

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

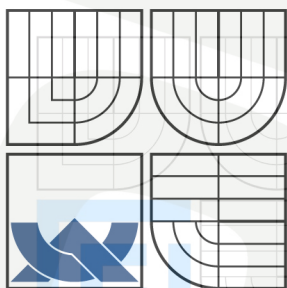
ŘEŠENÍ RÁMU STROJE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR GÁL

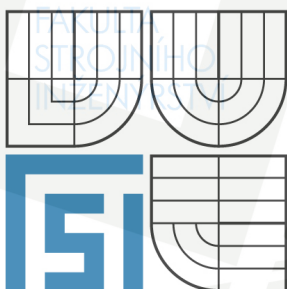
BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TECHNICKÉ
V BRNĚ



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ŘEŠENÍ RÁMU STROJE

SOLUTION OF MACHINE FRAME

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR GÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PŘEMYSL POKORNÝ, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Gál

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Řešení rámu stroje

v anglickém jazyce:

Solution of machine frame

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte optimalizaci rámu válečkové trati pro dopravu EURO palet.

Cíle diplomové práce:

Vytvořte podklady pro optimalizaci rámu válečkového dopravníku pro dopravu manipulačních jednotek.

Zpracujte přehled běžně používaných profilů pro rám válečkového dopravníku s ohledem na uvažované optimalizační parametry.

Vytvořte návrh modulu podpěrného rámu válečkového dopravníku.

Seznam odborné literatury:

ŠPIČKA, J.: Logistika, doprava a manipulace, elektronické skriptu VUT v Brně, 2002

Hlavenka, B.: Manipulace s materiálem : systémy a prostředky manipulace s materiálem, vyd. 4., Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 164 s., ISBN: 978-80-214-3607-7

Polák, J., Pavliska, J., Slíva, A.: Dopravní a manipulační zařízení I., 1. vyd., Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001, 99 s., ISBN: 80-248-0043-8

Pavliska, J., Hrabovský, L.: Dopravní a manipulační zařízení IV, 1. vyd., Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004, 128 s., ISBN: 80-248-0537-5

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Vedoucí diplomové práce: Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 8.12.2008

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

Bc. Petr GÁL

Řešení rámu stroje

DP, ÚADI, 2009, str. 56, obr. 47.

Tato diplomová práce se zabývá tvorbou optimalizačních podkladů rámu válečkové tratě pro dopravu manipulačních jednotek. Optimalizace je prováděna na základě velikosti zatížení manipulační jednotkou a následného průhybu hlavního profilu. Řešení je prováděno analyticky a výsledky jsou porovnávány s výstupy MKP programu.

Klíčová slova: válečková trať, manipulace, optimalizace

Annotation

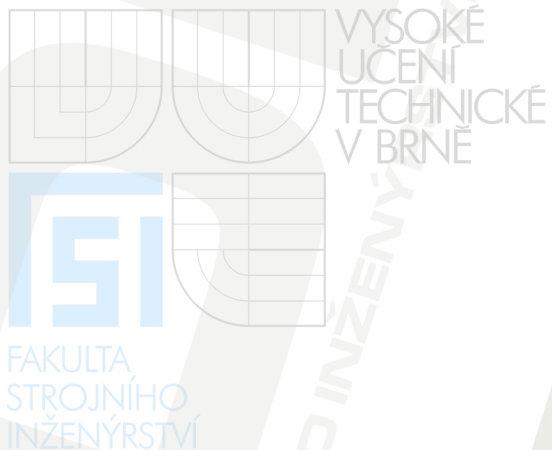
Bc. Petr GÁL

Solution of machine frame

MT, IAE, 2009, pages 56, img. 47.

This thesis deals with the creation of optimization data of rollway frame for transport handling units. Optimization is performed on the basis of the size of load handling unit and the subsequent deflection of the profile. The solution is carried out analytically and the results are compared with FEM program outputs.

Keywords: rollway, manipulation, optimization



Bibliografická citace

GÁL, P. *Řešení rámu stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 56 s., příloh 9. Vedoucí diplomové práce Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.



VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Přemysla Pokorného, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 29. 5. 2009

Petr GÁL



VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Přemyslu Pokornému Ph.D. Dále chci poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

Obsah

1 Úvod	7
2 Cíle práce	8
3 Manipulační prostředky	9
3.1 Válečkové tratě	9
3.2 Europaleta	12
4 Návrh modulu podpěrného rámu	13
5 Specifikace válečkové tratě	15
6 Řešení hlavního rámu válečkové tratě	16
6.1 Výpočet průřezových charakteristik profilů	16
6.2 Výpočet namáhání profilu hlavního rámu	19
7 Zatížení rámu válečkové tratě	23
7.1 Zatěžovací stav 1	25
7.2 Zatěžovací stav 2	26
8 Podklady pro optimalizaci profilu hlavního rámu	27
8.1 Řešení zatěžovacích stavů	28
8.2 Pevnostní kontrola hlavního rámu	33
8.3 Formulář pro optimalizaci ohýbaných profilů	35
8.4 Formulář pro optimalizaci normalizovaných válcovaných profilů	37
8.5 Podmínky zadávání vstupních hodnot	39
8.6 Srovnání výsledků	40
9 Porovnání profilů	45
9.1 Grafické porovnání vybraných profilů	48
9.2 Vyhodnocení vybraných profilů	51
9.3 Vliv poloměru ohybu u ohýbaných profilů	52
10 Závěr	53
11 Seznam použité literatury	54
12 Seznam použité symboliky	55
Přílohy	57

1 Úvod

Válečkové tratě ve všech svých formách slouží výhradně pro přepravu a skladování kusového zboží ve vnitropodnikové dopravě. Téměř vždy jsou to zařízení jednoduchá. Pro snadnost montáže a provozní spolehlivost dosáhly širokého použití při mechanizaci dopravy, zejména v sériové a hromadné výrobě v různých odvětvích průmyslu.

Při hromadné výrobě se předměty přepravují z jednoho místa na druhé podle technologie výroby nebo skladování. Moderní pojetí manipulace s materiálem požaduje komplexní řešení. Válečkových tratí se může použít v uzavřeném v technologickém procesu buď samostatně, nebo tvoří pouze prvek celého dopravního souboru.

Válečkové tratě lze podle účelu roztrždit na tři hlavní skupiny (sběrné, výrobní a montážní), jejichž různou kombinací a návazností na ostatní zařízení lze vyřešit mechanizaci dopravy v hromadné výrobě.

Tato práce je zadána ve spolupráci se společností Tranza a. s., jedním z výrobců válečkových tratí a jiných dopravních systémů.

