2}{2} + T_B b x - T_B \frac{x^2}{2} + \right.$$

$$+ T_C b x - T_C \frac{x^2}{2} + N_B a x + N_C 2a x\Big) + \left(M_C b - T_C \frac{b^2}{2}\right) + \left(M_C \frac{a}{2} - T_C b \frac{a}{2} + N_C \frac{a^2}{8}\right) + \left(M_C a + N_C \frac{a^2}{2} - \right.$$

$$- T_C b a - M_C \frac{a}{2} - N_C \frac{a^2}{8} + T_C b \frac{a}{2}\Big) + \left(M_B \frac{3a}{2} + M_C \frac{3a}{2} + N_B \frac{9a^2}{8} - N_B a \frac{3a}{2} + N_C \frac{9a^2}{8} - T_B b \frac{3a}{2} - T_C b \frac{3a}{2} - \right.$$

$$- M_B a - M_C a - N_B \frac{a^2}{2} + N_B a a - N_C \frac{a^2}{2} + T_B b a + T_C b a\Big) + \left(M_B 2a + M_C 2a + N_B \frac{4a^2}{2} - N_B a 2a + \right.$$

$$+ N_C \frac{4a^2}{2} - T_B b 2a - T_C b 2a - M_B \frac{3a}{2} - M_C \frac{3a}{2} - N_B \frac{9a^2}{8} + N_B a \frac{3a}{2} - N_C \frac{9a^2}{8} + T_B b \frac{3a}{2} + T_C b \frac{3a}{2}\Big) +$$

$$\left. + \left(M_B c + M_C c - T_B b c + T_B \frac{c^2}{2} - T_C b c + T_C \frac{c^2}{2} + N_B a c + N_C 2a c - F_B b \frac{c^2}{2} - F_D \frac{c^2}{2}\right)\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B

$$\text{Ø} = \frac{1}{EJ_y}\left[\left(M_B\frac{9a^2}{8} - M_Ba\frac{3a}{2} + M_C\frac{9a^2}{8} - M_Ca\frac{3a}{2} + T_Bb\frac{9a^2}{8} - T_Bab\frac{3a}{2} + T_Cb\frac{9a^2}{8} - T_Cba\frac{3a}{2} + \right.\right.$$
$$+ N_C\frac{27a^3}{24} - N_Ca\frac{9a^2}{8} + N_B\frac{27a^3}{24} - N_Ba\frac{9a^2}{8} - N_Ba\frac{9a^2}{8} + N_Baa\frac{3a}{2} - M_B\frac{a^2}{2} + M_Baa - M_C\frac{a^2}{2} +$$
$$+ M_Caa - T_Bb\frac{a^2}{2} + T_Baba - T_Cb\frac{a^2}{2} + T_Cbaa - N_C\frac{a^3}{3} + N_Ca\frac{a^2}{2} - N_B\frac{a^3}{3} + N_Ba\frac{a^2}{2} + N_Ba\frac{a^2}{2} -$$
$$- N_Baaa\Big) + \left(M_B\frac{4a^2}{2} - M_Ba2a + M_C\frac{4a^2}{2} - M_Ca2a + T_Bb\frac{4a^2}{2} - T_Bab2a + T_Cb\frac{4a^2}{2} - T_Cba2a + \right.$$
$$+ N_C\frac{8a^3}{3} - N_Ca\frac{4a^2}{2} + N_B\frac{8a^3}{3} - N_Ba\frac{4a^2}{2} - N_Ba\frac{4a^2}{2} + N_Baa2a - M_B\frac{9a^2}{8} + M_Ba\frac{3a}{2} - M_C\frac{9a^2}{8} +$$
$$+ M_Ca\frac{3a}{2} - T_Bb\frac{9a^2}{8} + T_Bab\frac{3a}{2} - T_Cb\frac{9a^2}{8} + T_Cba\frac{3a}{2} - N_C\frac{27a^3}{24} + N_Ca\frac{9a^2}{8} - N_B\frac{27a^3}{24} + N_Ba\frac{9a^2}{8} +$$
$$\left.\left. + N_Ba\frac{9a^2}{8} - N_Baa\frac{3a}{2}\right) + \left(M_Bax + M_Cax - F_Aa\frac{x^2}{2} - F_Ca\frac{x^2}{2} + T_Bbax - T_Ba\frac{x^2}{2} + T_Cabx - T_Ca\frac{x^2}{2} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + N_Baax + N_C2aax\right) + \left(M_B\frac{9a^2}{8} - M_Ba\frac{3a}{2} + M_C\frac{9a^2}{8} - M_Ca\frac{3a}{2} + N_B\frac{27a^3}{24} - N_Ba\frac{9a^2}{8} - N_Ba\frac{9a^2}{8} + \right.$$
$$+ N_Baa\frac{3a}{2} + N_C\frac{27a^3}{24} - N_Ca\frac{9a^2}{8} - T_Bb\frac{9a^2}{8} + T_Bba\frac{3a}{2} - T_Cb\frac{9a^2}{8} + T_Cba\frac{3a}{2} - M_B\frac{a^2}{2} + M_Baa -$$
$$- M_C\frac{a^2}{2} + M_Caa - N_B\frac{a^3}{3} + N_Ba\frac{a^2}{2} + N_Ba\frac{a^2}{2} - N_Baaa - N_C\frac{a^3}{3} + N_Ca\frac{a^2}{2} + T_Bb\frac{a^2}{2} - T_Bbaa +$$
$$\left.\left. + T_Cb\frac{a^2}{2} - T_Cbaa\right) + \left(M_B\frac{4a^2}{2} - M_Ba2a + M_C\frac{4a^2}{2} - M_Ca2a + N_B\frac{8a^3}{3} - N_Ba\frac{4a^2}{2} - N_Ba\frac{4a^2}{2} + \right.\right.$$
$$+ N_Baa2a + N_C\frac{8a^3}{3} - N_Ca\frac{4a^2}{2} - T_Bb\frac{4a^2}{2} + T_Bba2a - T_Cb\frac{4a^2}{2} + T_Cba2a - M_B\frac{9a^2}{8} + M_Ba\frac{3a}{2} -$$
$$- M_C\frac{9a^2}{8} + M_Ca\frac{3a}{2} - N_B\frac{27a^3}{24} + N_Ba\frac{9a^2}{8} + N_Ba\frac{9a^2}{8} - N_Baa\frac{3a}{2} - N_C\frac{27a^3}{24} + N_Ca\frac{9a^2}{8} + T_Bb\frac{9a^2}{8} -$$
$$\left.\left. - T_Bba\frac{3a}{2} + T_Cb\frac{9a^2}{8} - T_Cba\frac{3a}{2}\right) + \left(M_Bac + M_Cac - T_Bbac + T_Ba\frac{c^2}{2} - T_Cbac + T_Ca\frac{c^2}{2} + N_Baac + \right.\right.$$
$$\left.\left.\left. + N_C2aac - F_Ba\frac{c^2}{2} - F_Da\frac{c^2}{2}\right)\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě B

$$\text{Ø} = \frac{1}{EJ_y}\left[\left(M_B\frac{b^2}{2} - T_B\frac{b^3}{3}\right) + \left(M_B b\frac{3a}{2} + M_C b\frac{3a}{2} + T_B bb\frac{3a}{2} + T_C bb\frac{3a}{2} + N_C b\frac{9a^2}{8} + N_B b\frac{9a^2}{8} - \right.\right.$$

$$- N_B ba\frac{3a}{2} - M_B ba - M_C ba - T_B bba - T_C bba - N_C b\frac{a^2}{2} - N_B b\frac{a^2}{2} + N_B baa\Big) + \Big(M_B b2a + M_C b2a +$$

$$+ T_B bb2a + T_C bb2a + N_C b\frac{4a^2}{2} + N_B b\frac{4a^2}{2} - N_B ba2a - M_B b\frac{3a}{2} - M_C b\frac{3a}{2} - T_B bb\frac{3a}{2} - T_C bb\frac{3a}{2} -$$

$$- N_C b\frac{9a^2}{8} - N_B b\frac{9a^2}{8} + N_B ba\frac{3a}{2}\Big) + \Big(M_B bx - M_B\frac{x^2}{2} + M_C bx - M_C\frac{x^2}{2} - F_A b\frac{x^2}{2} + F_A\frac{x^3}{3} -$$

$$- F_C b\frac{x^2}{2} + F_C\frac{x^3}{3} + T_B bbx - T_B b\frac{x^2}{2} - T_B b\frac{x^2}{2} + T_B\frac{x^3}{3} + T_C bbx - T_C b\frac{x^2}{2} - T_C b\frac{x^2}{2} + T_C\frac{x^3}{3} +$$

$$+ N_B bax - N_B a\frac{x^2}{2} + N_C 2abx - N_C 2a\frac{x^2}{2}\Big) + \left(-M_B\frac{b^2}{2} + T_B\frac{b^3}{3}\right) + \left(-M_B b\frac{3a}{2} - M_C b\frac{3a}{2} -\right.$$

$$- N_B b\frac{9a^2}{8} + N_B ab\frac{3a}{2} - N_C b\frac{9a^2}{8} + T_B bb\frac{3a}{2} + T_C bb\frac{3a}{2} + M_B ba + M_C ba + N_B b\frac{a^2}{2} - N_B aba +$$

$$+ N_C b\frac{a^2}{2} - T_B bba - T_C bba\Big) + \Big(-M_B b2a - M_C b2a - N_B b\frac{4a^2}{2} + N_B ab2a - N_C b\frac{4a^2}{2} +$$

$$\left.+ T_B bb2a + T_C bb2a + M_B b\frac{3a}{2} + M_C b\frac{3a}{2} + N_B b\frac{9a^2}{8} - N_B ab\frac{3a}{2} + N_C b\frac{9a^2}{8} - T_B bb\frac{3a}{2} - T_C bb\frac{3a}{2}\right) +$$

$$+ \Big(-M_B bc + M_B\frac{c^2}{2} - M_C bc + M_C\frac{c^2}{2} + T_B bbc - T_B b\frac{c^2}{2} - T_B b\frac{c^2}{2} + T_B\frac{c^3}{3} + T_C bbc -$$

$$- T_C b\frac{c^2}{2} - T_c b\frac{c^2}{2} + T_C\frac{c^3}{3} - N_B abc + N_B a\frac{c^2}{2} - N_C 2abc + N_C 2a\frac{c^2}{2} + F_B b\frac{c^2}{2} - F_B\frac{c^3}{3} +$$

$$\left.\left.+ F_D b\frac{c^2}{2} - F_D\frac{c^3}{3}\right)\right]$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B

$$\varnothing = \frac{1}{EJ_y}\left[\left(M_B b + T_B \frac{b^2}{2}\right) + \left(M_B \frac{3a}{2} + M_C \frac{3a}{2} + T_B b\frac{3a}{2} + T_C b\frac{3a}{2} + N_C \frac{9a^2}{8} + N_B \frac{9a^2}{8} - N_B a\frac{3a}{2} - \right.\right.$$

$$- M_B a - M_C a - T_B ba - T_C ba - N_C \frac{a^2}{2} - N_B \frac{a^2}{2} + N_B aa\Big) + \Big(M_B 2a + M_C 2a + T_B b2a + T_C b2a +$$

$$+ N_C \frac{4a^2}{2} + N_B \frac{4a^2}{2} - N_B a2a - M_B \frac{3a}{2} - M_C \frac{3a}{2} - T_B b\frac{3a}{2} - T_C b\frac{3a}{2} - N_C \frac{9a^2}{8} - N_B \frac{9a^2}{8} +$$

$$\left. + N_B a\frac{3a}{2}\right) + \Big(M_B x + M_C x - F_A \frac{x^2}{2} - F_C \frac{x^2}{2} + T_B bx - T_B \frac{x^2}{2} + T_C bx - T_C \frac{x^2}{2} + N_B ax + N_C 2ax\Big) +$$

$$+ \left(M_B b - T_B \frac{b^2}{2}\right) + \left(M_B \frac{3a}{2} + M_C \frac{3a}{2} + N_B \frac{9a^2}{8} - N_B a\frac{3a}{2} + N_C \frac{9a^2}{8} - T_B b\frac{3a}{2} - T_C b\frac{3a}{2} - \right.$$

$$- M_B a - M_C a - N_B \frac{a^2}{2} + N_B aa - N_C \frac{a^2}{2} + T_B ba + T_C ba\Big) + \Big(M_B 2a + M_C 2a + N_B \frac{4a^2}{2} -$$

$$- N_B a2a + N_C \frac{4a^2}{2} - T_B b2a - T_C b2a - M_B \frac{3a}{2} - M_C \frac{3a}{2} - N_B \frac{9a^2}{8} + N_B a\frac{3a}{2} - N_C \frac{9a^2}{8} +$$

$$\left. + T_B b\frac{3a}{2} + T_C b\frac{3a}{2}\right) + \Big(M_B c + M_C c - T_B bc + T_B \frac{c^2}{2} - T_C bc + T_C \frac{c^2}{2} + N_B ac + N_C 2ac -$$

$$\left. - F_B \frac{c^2}{2} - F_D \frac{c^2}{2}\right)\Big]$$

7. Konečná verze podmínek spojitosti deformací po algebraických úpravách

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě C

$$\frac{1}{EJ_y}\left(M_C\left(4a^2+2ax+2ac\right)+T_C\left(2abx-ax^2-2abc+ac^2\right)+N_C\left(\frac{16a^3}{3}+4a^2x+4a^2c\right)+\right.$$
$$+M_B\left(3a^2+2ax+2ac\right)+T_C\left(2abx-ax^2+c^2a-2abc\right)+N_B\left(\frac{5a^2}{3}+2a^2x+2a^2c\right)-F_A2a\frac{x^2}{2}-$$
$$\left.-F_C2a\frac{x^2}{2}-F_B2a\frac{c^2}{2}-F_D2a\frac{c^2}{2}\right)=Ø$$

Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě C

$$\frac{1}{EJ_y}\left(M_C\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+T_C\left(\frac{2b^3}{3}+4b^2a+b^2x-bx^2+\frac{x^3}{3}+b^2c-bc^2+\frac{c^3}{3}\right)+\right.$$
$$+N_C\left(2abx-ax^2-2abc+ac^2\right)+M_B\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+T_B\left(2b^2a+b^2x-bx^2+\frac{x^3}{3}+b^2c-bc^2+\frac{c^3}{3}\right)+$$
$$+N_B\left(abx-\frac{ax^2}{2}-abc+\frac{ac^2}{2}\right)-F_Ab\frac{x^2}{2}+F_A\frac{x^3}{3}-F_Cb\frac{x^2}{2}+F_C\frac{x^3}{3}+F_Bb\frac{c^2}{2}-F_B\frac{c^3}{3}+F_Db\frac{c^2}{2}-$$
$$\left.-F_D\frac{c^3}{3}\right)=Ø$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě C

$$\frac{1}{EJ_y}\left(M_C\left(2b+x+4a+c\right)+T_C\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+N_C\left(4a^2+2ax+2ac\right)+M_B\left(2a+x+c\right)+\right.$$
$$\left.+T_B\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+N_B\left(a^2+ax+ac\right)-F_A\frac{x^2}{2}-F_C\frac{x^2}{2}-F_B\frac{c^2}{2}-F_D\frac{c^2}{2}\right)=Ø$$

Podmínka spojitosti deformace pro vodorovný posuv v bodě B

$$\frac{1}{EJ_y}\left(M_C\left(a^2+ax+ac\right)+T_C\left(bax-\frac{ax^2}{2}-bac+\frac{ac^2}{2}\right)+N_C\left(\frac{5a^3}{3}+2a^2x+2a^2c\right)+M_B\left(a^2+ax+ac\right)+\right.$$
$$\left.+T_B\left(bax-\frac{ax^2}{2}-bac+\frac{ac^2}{2}\right)+N_B\left(\frac{2a^3}{3}+a^2x+a^2c\right)-F_Aa\frac{x^2}{2}-F_Ca\frac{x^2}{2}-F_Ba\frac{c^2}{2}-F_Da\frac{c^2}{2}\right)=Ø$$

Podmínka spojitosti deformace pro svislý posuv v bodě B

$$\frac{1}{EJ_y}\left(M_C\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+T_C\left(2b^2a+b^2x-bx^2+\frac{x^3}{3}+b^2c-bc^2+\frac{c^3}{3}\right)+\right.$$

$$+N_c\left(2abx-ax^2-2abc-ac^2\right)+M_B\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+T_B\left(\frac{2b^3}{3}+2b^2a+b^2x-bx^2+\right.$$

$$\left.+\frac{x^3}{3}+b^2c-bc^2+\frac{c^3}{3}\right)+N_B\left(bax-\frac{ax^2}{2}-abc+\frac{ac^2}{2}\right)-F_Ab\frac{x^2}{2}-F_Cb\frac{x^2}{2}+F_A\frac{x^3}{3}+F_C\frac{x^3}{3}+$$

$$\left.+F_Bb\frac{c^2}{2}-F_B\frac{c^3}{3}+F_Db\frac{c^2}{2}-F_D\frac{c^3}{3}\right)=Ø$$

Podmínka spojitosti deformace pro natočení v bodě B

$$\frac{1}{EJ_y}\left(M_B\left(2b+2a+x+c\right)+T_C\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+N_B\left(a^2+ax+ac\right)+M_C\left(2a+x+c\right)+\right.$$

$$\left.T_C\left(bx-\frac{x^2}{2}-bc+\frac{c^2}{2}\right)+N_C\left(3a^2+2ax+2ac\right)-F_A\frac{x^2}{2}-F_C\frac{x^2}{2}-F_B\frac{c^2}{2}-F_D\frac{c^2}{2}\right)=Ø$$

8. Řešení soustavy rovnic pomocí programu Maple

V předcházející výpočtové části jsme dospěli k závěrečným rovnicím. Jelikož nám vyšlo šest rovnic o šesti neznámých a v další části budeme zkoumat vliv nárazu na deformaci rámu na rozličných místech čela vozíku, bylo by značně nepraktické jednotlivé případy řešit ručně. Proto bylo pro řešení této problematiky užito výpočetního softwaru Maple 10. Vlastní výpočty v tomto programu jsou uvedeny v příloze. Zde si jen uvedeme aplikaci tohoto programu při řešení více rovnic o více neznámých:

Pro řešení soustavy rovnic je určena třetí syntaxe příkazu solve , a to:

solve({rovnice},{neznámé});

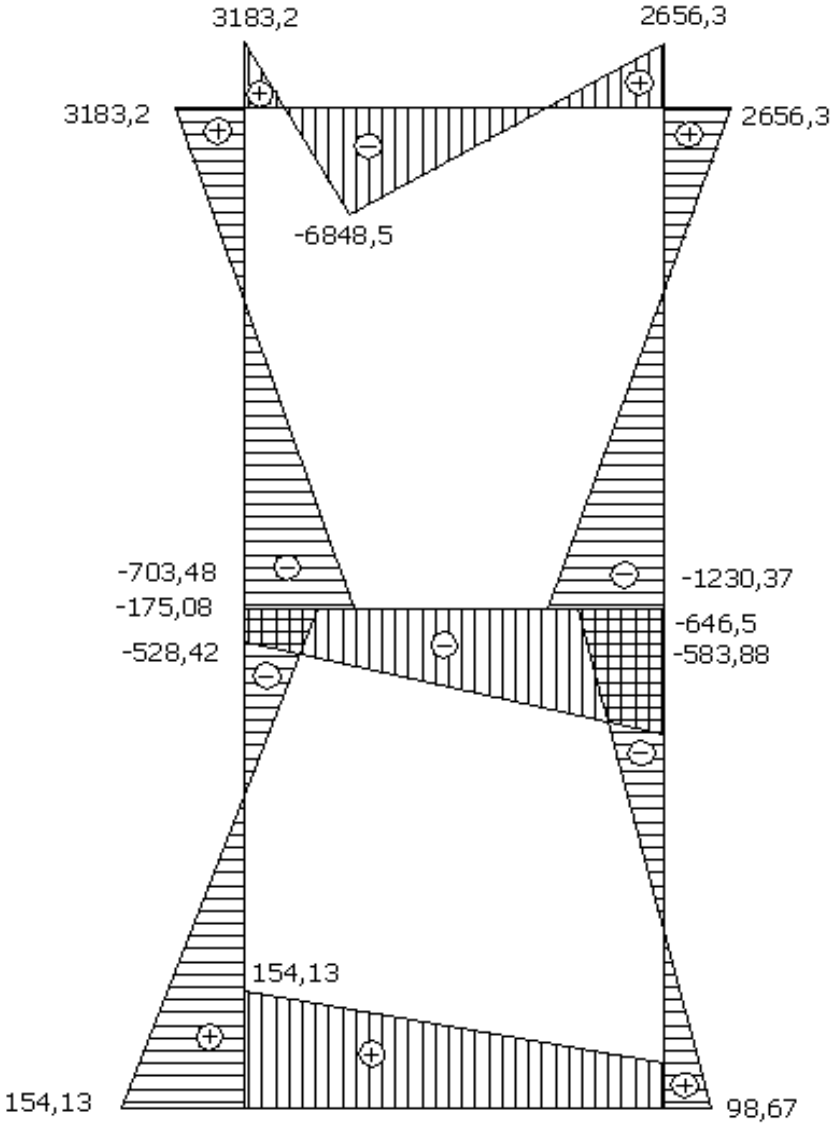
```
> r:=solve({x-2*y=3,x+y=1},{x,y});
  # řešení soustavy rovnic


> r[1];r[2]; # výpis řešení
```

9. Průběhy vnitřních výsledných účinků (VVÚ)

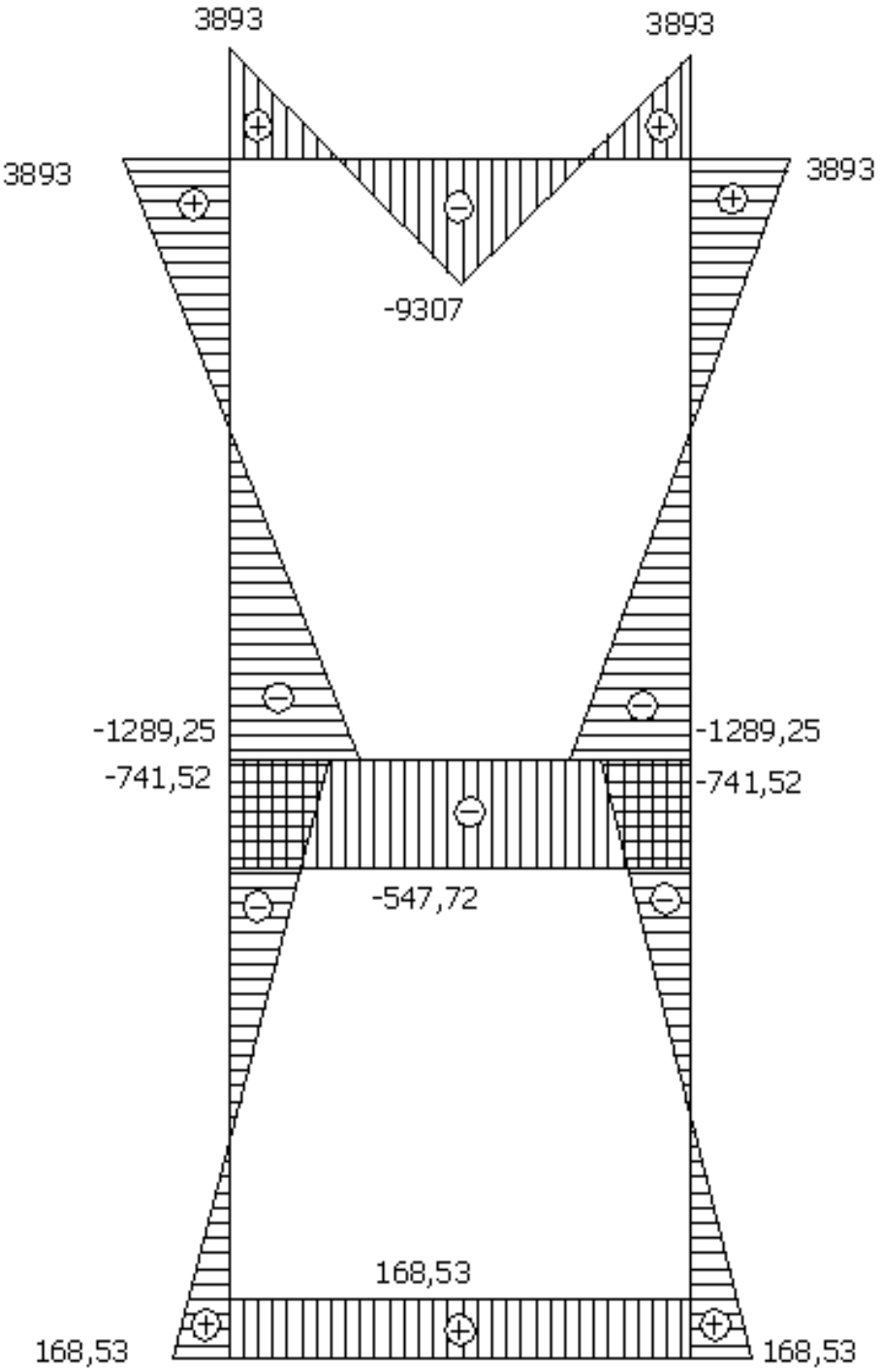
Z výsledků získaných pomocí softwaru Maple 10 (viz. příloha), jsou v následující části této práce zobrazeny průběhy vnitřních výsledných účinků pro různé polohy zatěžující síly.

Průběhy momentů

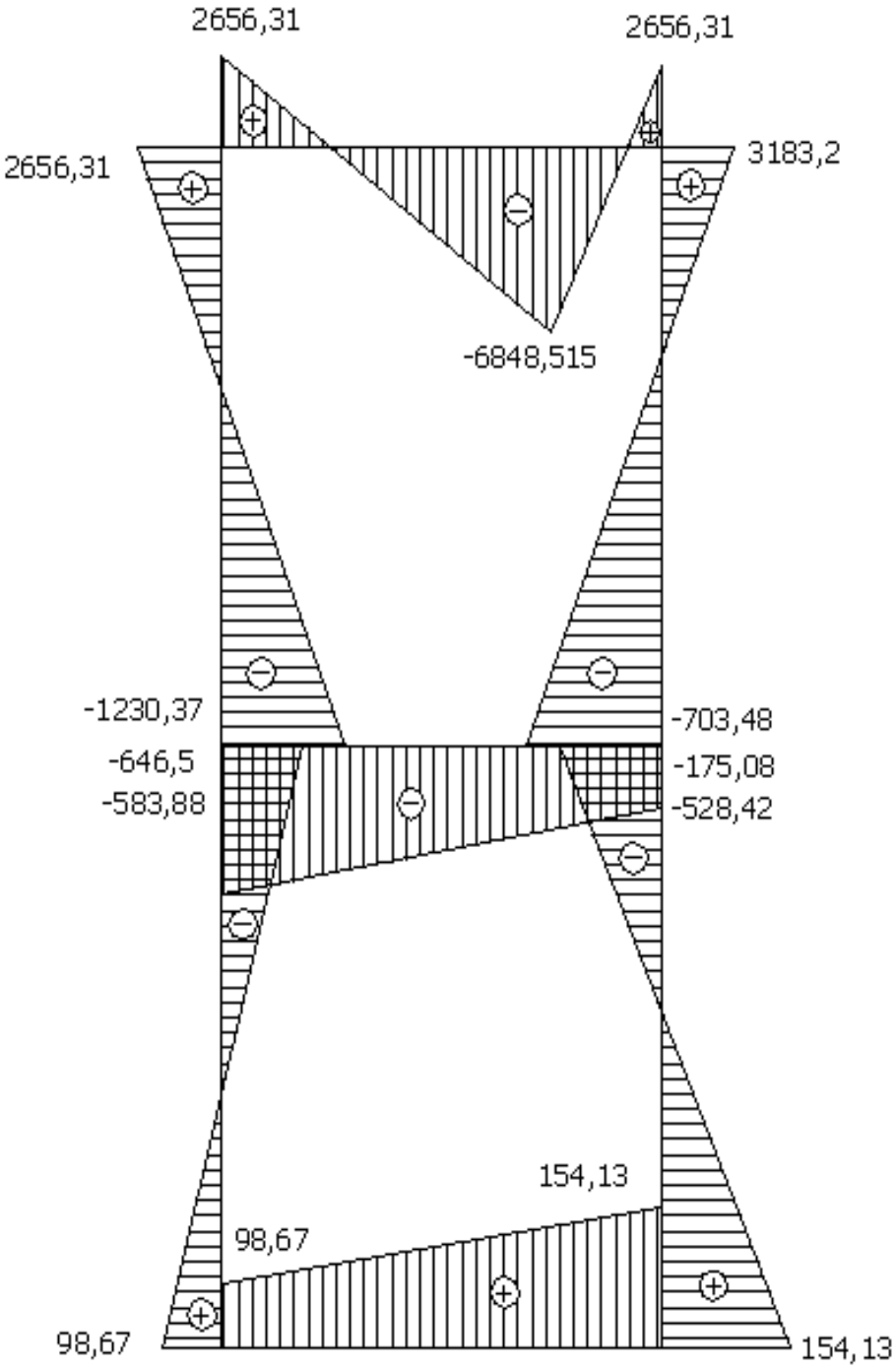
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,5m, c = 1,5m



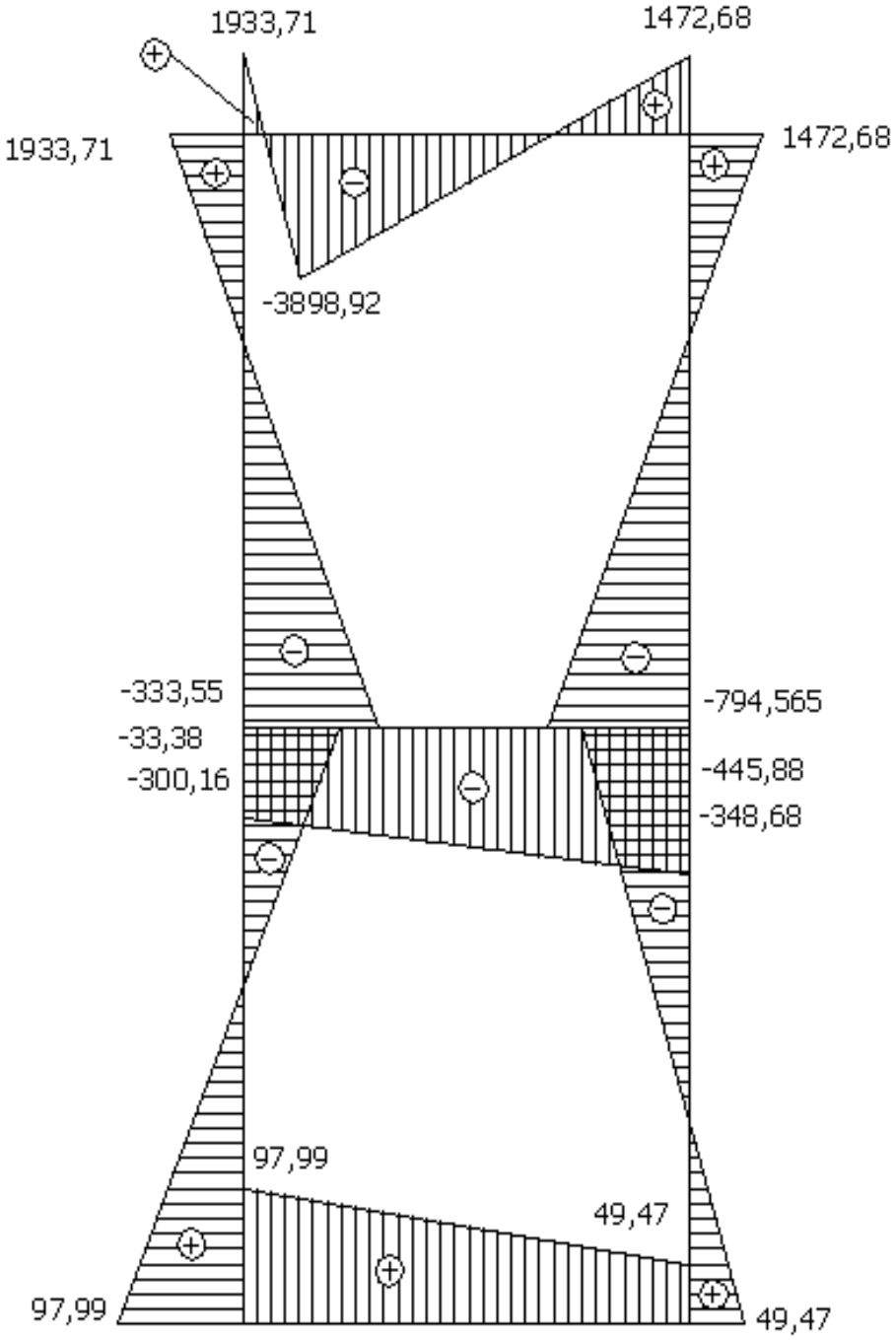
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1m, c = 1m



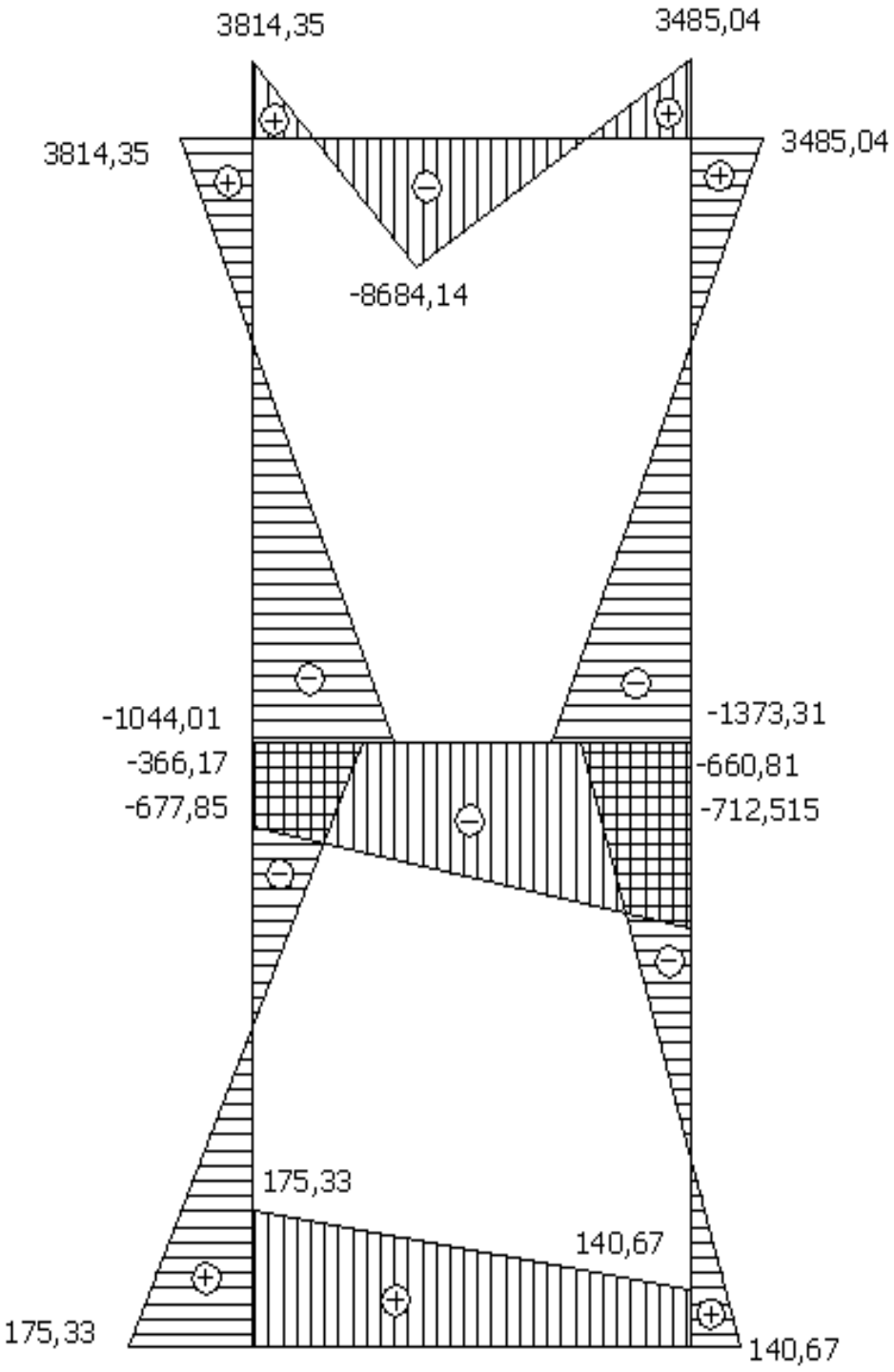
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,5m, c = 0,5m



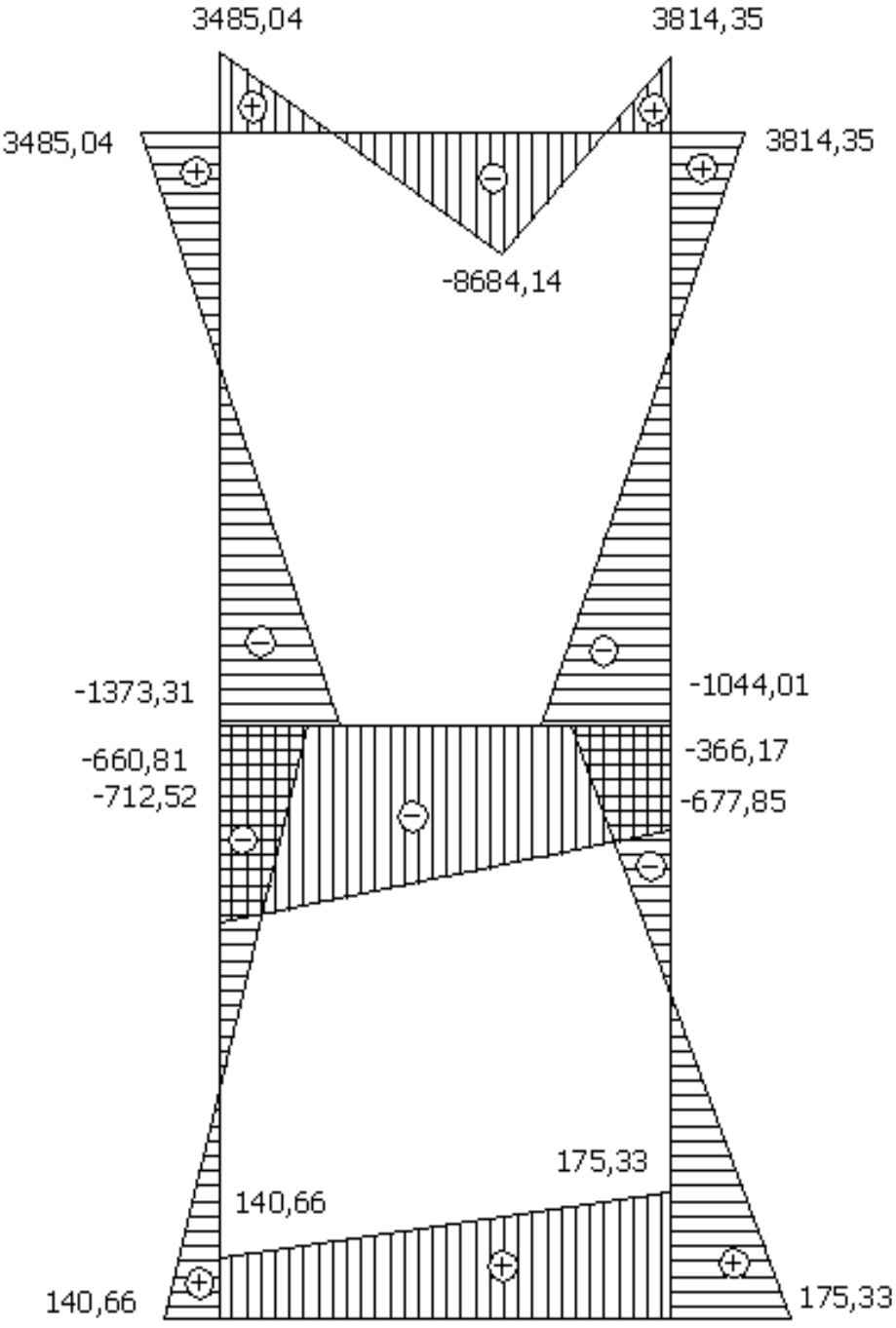
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,25m, c = 1,75m