2 Cíle práce

Prvním cílem práce je navrhnout modul podpěrného rámu pro rám válečkové tratě o délce 1300 mm. Modul má splňovat požadavky na co nejnížší cenu, co největší tuhost a výškovou stavitelnost.

Dále je cílem práce vytvořit podklady pro optimalizaci rámu válečkové tratě pro dopravu manipulačních jednotek. Rám má mít zmíněnou délku 1300 mm, manipulační jednotkou je europaleta. Optimalizace je uvažována při umístění rámu válečkové tratě na dříve navrženém modulu podpěrného rámu.

Posledním z cílů práce je zpracovat přehled běžně používaných profilů pro rám válečkové tratě s ohledem na uvedené optimalizační parametry. V přehledu budou uvedeny normalizované válcované profily I, IPE, U a L. Dále budou uvedeny otevřené ohýbané profily z plechu U, L a Z.

3 Manipulační prostředky

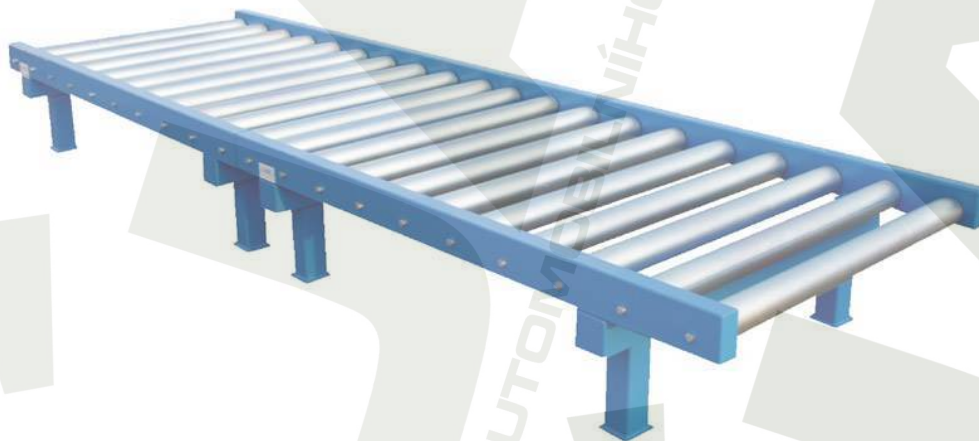
3.1 Válečkové tratě

Válečkové tratě jsou manipulační zařízení sloužící k přemísťování manipulačních jednotek a jiných břemen v horizontálním směru. Jsou tvořeny soustavou otočných válečků, jejichž osy jsou uloženy v rámu tratě na čepech nebo hřídelích. Dopravované předměty spočívají na válečkách a pohybují se kolmo na jejich osu. Příčinou pohybu může být buď složka vlastní tíhy předmětu do směru pohybu, nebo mají válečky nucený pohon.

Z hlediska pohonu tedy dělíme válečkové tratě na poháněné a nepoháněné. Podle účelu dopravy je dělíme na sběrné, výrobní a montážní. Velikosti zatížení vymezuje lehké, střední a těžké. Podle tvaru osové čáry rozlišujeme tratě přímé a obloukové [2].

3.1.1 Nepoháněné válečkové tratě

Nepoháněné válečkové tratě jsou nejjednodušším dopravním zařízením a v principu se skládají ze soustavy volně otočných válečků, jejichž osy jsou kolmé ke směru dopravního pohybu a jsou většinou pevně uloženy v nosných rámech ze dvou rovnoběžných ocelových profilů. Používají se buď v horizontálním provedení (doprava postrkem), nebo skloněné (doprava gravitací) [10].



Obr. 1; Nepoháněná válečková trať

3.1.2 Poháněné válečkové tratě

U poháněných válečkových tratí jsou válečky otáčeny vlivem vnější síly. Poháněn může být buď každý váleček zvlášť, nebo je hnací motor společný pro určitý počet válečků. Hnací síla poté musí být přenášena např. ozubeným nebo řemenovým převodem (pomocí tečného řemenu nebo kruhovými řemínky) [10].



Obr. 2; Poháněná válečková trať

3.1.3 Přímé válečkové tratě

Válečky u přímých válečkových tratí mívají cylindrický tvar a zhotovují se z ocelových trubek. Čela na koncích válečků bývají ocelová nebo litinová s nalisovanými krátkými čepy [10].



Obr. 3; Přímá válečková trať

3.1.4 Obloukové válečkové tratě

Válečková trať nemusí být pouze přímá, může mít také oblouky v místech změny dopravní trasy. V oblouku s menším poloměrem tratě zaoblení bývají cylindrické válečky nahrazeny válečky kuželíkovými. U velkých poloměrů zaoblení tratě se z ekonomických důvodů nechávají cylindrické válečky [2].

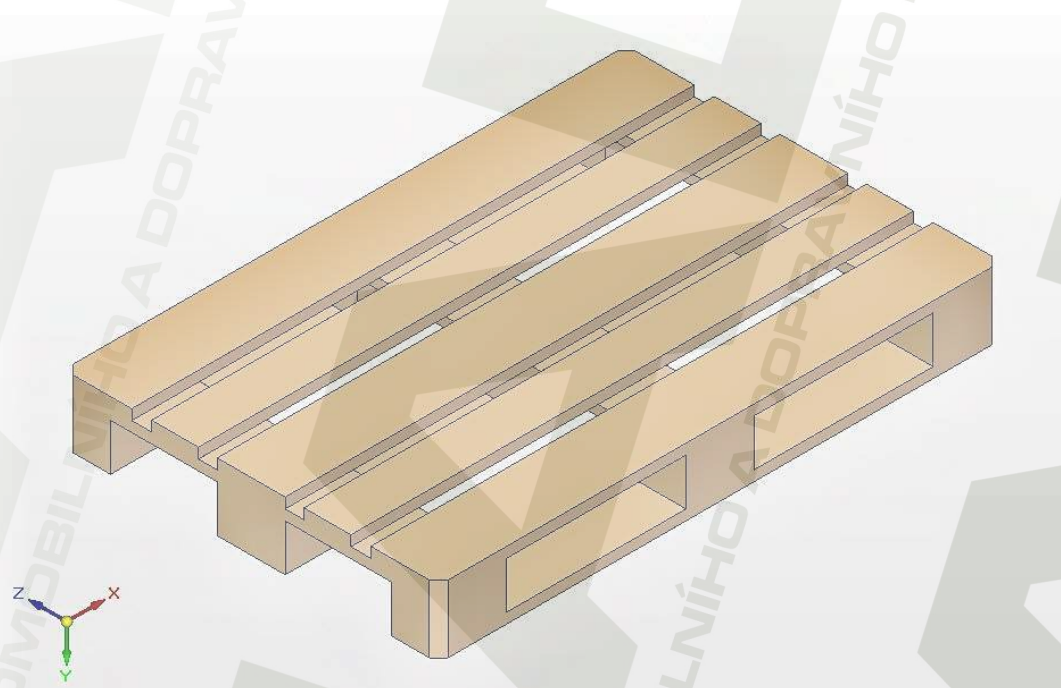


Obr. 4; Oblouková válečková trať

3.2 Europaleta

Dopravovanou manipulační jednotkou je Europaleta, což je v Evropě velmi rozšířená výměnná transportní paleta. Používá se pro transport stohovatelného zboží. Důvodem pro používání europalet je dokonalejší využití ložné plochy nákladních automobilů, železničních vagonů i plochy skladů. Samozřejmostí je výrazné urychlení překládky zboží během dopravy od výrobce ke spotřebiteli.