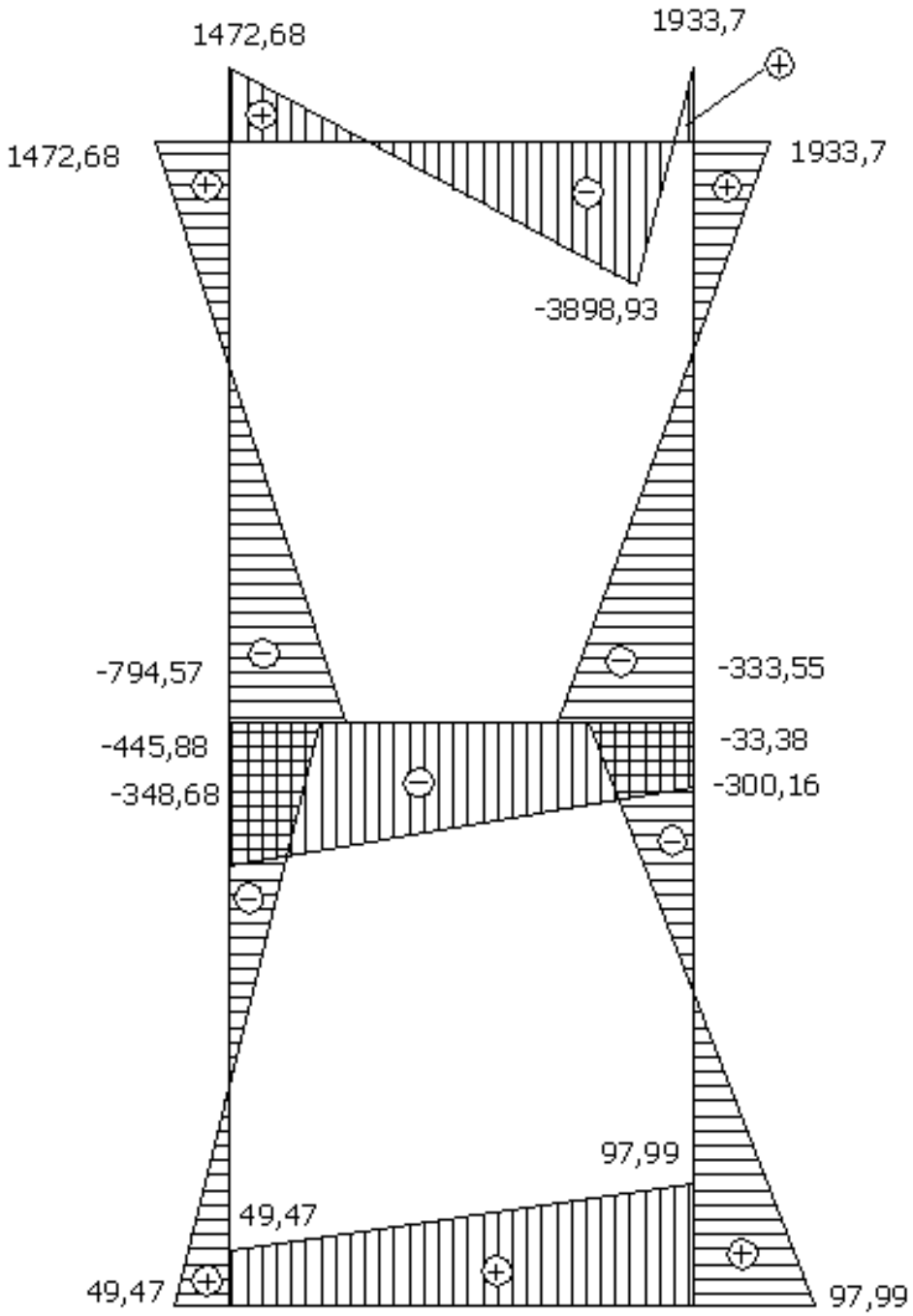
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,75m, c = 1,25m



Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,25m, c = 0,75m



Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,75m, c = 0,25m

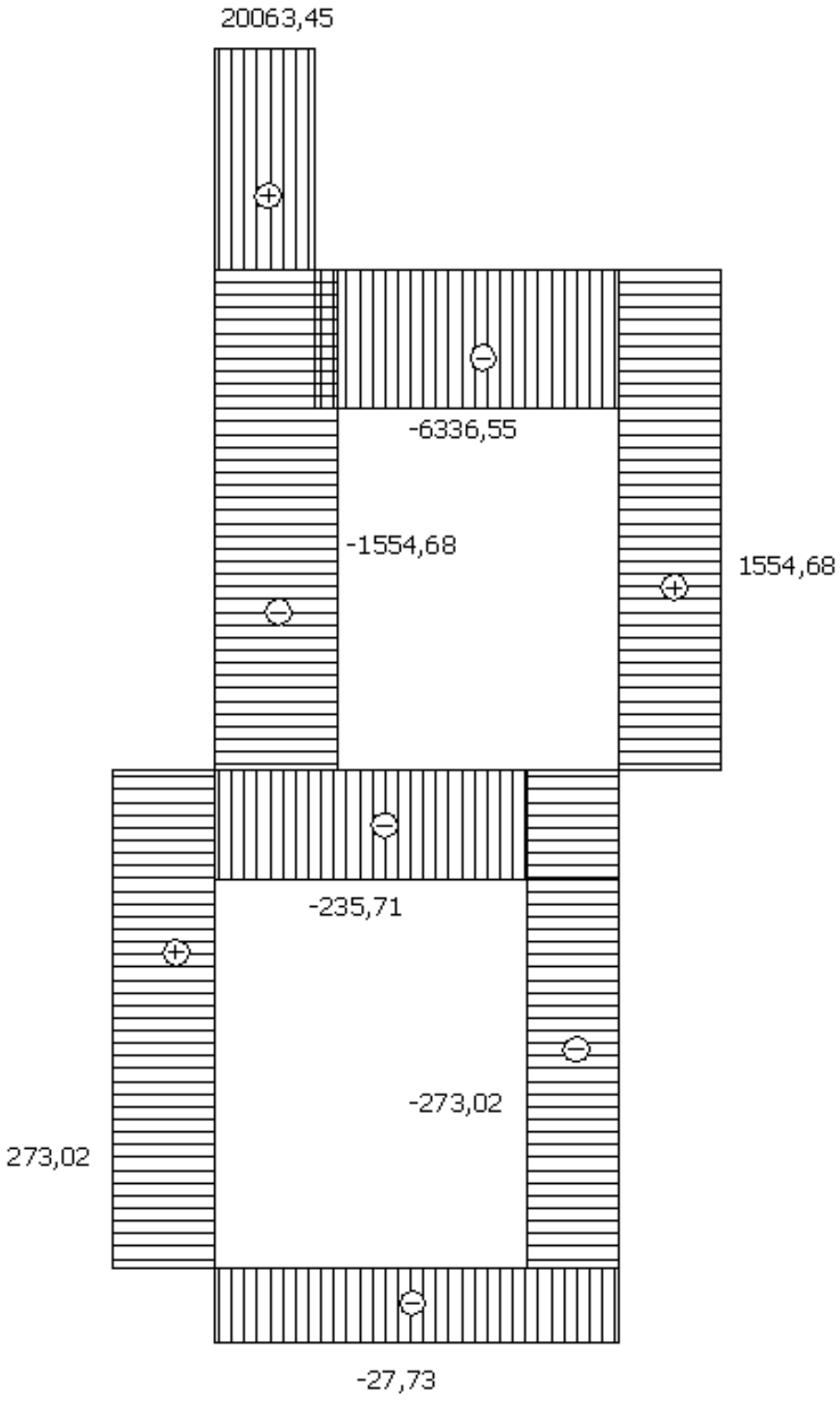


Dílčí závěr k průběhu momentů:

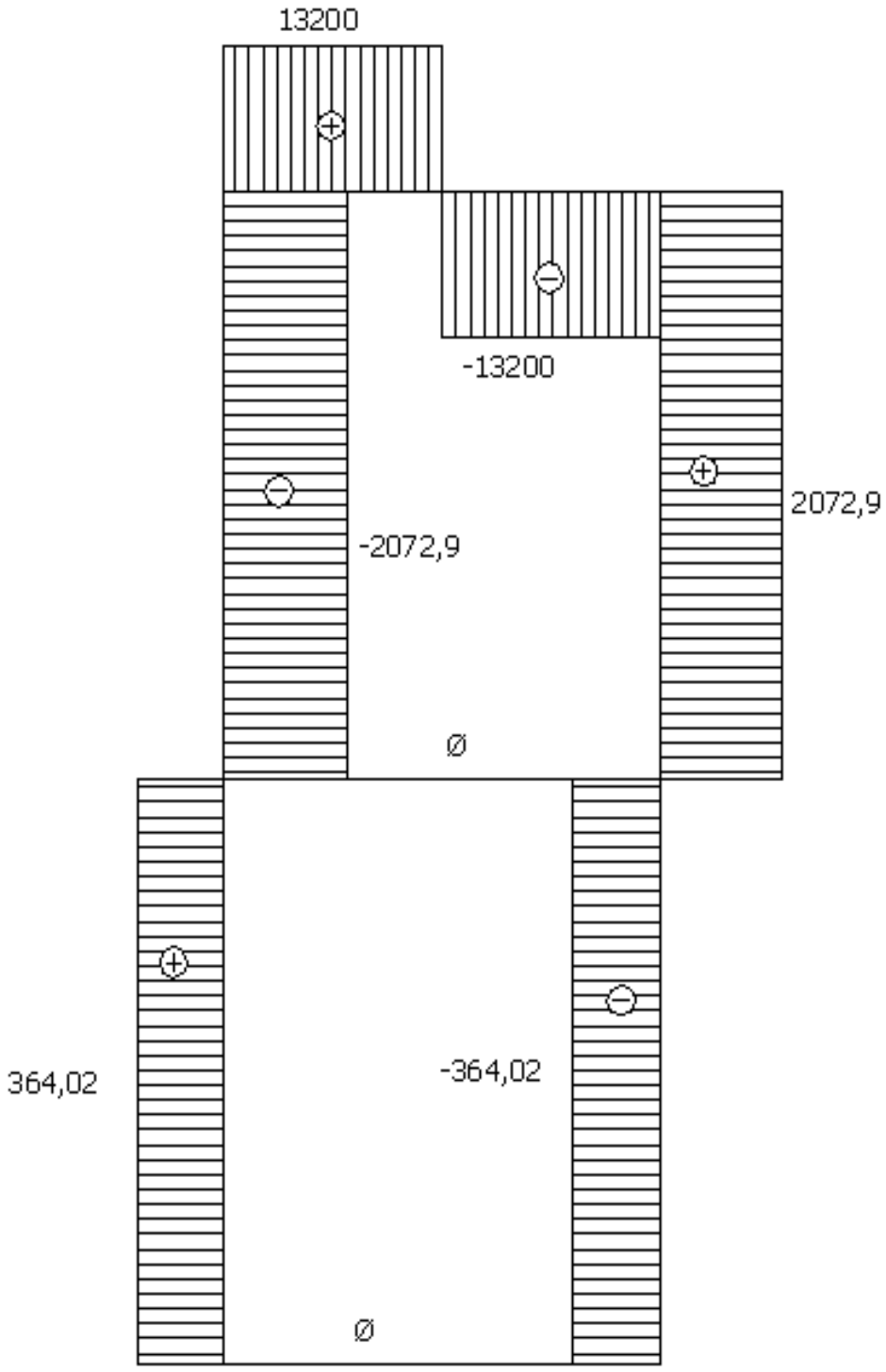
Z průběhu vnitřních výsledných účinků plyne, že velikost momentu M se s posouváním zatěžující síly směrem ke středu rámu zvětšuje. Jeho velikost je maximální, pokud zatěžující síla působí ve středu daného rámu.

Průběhy tečných posouvajících sil

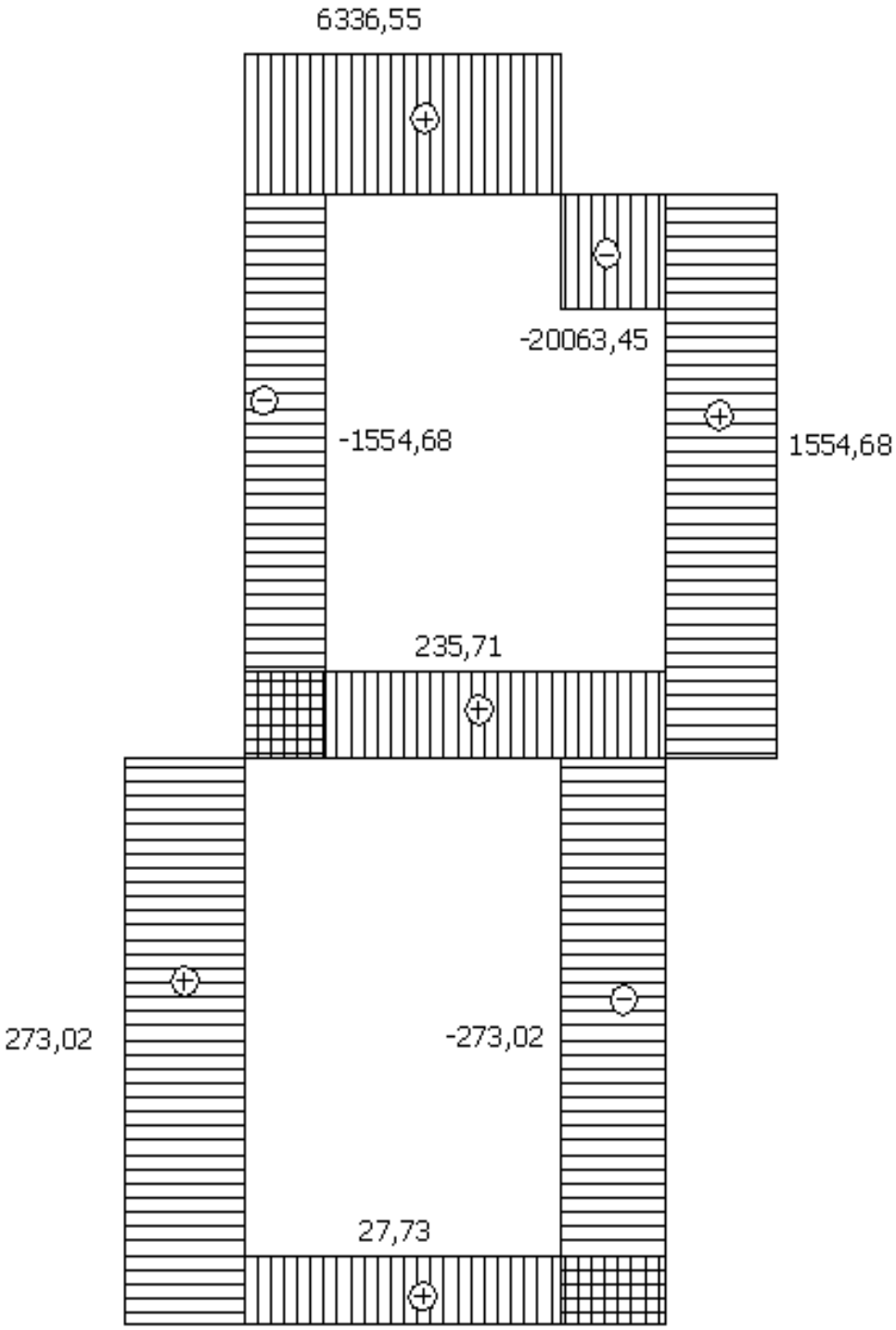
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,5m, c = 1,5m



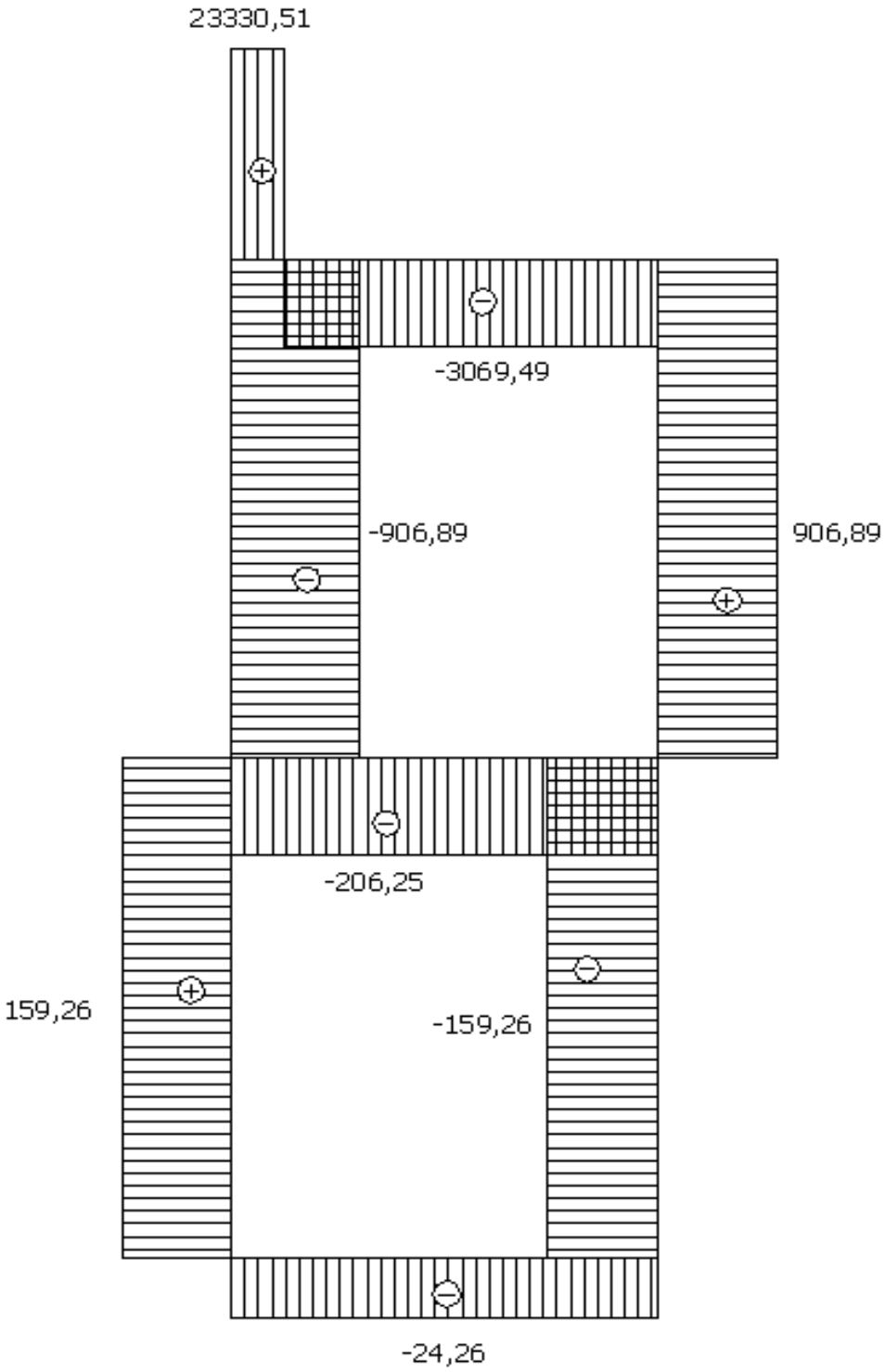
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1m, c = 1m



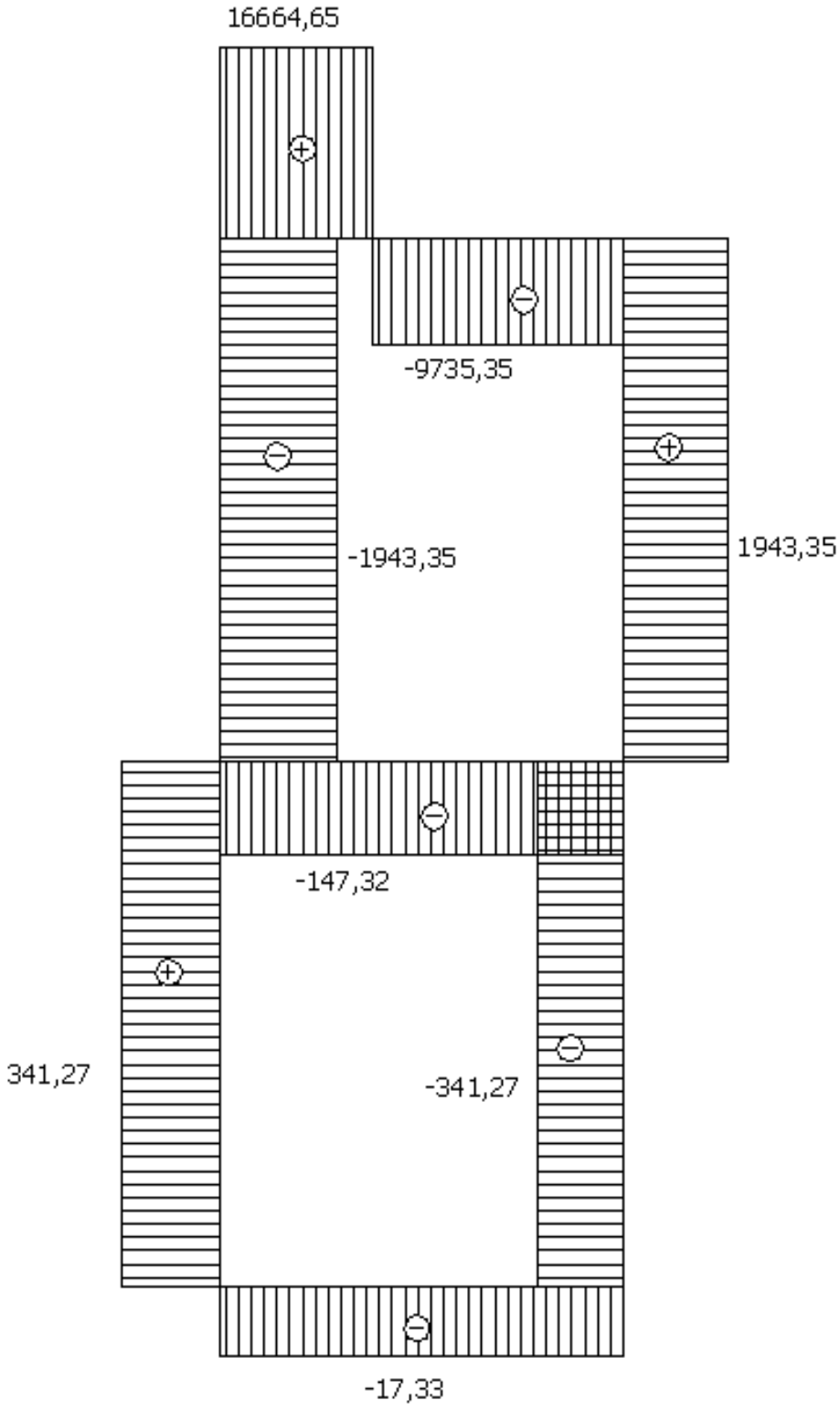
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,5m, c = 0,5m