Konstrukce europalety je velmi detailně normována. Plocha europalety činí $0,96 \text{ m}^2$, délka europalety je 1200 mm, šířka 800 mm a výška 144 mm. Vlastní hmotnost europalety je 20 až 24 kg. Europaleta je takzvaně čtyřstranná, její čelní i boční otvory umožňují nabrat europaletu nízkozdvíhým (paletovacím) vozíkem nebo vidlicovým nakladačem (vysokozdvíhým vozíkem), ze všech stran. Maximální nosnost europalety činí 1500 kg [1].



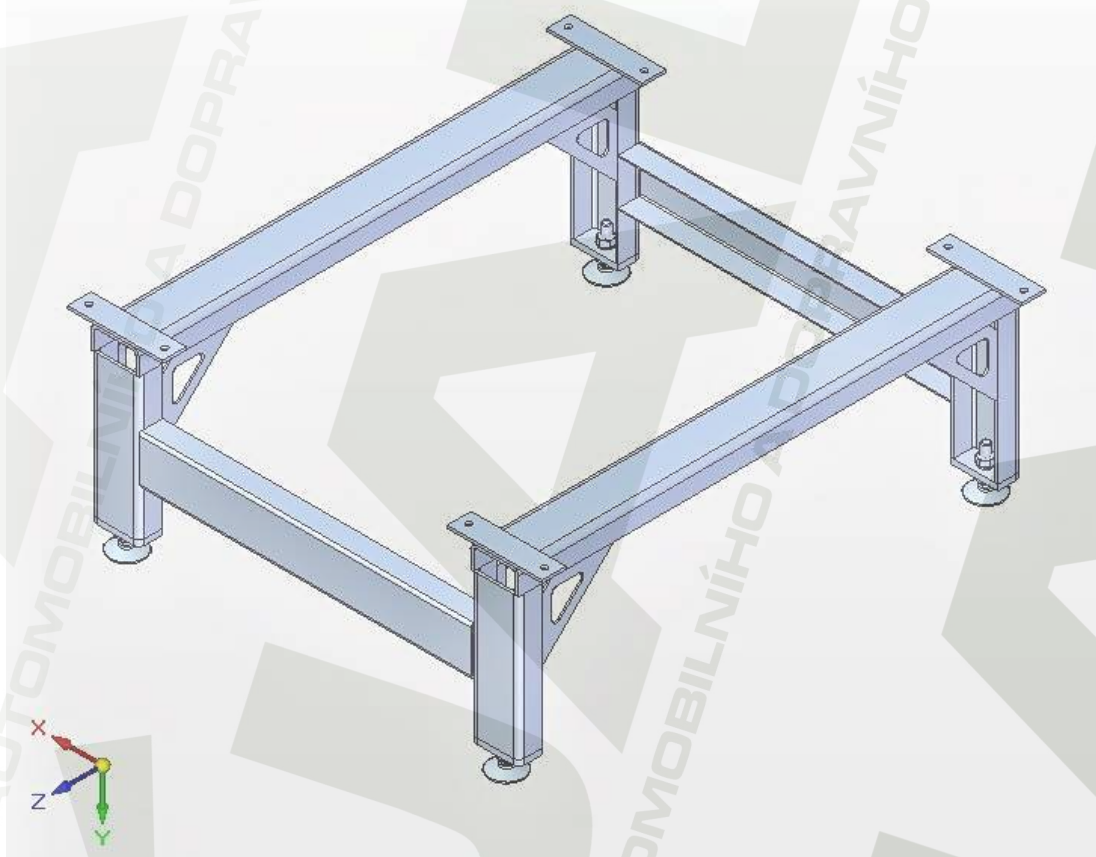
Obr. 5; Europaleta

4 Návrh modulu podpěrného rámu

Modul podpěrného rámu (Obr. 6) slouží k podepření řešeného modulu válečkové tratě o délce 1300 mm. Podpěrný rám má splňovat požadavky z hlediska ekonomického a pevnostního. Dále je vyžadována výšková stavitelnost podpěrného rámu.

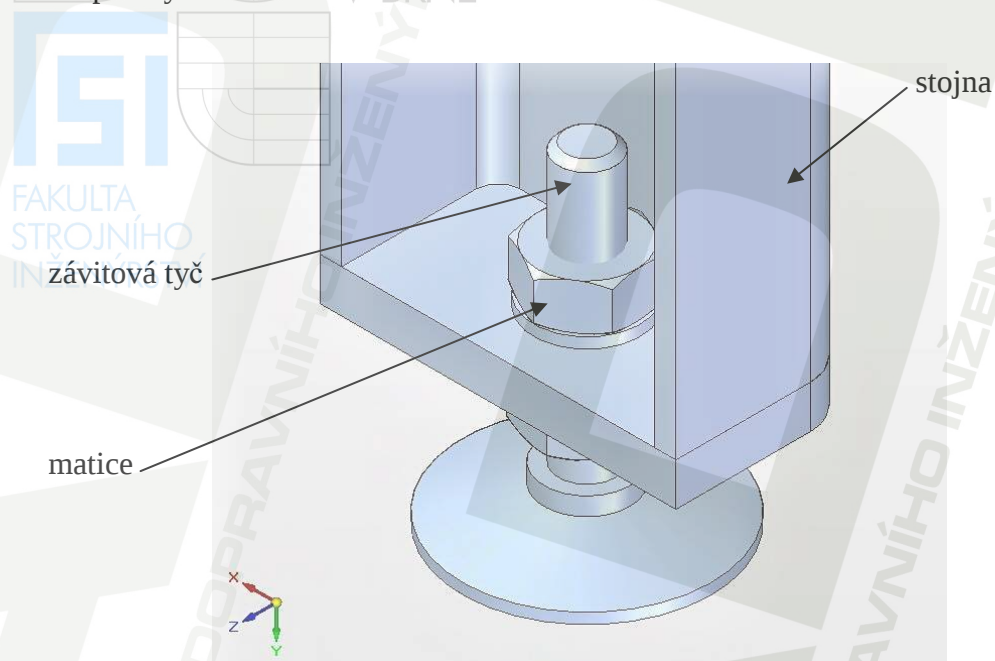
Modul nebyl pevnostně řešen, ale konstrukčně je navržen tak, aby mohl být v rámci dalšího výpočtu v rámci zjednodušení považován za absolutně tuhý. Jeho hlavní části jsou zatíženy pouze tlakem.