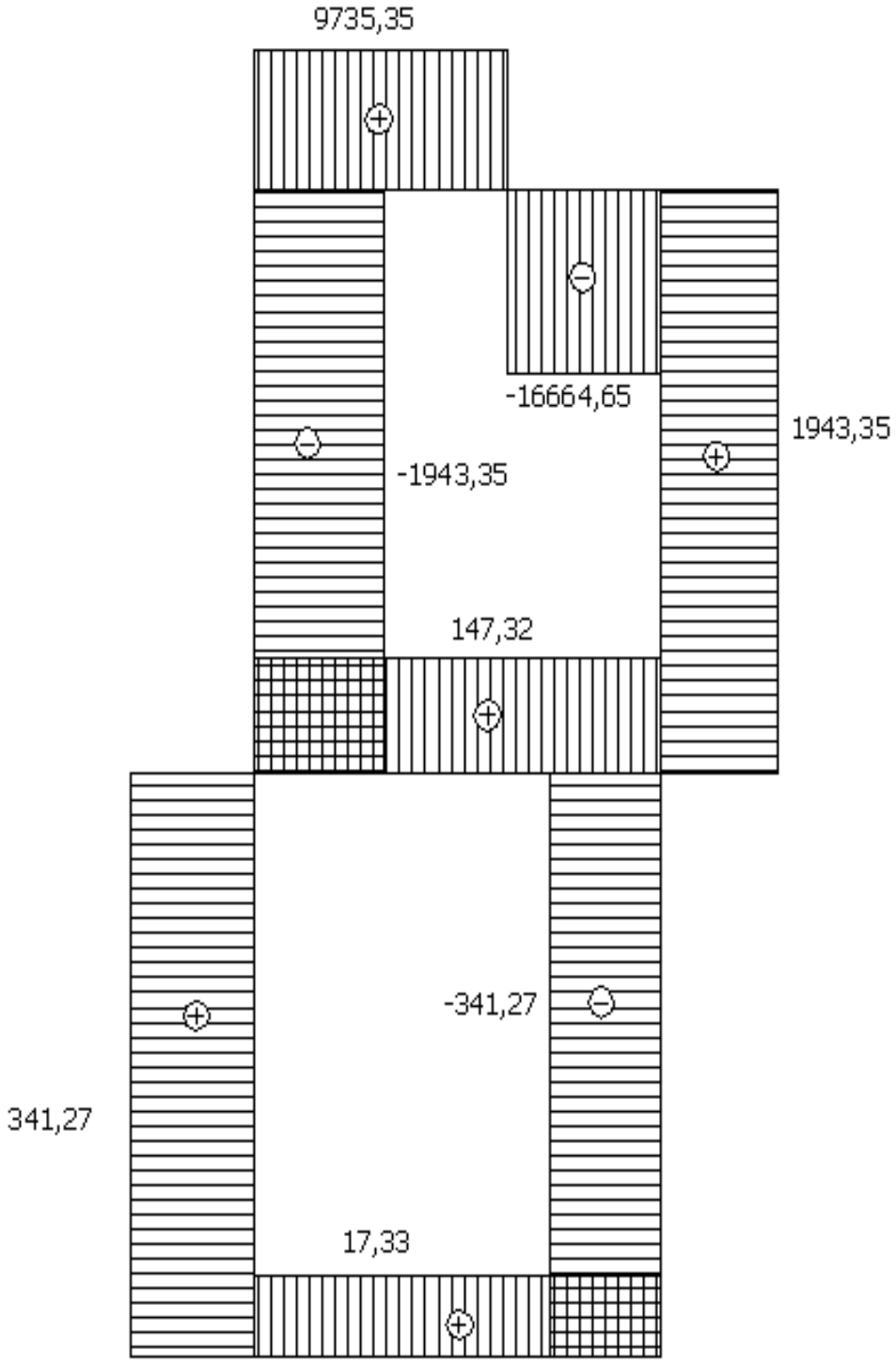
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,25m, c = 1,75m



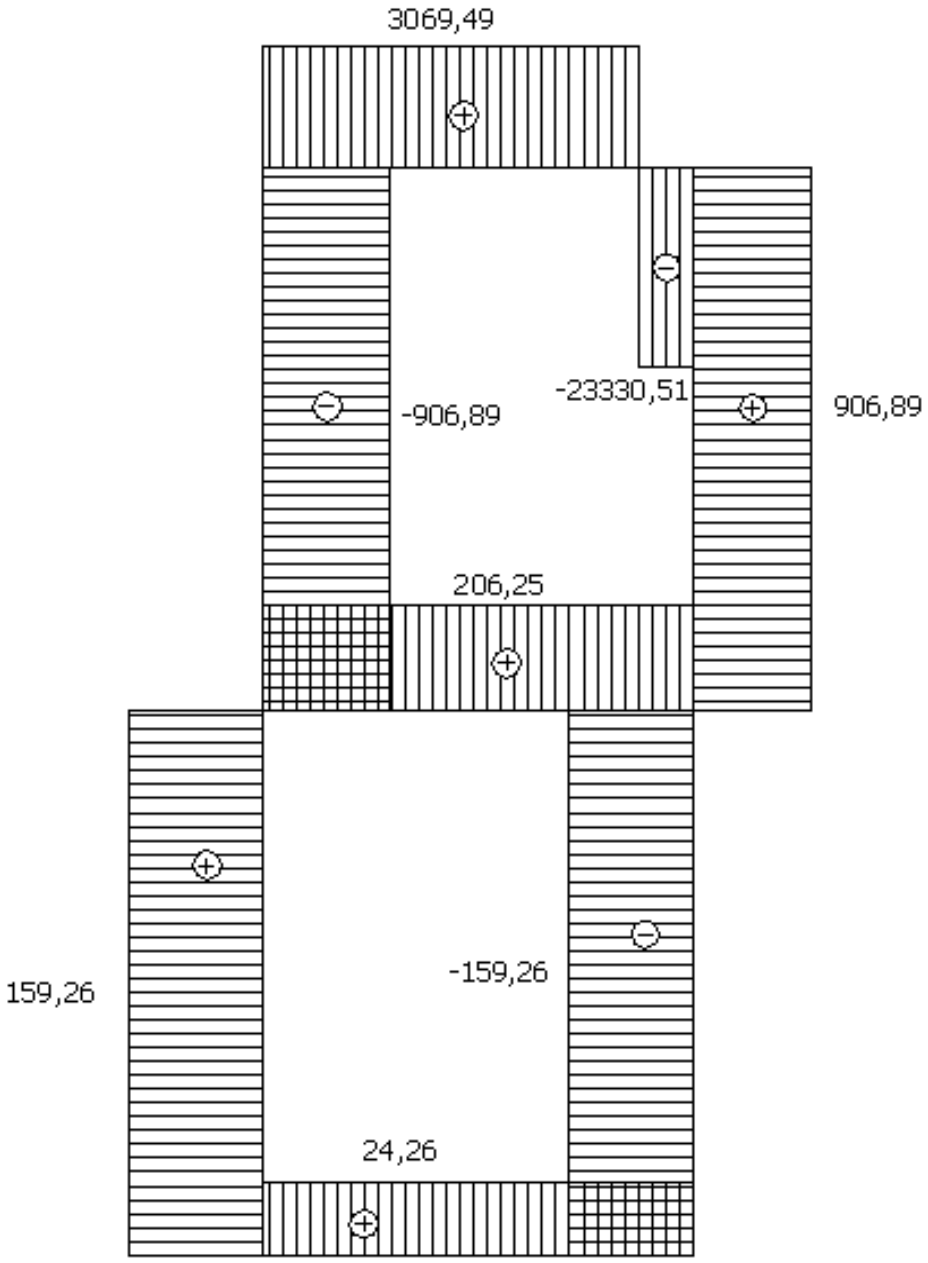
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,75m, c = 1,25m



Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,25m, c = 0,75m



Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,75m, c = 0,25m

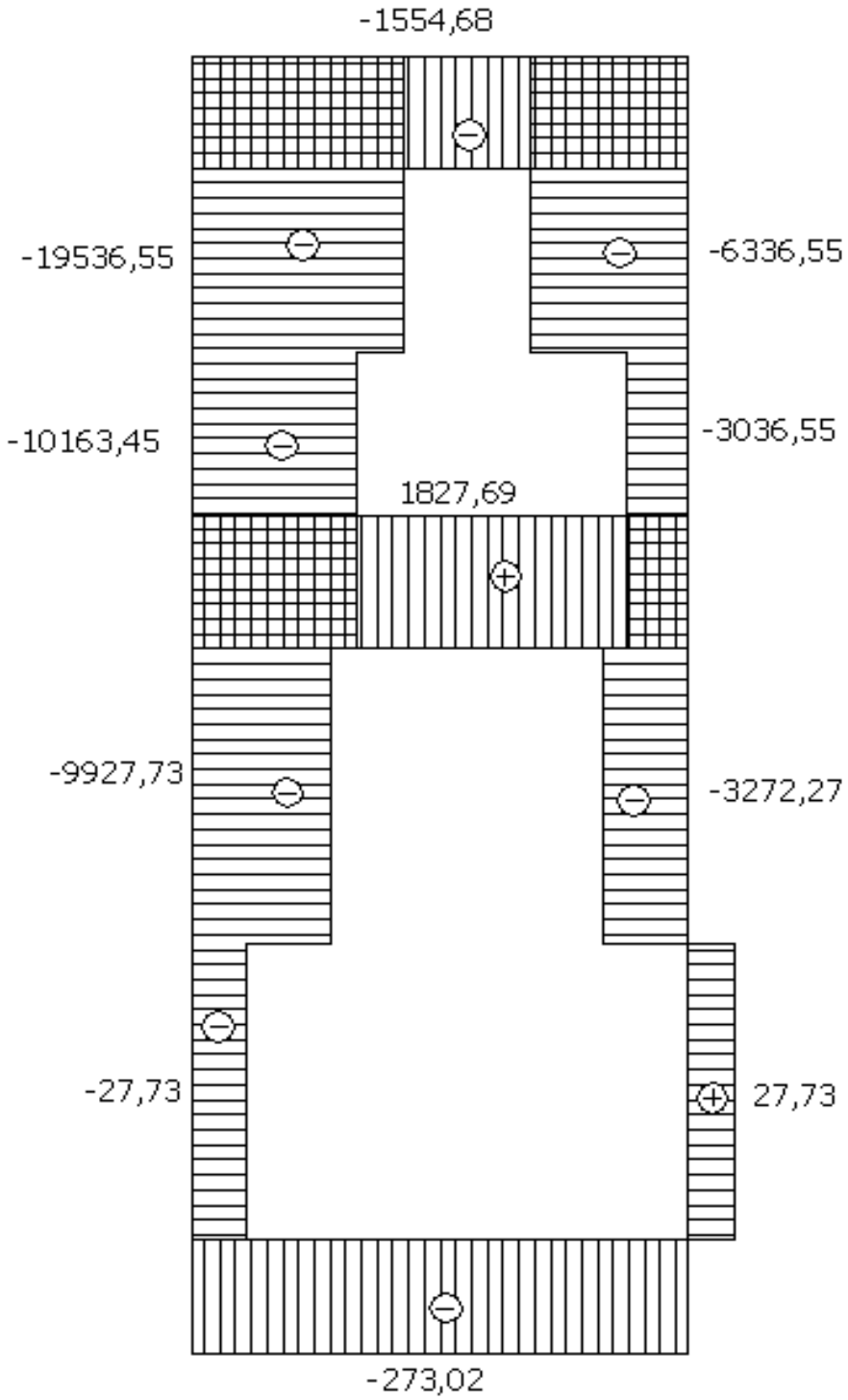


Dílčí závěr k průběhu tečných sil:

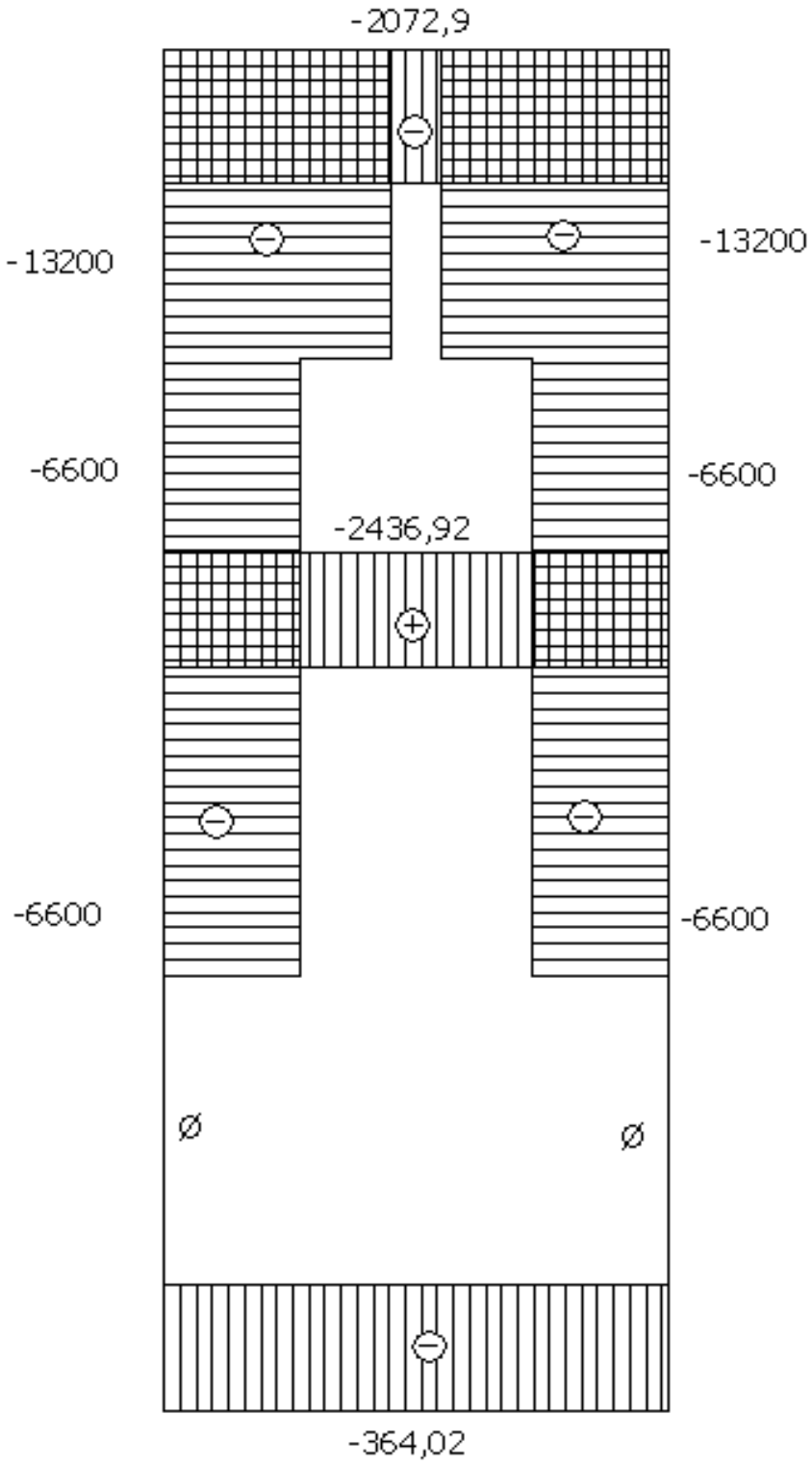
Z průběhu vnitřních výsledných účinků plyne, že velikost tečné síly T se s posouváním zatěžující síly směrem ke středu rámu zvětšuje. Ovšem její velikost je maximální ve vzdálenosti zatěžující síly x = 0.25m, c =1.75 a x = 1.75m, c = 0.25m. Kontrolou správnosti řešení je průběh posouvajících sil (tečných), který je v případě kdy x = 1m a c = 1m nulový ve vzpěře a v zadní části rámu (viz obrázek strana 62).