Z důvodu co nejnižší ceny je konstrukce modulu je řešena jako svarek z ohýbaných plechových U profilů a plechových výztuh. Materiál rámu je konstrukční ocel S235JRG (11 373), která je vhodná pro ohýbání za studena a sváření.



Obr. 6; Modul podpěrného rámu

Výšková stavitelnost je zajištěna závitovou tyčí s kontramatkami. Rozsah výškové stavitelnosti je dán délkou závitové tyče. V konkrétním případě (Obr. 7) je rozsah výškové stavitelnosti 35 mm. Na koncích šroubů jsou navařeny konstrukční prvky pro zvětšení dosedací plochy.

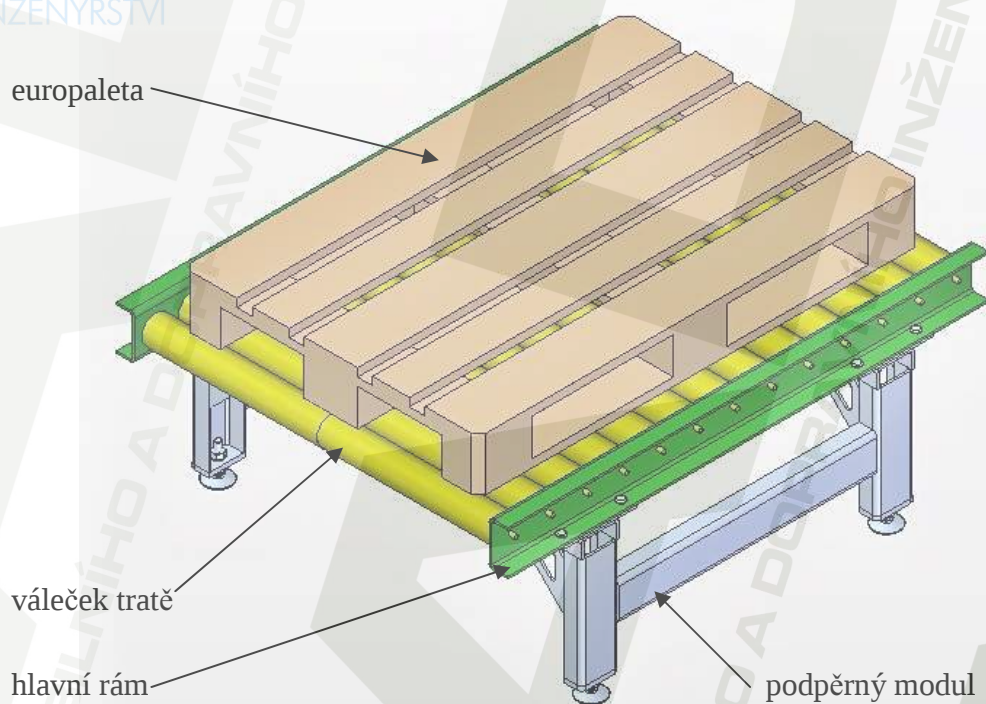


Obr. 7; Výšková stavitelnost modulu podpěrného rámu

Podpěrný modul má významný vliv na optimalizační část práce. Optimalizace rámu válečkové tratě je řešena při podepření rámu podpěrným modulem.

5 Specifikace válečkové tratě

Řešený modul válečkové tratě slouží k dopravě europalet o maximální hmotnosti 1200 kg. Délka modulu je 1300 mm, jak již bylo dříve zmíněno. Trať je uvažována jako poháněná s cylindrickými válečky o průměru 76 mm a délce 950 mm. Rozteč válečků je 100 mm. Hlavní profil rámu válečkové tratě je vyroben buď z normalizovaného válcovaného profilu I, IPE, U nebo L, případně některého z ohýbaných plechových profilů U, L nebo Z. Při provozu spočívá na navrženém podpěrném modulu.



Obr. 8; Válečková trať s europaletou na podpěrném modulu

6 Řešení hlavního rámu válečkové tratě

Podklady a veškeré výpočtové vztahy pro tuto kapitolu čerpány z literatury [3], [4], [5], [7].

6.1 Výpočet průřezových charakteristik profilů

6.1.1 Výpočet plochy příčného průřezu

Výpočet plochy příčného průřezu u ohýbaných profilů byl proveden podle vztahu:

$$S = \int_{\psi} dS = \iint_{\psi} dydz \quad (1)$$

6.1.2 Výpočet těžiště

Výpočet těžiště jednotlivých ohýbaných profilů byl proveden podle vztahů:

$$y_T = \frac{\sum y_i \cdot S_i}{S} \quad (2)$$

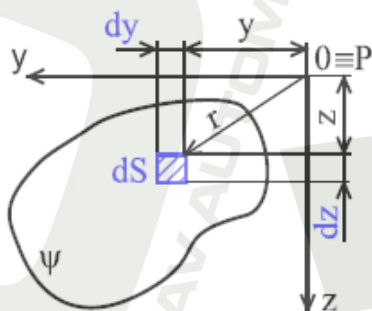
$$z_T = \frac{\sum z_i \cdot S_i}{S} \quad (3)$$