Průběhy normálových sil

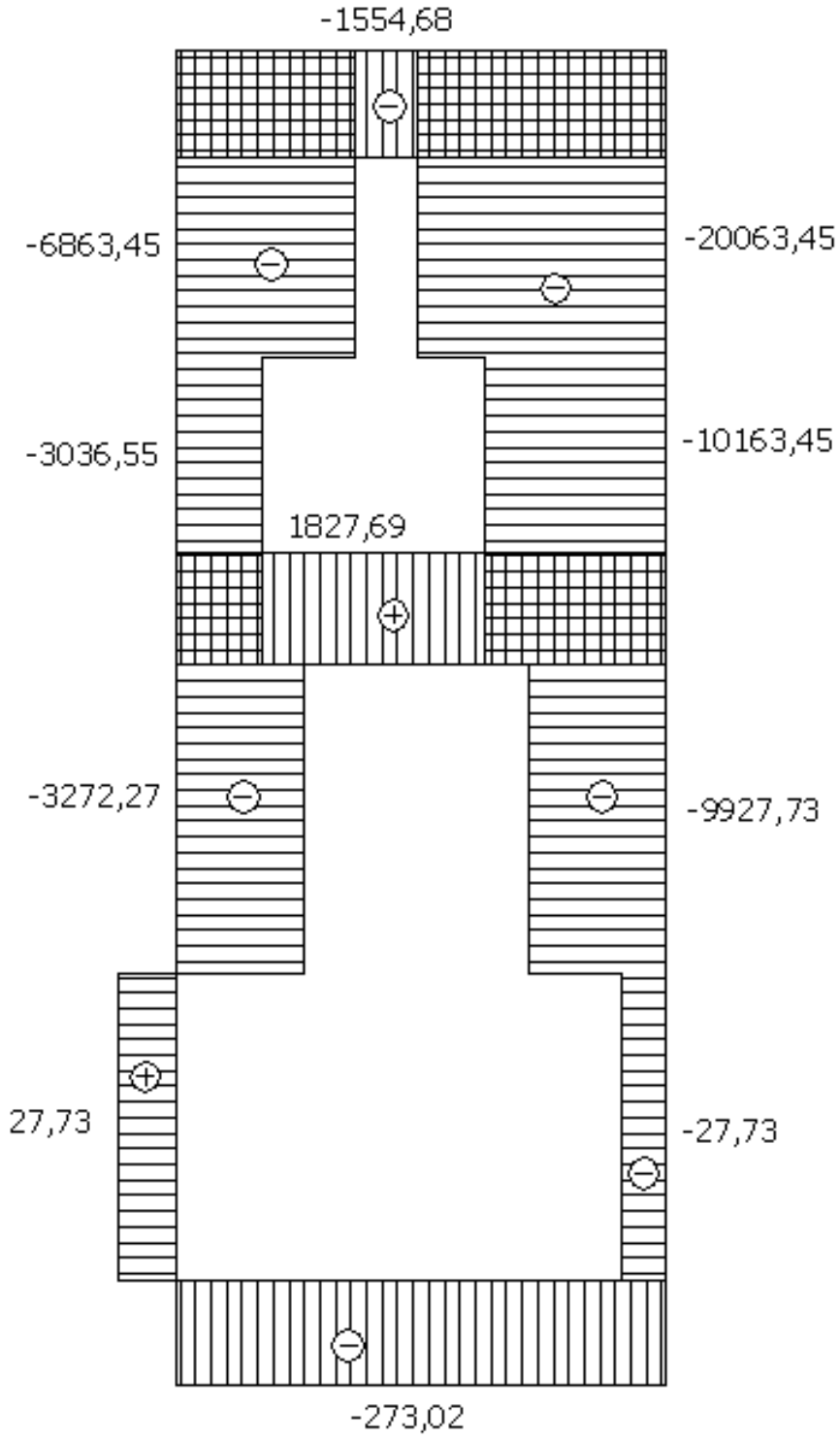
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,5m, c = 1,5m



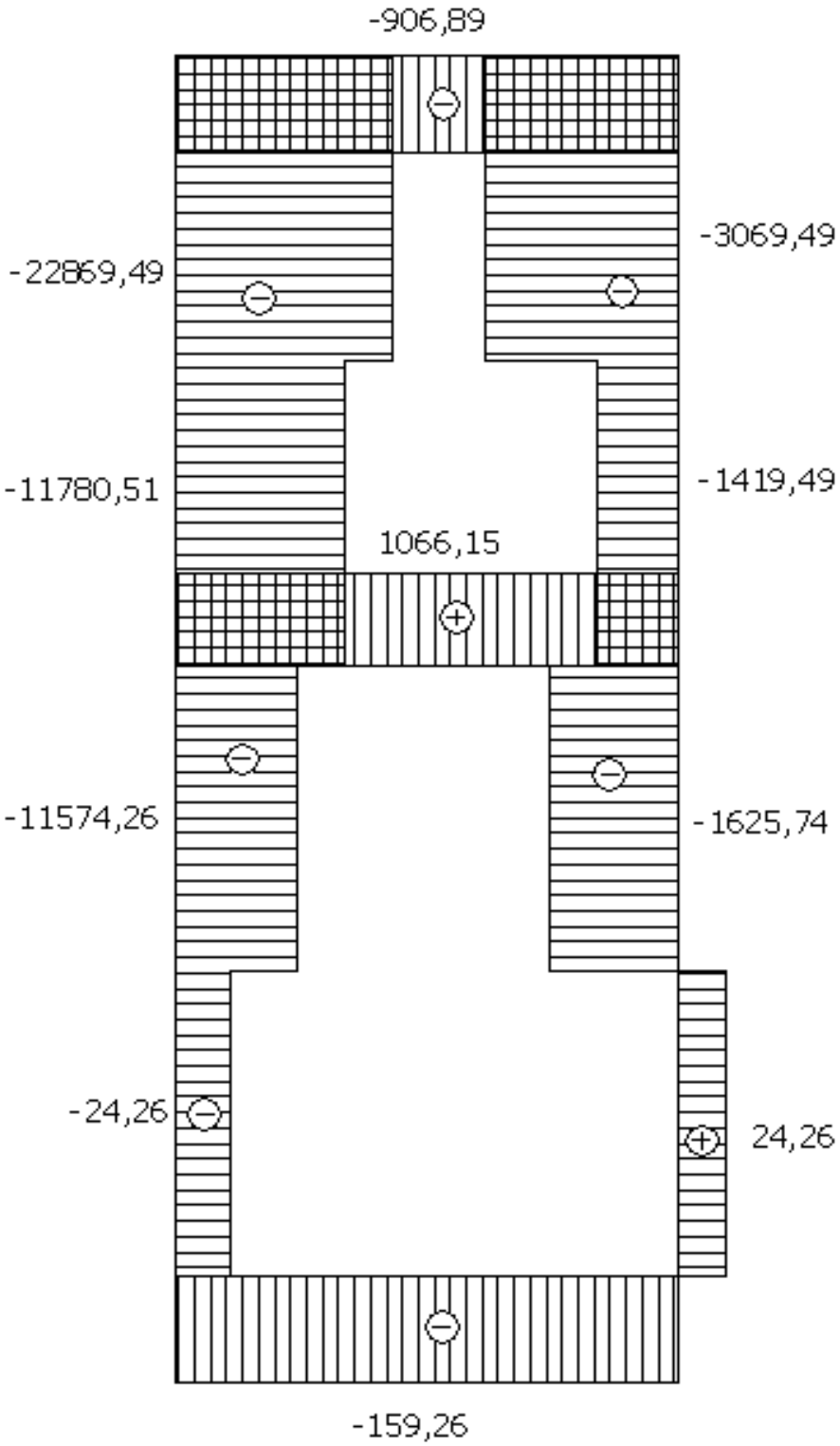
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1m, c = 1m



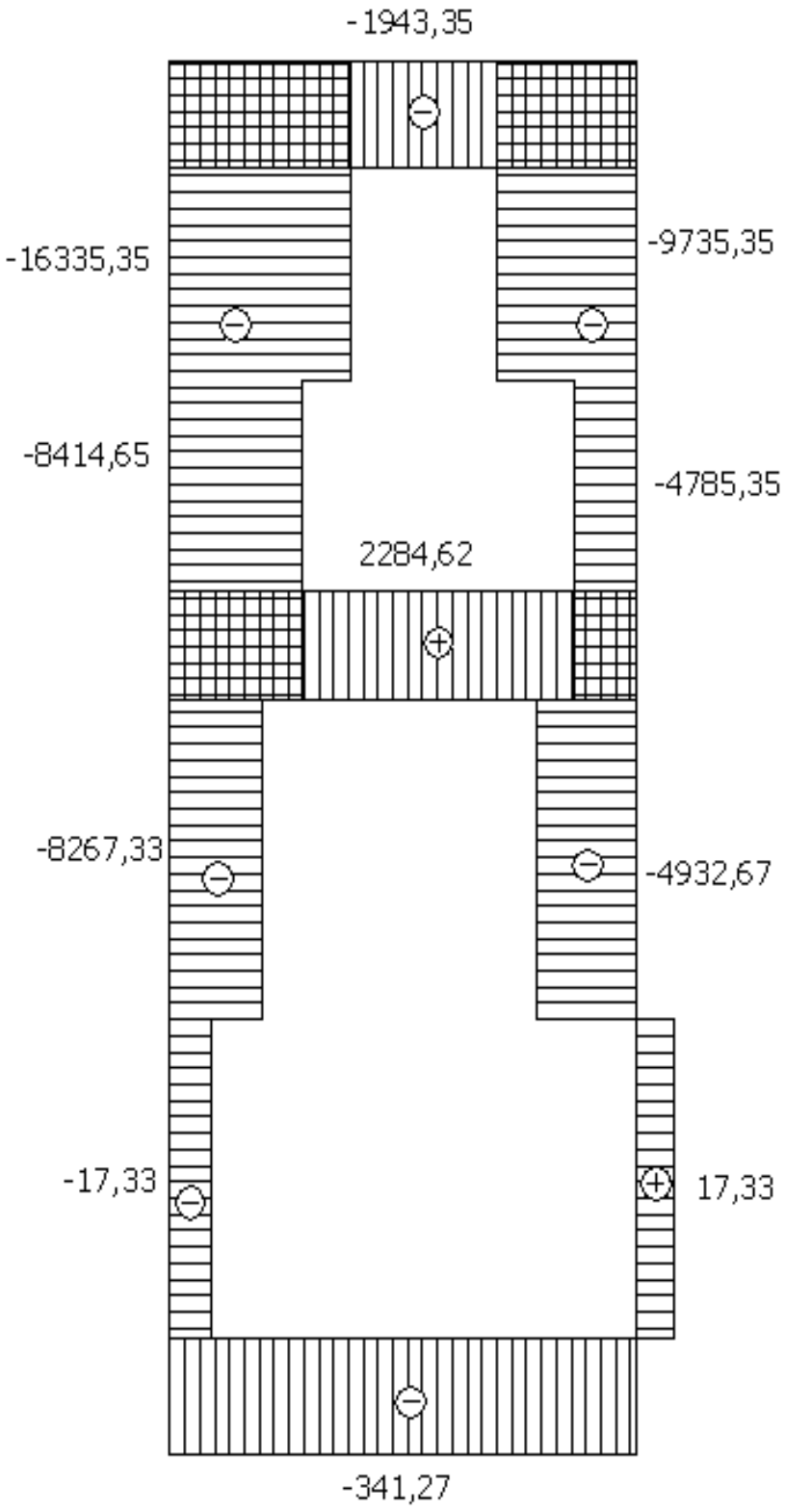
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,5m, c = 0,5m



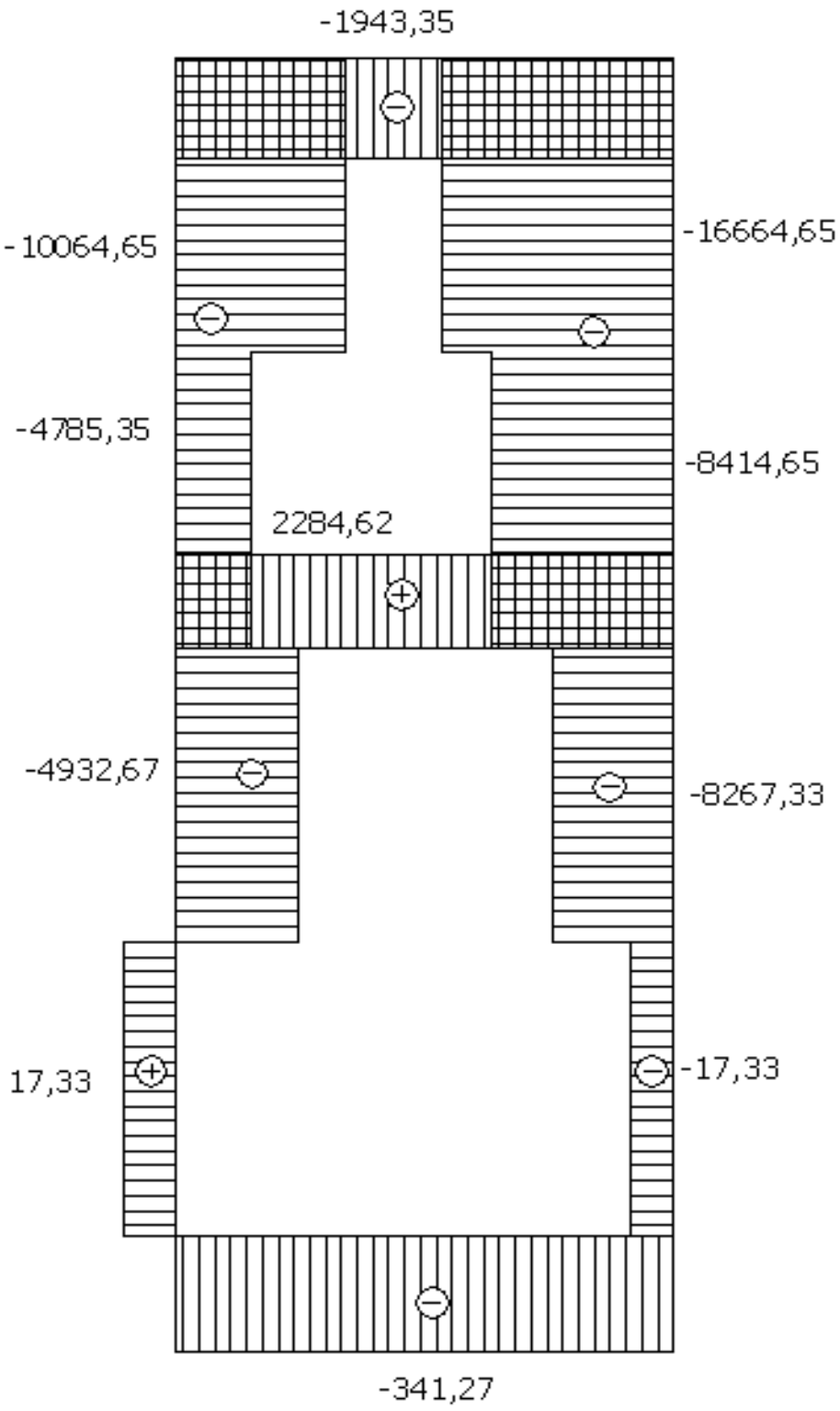
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,25m, c = 1,75m



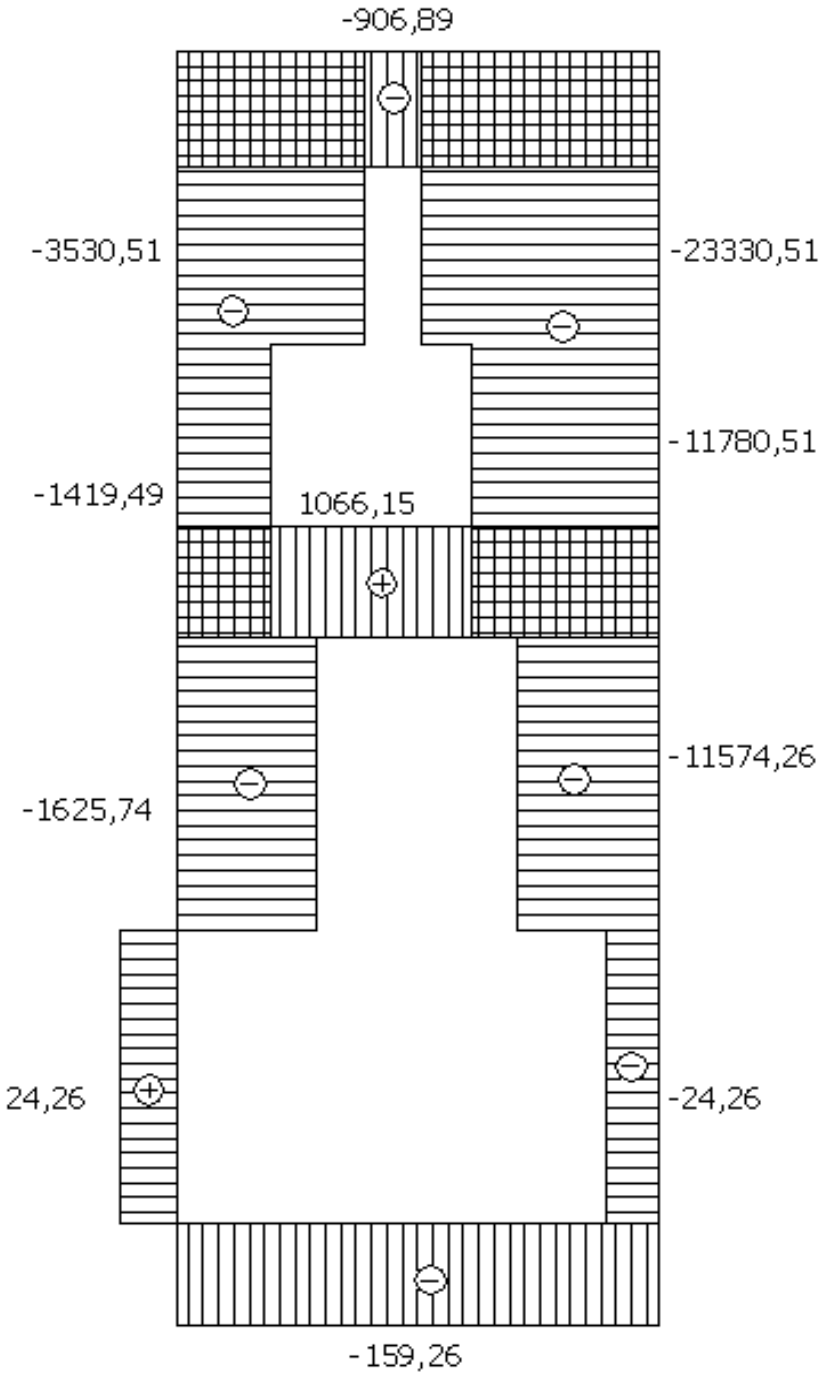
Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 0,75m, c = 1,25m



Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,25m, c = 0,75m



Průběh VVÚ pro vzdálenost zatěžující síly x = 1,75m, c = 0,25m



Dílčí závěr k průběhu normálových sil:

Z průběhu vnitřních výsledných účinků plyne, že velikost normálové síly N se s posouváním zatěžující síly směrem ke středu rámu zvětšuje. Její velikost je maximální ve středu daného rámu (x = 1m, c =1m).

10.Pevnostní kontrola rámové konstrukce

V této části práce provedeme pevnostní kontrolu na ohyb u všech sedmi případů dle výpočtové syntaxe uvedené níže. Normálové napětí od normálové síly N a smykové napětí od posouvající síly T zanedbáváme vůči ohybovému napětí.

Výsledky jsou uvedeny v tabulce pod výpočtovou syntaxí.

$\sigma_O = \frac{M_{O\max}}{W_O}$ stanovení napětí v ohybu

$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_O}$ $\sigma_k = \mathrm{Re}_{\min}$ stanovení bezpečnosti

Tabulka s výslednými hodnotami bezpečnosti pro jednotlivé případy zatížení

Vzdálenost x	Vzdálenost c	$M_{O\max}$	W_O	σ_O	σ_k	k_k
0.25m	1.75m	-3899Nm	22.4cm^3	174.1MPa	490MPa	2.81
0.5m	1.5m	-6848Nm	22.4cm^3	305.8MPa	490MPa	1.60
0.75m	1.25m	-8684Nm	22.4cm^3	387.7MPa	490MPa	1.26
1m	1m	-9307Nm	22.4cm^3	415.5MPa	490MPa	1.18
1.25m	0.75m	-8684Nm	22.4cm^3	387.7MPa	490MPa	1.26
1.5m	0.5m	-6848Nm	22.4cm^3	305.8MPa	490MPa	1.60
1.75m	0.25m	-3899Nm	22.4cm^3	174.1MPa	490MPa	2.81

$M_{O\max}$ maximální ohybový moment [Nm]
W_O kvadratický moment [cm^3]
σ_O napětí v ohybu [Mpa]
σ_k minimální mez kluzu [MPa]
k_k bezpečnost v ohybu [-]

$k_k > 1$ vyhovuje dle pevnostní kontroly
$k_k < 1$ nevyhovuje dle pevnostní kontroly

ZÁVĚR

Z provedené napjatostní a pevnostní kontroly vyplývá, že bezpečnost rámu vůči meznímu stavu pružnosti (mezi kluzu σ_k) značně závisí na poloze x působící síly F. V krajní poloze x=0m, c=2m nevzniká žádné ohybové namáhání a příslušné tlakové napětí v boční části rámu je $\sigma_t = F/S = 26400/2800 = 9,4MPa$. Tato skutečnost rovněž potvrzuje oprávněnost předpokladu zanedbání tahového resp. tlakového napětí vůči napětí ohybovému. S růstem x směrem k ose symetrie rámu napětí ohybové roste a dosahuje maximální hodnoty na ose symetrie pro x=1m, c=1m. $\sigma_{o,\max} = 415,5MPa$. Tomu odpovídá bezpečnost vůči mezi kluzu $k_k = 1,18$.

Z provedené pevnostní analýzy vyplývá, že při sledovaných zatěžovacích podmínkách by nikde v rámu nemělo dojít ke vzniku plastické deformace. Samozřejmě jsem si vědom nepřesností použitého výpočtového modelu.

Seznam použitých zdrojů

[1] Janíček, Ondráček, Vrbka: Mechanika těles. Pružnost a pevnost I. VUT, 1992
[2] Hoschl: Pružnost a pevnost ve strojnictví. SNTL Praha, 1971
[3] Leinveber, Řasa, Vávra: Strojnické tabulky. 3 vyd. Scientia,spol s.r.o. 2000. Praha 6, ISBN – 80 – 7183 – 164 – 6.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Název
H	[kg m s^{-1}]	hybnost
m	[kg]	hmotnost
v	[m s^{-1}]	rychlost
t	[s]	čas
S	[m^2]	plocha
F	[N]	síla
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
J_Y	[mm^4]	kvadratický moment
x	[m]	vzdálenost
c	[m]	vzdálenost
a	[m]	vzdálenost
b	[m]	vzdálenost
t	[mm]	tloušťka
R	[mm]	poloměr
h	[mm]	výška
μ	[-]	počet neznámých nezávislých parametrů
ν	[-]	počet použitelných statických podmínek
s	[-]	statická neurčitost
k_k	[-]	bezpečnost
W	[J]	energie napjatosti
M	[Nm]	moment
M_{omax}	[Nm]	maximální ohybový moment
σ_O	[MPa]	napětí v ohybu
σ_k	[MPa]	mez kluzu
W_o	[mm^3]	průřezový modul v ohybu
R_{emin}	[MPa]	minimální mez kluzu
T	[N]	posouvající tečná síla
N	[N]	normálová síla
σ_t	[MPa]	tlakové napětí
$\sigma_{o\max}$	[MPa]	maximální napětí v ohybu
Zkratka		Název
VVÚ		Vnitřní výsledné účinky

Seznam příloh

1. Řešení soustavy rovnic pro stanovení M_C, M_B, N_C, N_B, T_C, T_B pro různá působiště síly na čele vozíku (rámu) pomocí softwaru Maple 10
2. Výpočtové stanovení průběhů výsledných vnitřních silových účinků (VVÚ) M, T, N podél střednice rámu pro různá působiště síly na čele vozíku (rámu)