6.1.3 Výpočet kvadratických momentů průřezu

Výpočet kvadratických momentů průřezu byl proveden podle vztahů:

$$J_y = \int_{\psi} z^2 \cdot dS \quad (4)$$

$$J_z = \int_{\psi} y^2 \cdot dS \quad (5)$$

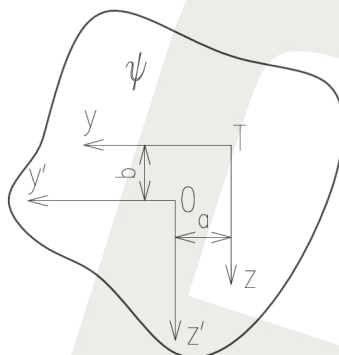


Obr. 9; Náskres řešení kvadratického momentu průřezu

Výpočet transformovaných kvadratických momentů průřezu byl následně proveden pomocí vztahů Steinerovy věty:

$$J_{y'} = J_y + b^2 \cdot S \quad (6)$$

$$J_{z'} = J_z + a^2 \cdot S \quad (7)$$



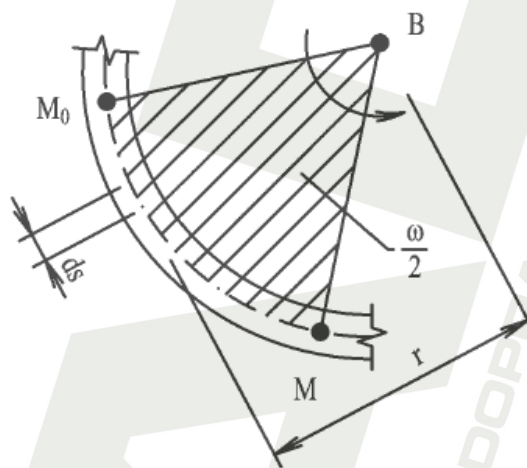
Obr. 10; Náčrt transformovaných os

6.1.4 Výpočet středu ohybu (smyku)

Jelikož jsou některé z řešených prutů nesymetrické, bude docházet v důsledku zatížení i k jejich kroucení. Je proto potřeba určit střed ohybu. Ten se v praxi určuje pomocí výsečové souřadnice. Výsečové souřadnice přiřazujeme bodům na střednici otevřeného průřezu, jejichž soustava je dána pólem B a výsečovým počátkem M_0 . Velikost výsečové souřadnice v bodě M je dána vztahem:

$$\omega = \int_{M_0}^M r ds \quad (8)$$

kde r je absolutní vzdálenost pólu B od tečny ke střednici a ds je diferenciál délky střednice měřené od bodu M_0 .



Obr. 11; Výsečová souřadnice

Následně je odvozen vztah pro střed ohybu:

$$y_s = y_B + \frac{D_{\omega y}}{J_y} \quad (9)$$

$$z_s = z_B + \frac{D_{\omega z}}{J_z} \quad (10)$$

kde $D_{\omega y}$, $D_{\omega z}$ jsou výsečové deviační momenty, y_B , z_B jsou souřadnice pólu B a J_y , J_z jsou momenty setrvačnosti.

6.2 Výpočet namáhání profilu hlavního rámu

6.2.1 Prutové předpoklady

Samotný rám dopravníku je řešen jako prut, což je nejjednodušší teoretický model reálného tělesa. Musí proto splňovat prutové předpoklady.

Předpoklady geometrické:

- Prut je určen křivkou γ , tzv. střednicí, a v každém bodě střednice příčným průřezem ψ , který obsahuje všechny body tělesa ležící v normálové rovině. Průsečík γ s ψ je geometrickým těžištěm T průřezu ψ .
- Střednice γ je spojitá a hladká křivka konečné délky.
- Příčný průřez je spojitá jedno nebo vícenásobně souvislá oblast, ohraničená obrysem a charakterizovaná charakteristikami příčného průřezu.
- Délka střednice je řádově minimálně stejná jako největší rozměr příčného průřezu.

Předpoklady vazbové a zatěžovací:

- Vazby omezují jen posuvy a úhly natočení střednice.
- Zatížení je soustředěno na střednici, tj. silovým působením na prut jsou osamělé a liniové síly a silové dvojice s působišťem na střednici.

Předpoklady deformační:

- Střednice prutu zůstává v procesu deformace spojitá a hladká.
- Příčné průřezy zůstávají v průběhu deformace zase příčnými průřezy. Tj. zachovávají si rovinnost a kolmost k deformované střednici. Příčné průřezy se podle charakteru zatěžování:
 - vzájemně oddalují a deformují - tah
 - vzájemně přibližují a deformují - tlak
 - natáčejí kolem osy ležící v ψ a deformují se - ohyb
 - natáčejí se kolem osy kolmé k ψ a nedeformují se - krut
 - posouvají se bez deformace



Obr. 12; Deformace prutu ohybem

6.2.2 Výsledné vnitřní účinky prutů

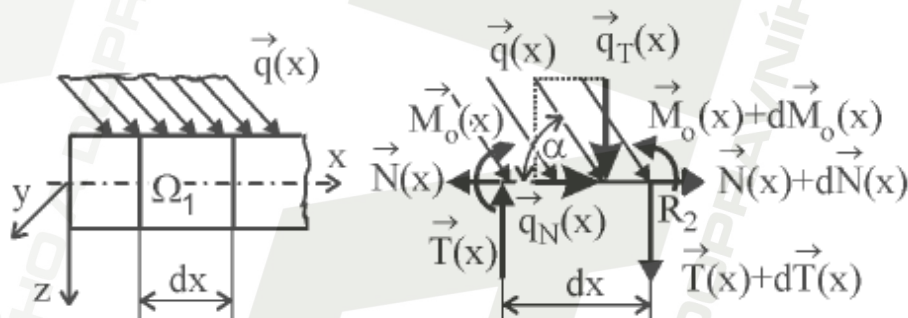
Výsledné vnitřní účinky u prutů jsou pomocné veličiny, popisují namáhání prutu a umožňují předem nalézt nebezpečná místa prutu. Jsou to složky silové, momentové výslednice vnitřních sil v těžišti příčného průřezu, které spolu se soustavou vnějších silových účinků tvoří rovnovážnou silovou soustavu působící na prvek prutu.

Složky vnitřních výsledných účinků:

- normálová síla N (namáhání prutu tahem, tlakem)
- posouvající síly T_y, T_z (namáhání prutu smykem)
- krouticí moment M_k (namáhání prutu krutem)
- ohybové momenty M_{oy}, M_{oz} (namáhání prutu ohybem)

Řešení průběhu výsledných vnitřních účinků:

Postup řešení lze uvést na příkladu, kdy je prut zatížený spojitým zatížením.



Obr. 13; Řešení průběhu výsledných vnitřních účinků

Sestavíme podmínky statické rovnováhy:

$$\sum F_x = 0: N(x) + dN(x) - N(x) + q_N(x)dx = 0 \quad (11)$$

$$\sum F_z = 0: T(x) + dT(x) - T(x) + q_T(x)dx = 0 \quad (12)$$

$$\sum M_{R2} = 0: M_o(x) + dM_o(x) - M_o(x) + T(x)dx + q_T(x)dx \frac{dx}{2} = 0 \quad (13)$$

Zanedbáme-li v poslední rovnici diferenciál 2. řádu, oproti ostatním členům, dostaneme vztahy Schwedlerovy věty:

$$\frac{dN(x)}{dx} = -q_N(x) \quad (14)$$

$$\frac{dT(x)}{dx} = -q_T(x) \quad (15)$$

$$\frac{dM_o(x)}{dx} = T(x) \quad (16)$$

6.2.3 Výpočet průhybu rámu

Průhyb rámu válečkové tratě byl řešen podle Mohrovy metody:

$$u_i = \frac{1}{E \cdot J_y} \cdot M_f^i \quad (17)$$

kde M_f^i představuje fiktivní ohybový moment v bodě i . Velikost M_f^i lze určit pomocí metody řezu, tj. velikost fiktivního ohybového momentu působícího v řezu v místě i určíme jako součet všech vnějších fiktivních ohybových momentů působících po levé nebo pravé straně řezu s využitím příslušné znaménkové konvence.

Rám válečkové tratě je řešen jako prizmatický prut na dvou podporách s převislými konci na obou stranách. Zatížen je v těžišti průřezu několika osamělými silami. Průhyby jsou počítány ve středu rámu a pod krajními silami.

6.2.4 Výpočet návrhové pevnosti oceli

Hodnota návrhové pevnosti je odvozená od meze kluzu, určí se ze vztahu:

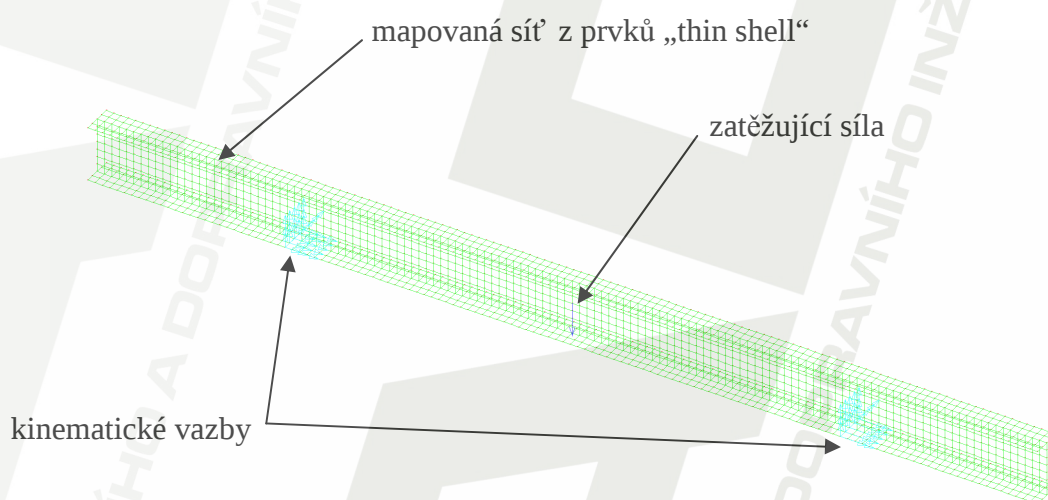
$$f_{yD} = \frac{f_y}{y_M} \quad (18)$$

kde f_y je charakteristická hodnota meze kluzu oceli a y_M je součinitel spolehlivosti materiálu.

6.3 Řešení profilu hlavního rámu pomocí metody konečných prvků

Hlavní rám válečkové tratě je řešen také pomocí metody konečných prvků. Model je vytvořen jako skořepina z dvourozměrných prvků. Sít' je provedena mapovaně pomocí čtvercových prvků „thin shell“. Tyto prvky mají definovány fyzikální vlastnosti jako je tloušťka a druh materiálu. V rámci všech výpočtů v této práci je nastaven materiál běžná izotropní ocel.

Okrajové podmínky jsou vloženy přímo do uzlů sítě. Zatížení jsou provedena pomocí osamělých sil umístěných v uzlech. Kinematické vazby jsou vytvořeny uzamčením posuvů a rotací určitých uzlů.

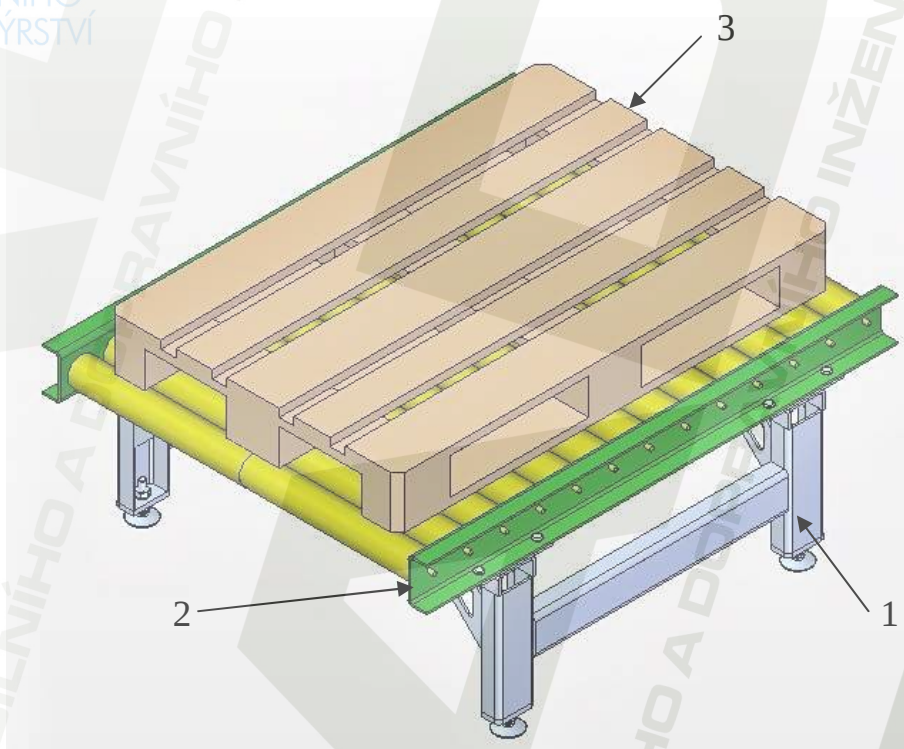


Obr. 14; Skořepinový model profilu I s vloženými okrajovými podmínkami vytvořený pomocí dvourozměrných čtvercových prvků

7 Zatížení rámu válečkové tratě

Řešený modul válečkové tratě je zatěžován manipulační jednotkou – europaletou. Největší zatížení je uvažováno pod špalíky europalety. Rozložení hmotnosti na europaletě je bráno jako rovnoměrné. Největší zatížení je proto uvažováno ve středu palety. Ve výpočtovém modulu lze ale zatížení libovolně měnit podle potřeb uživatele.

Rám válečkové tratě je umístěn na navrženém podpěrném modulu. Jeho namáhání proto závisí také na rozteči jeho stojných podpor.



Obr. 15; Model řešené sestavy, 1 – podpěrný modul, 2 – válečková trať, 3 – europaleta

Každý špalík působí na válečky určitou silou, záleží také na tom kolik válečků se pod špalíkem nachází. Vzhledem k rozteči válečků se pod jedním špalíkem palety nachází minimálně jeden a maximálně dva válečky. Při průjezdu palety přes modul válečkové tratě tedy nastane několik různých zatěžných stavů, kdy je paleta celou svou délkou na řešeném modulu. Možné stavy jsou uvedeny v tabulce, zjištěny byly experimentálně pomocí 3D modelu. Zatěžovací síla je z válečků přenášena na oba profily hlavního rámu válečkové tratě. V rámci výpočtového modelu je zatížení obou profilů uvažováno stejné.

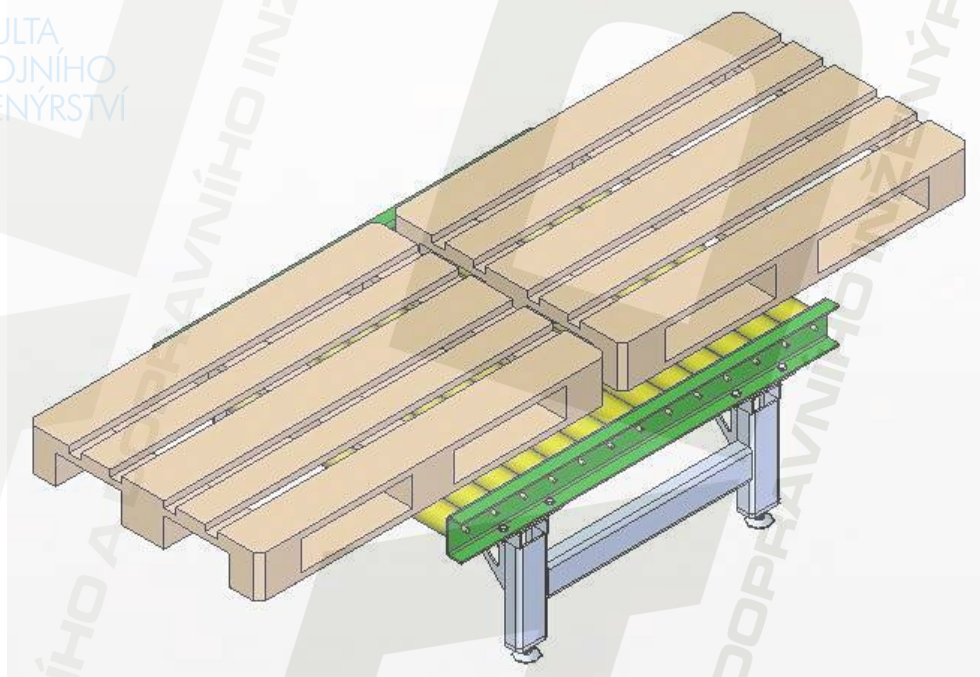
Počet zatížených válečků			
Poloha 1	2	1	2
Poloha 2	1	2	1
Poloha 3	2	2	1
Poloha 4	2	1	1

Tab. 1; Počet zatížených válečků tratě pod jednotlivými špalíky

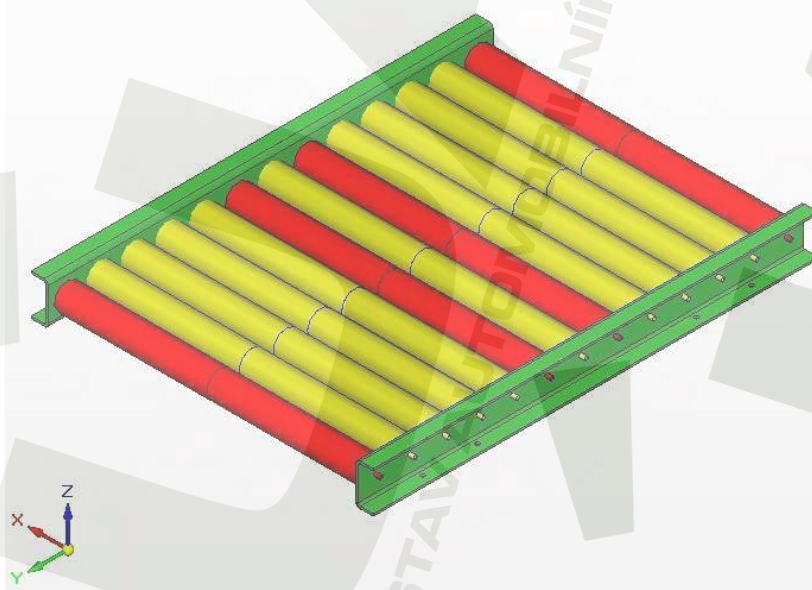
V rámci polohy europalety na válečkové trati byly vybrány dva zatěžovací stavy, při kterých je rám nejvíce namáhán. Prvním stavem je situace, kdy se na rámu setkají dvě palety a rám je nejvíce namáhán na krajích. Druhým stavem je nejméně příznivý stav z tab. 1, rám je nejvíce namáhán uprostřed. Další stavy nebyly řešeny, protože by v rámci optimalizace nebyly efektivně využity. Při obou stavech je rám namáhán statickým zatížením.

7.1 Zatěžovací stav 1

Prvním řešeným stavem je situace, kdy se na modulu tratě potkávají dvě palety. Zatíženy jsou válečky na krajích rámu a ve střední části rámu. Nejvíce jsou zatíženy krajní válečky, válečky ve střední části jsou zatíženy méně. Tento stav byl vybrán proto, aby byl zjištěn průhyb na kraji rámu při větším zatížení.



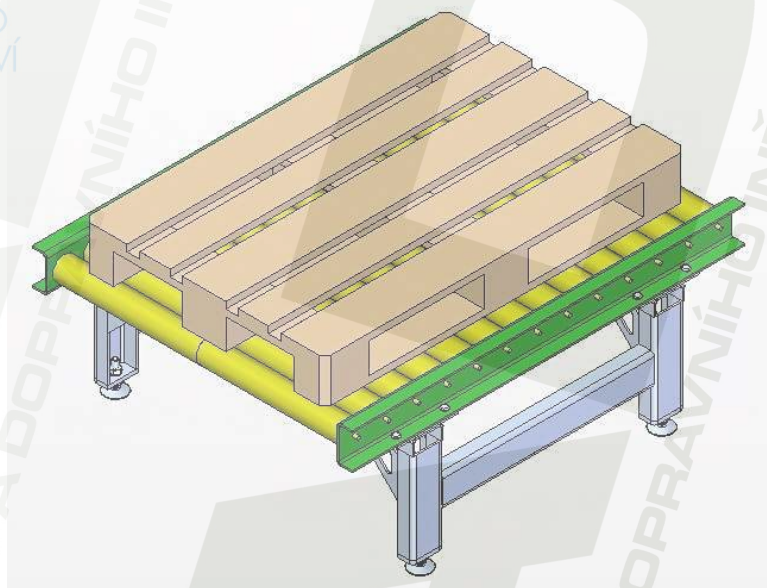
Obr. 16; Poloha palet při zatěžovacím stavu 1



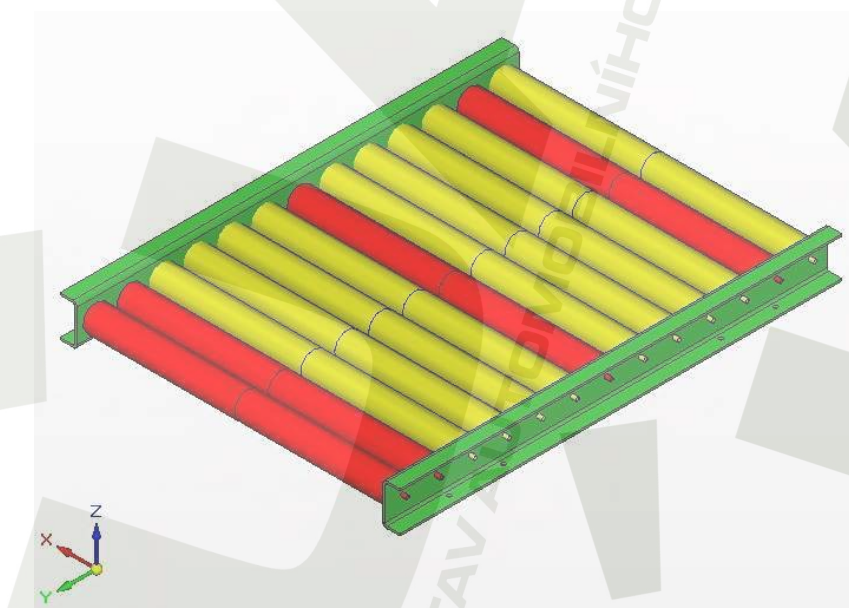
Obr. 17; Zatížené válečky (červeně) při zatěžovacím stavu 1

7.2 Zatěžovací stav 2

Druhým řešeným stavem je nejméně příznivý z tab. 1 v kapitole 7. Na modulu tratě se nachází jedna europaleta. Zatíženy jsou čtyři válečky, dva krajní na jedné straně, druhý od kraje na druhé straně a prostřední. Nejvíce je zatížen prostřední váleček, válečky na krajích palety jsou zatíženy méně. Tento stav byl vybrán, aby byl zjištěn průhyb středu rámu při větším zatížení.



Obr. 18; Poloha palety při zatěžovacím stavu 2



Obr. 19; Zatížené válečky (červeně) při zatěžovacím stavu 2

8 Podklady pro optimalizaci profilu hlavního rámu

Profil hlavního rámu válečkové tratě může být optimalizován na základě několika optimalizačních parametrů.

Optimalizační parametry:

- pevnostní
- funkční
- ekonomické

V podkladech pro optimalizaci není hledisko pevnosti uvedeno, protože vybrané profily pro optimalizaci jsou dimenzovány dostatečně. Napětí při zatížení profilů zadaným zatížením zdaleka nedosahuje srovnávacího napětí materiálu profilů. Výsledky pevnostní kontroly jsou uvedeny v kapitole 8.2.

Z hlediska funkce jsou profily v podkladech pro optimalizaci srovnávány na základě průhybu rámu v daných bodech.

Ekonomické hledisko je také bráno v úvahu. Cena profilů a plechů se odvíjí od jejich hmotnosti. V podkladech pro optimalizaci je uvedena hmotnost 1 m profilu.

Podklady pro optimalizaci jsou vypracovány na základě dvou vybraných zatěžovacích stavů.

8.1 Řešení zatěžovacích stavů

Jako prostředek pro rychlé řešení obou zatěžovacích stavů jsou vytvořeny formuláře pomocí kterých lze řešit průhyby a hmotnosti profilů. Na pozadí pracuje analytický výpočet pro řešení průhybů profilů. Proto je potřeba rám válečkové tratě a jeho zatížení zjednodušit.

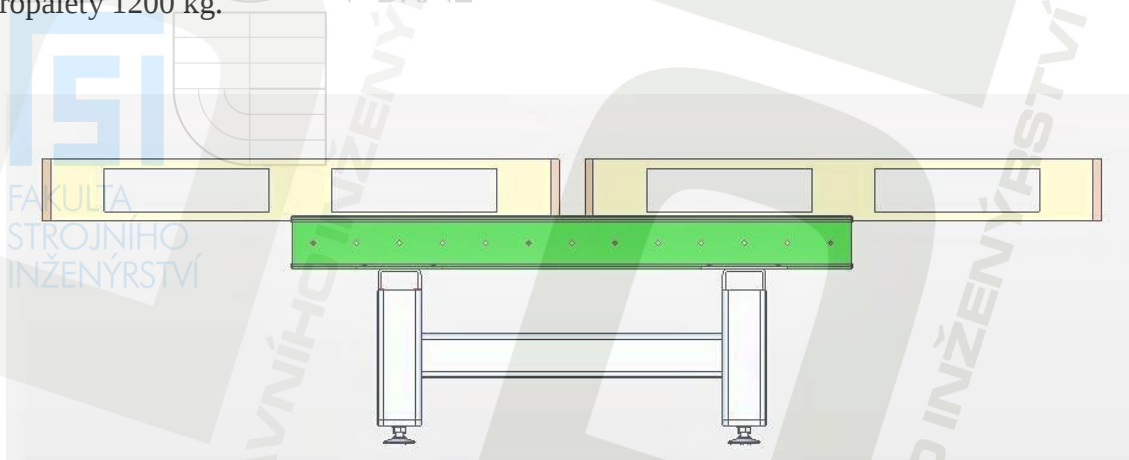
Samotný výpočet průhybu je řešen mohrovou metodou fiktivních sil. Princip metody spočívá ve vyřešení výsledných vnitřních účinků. Následně jsou z výsledných vnitřních účinků vypočteny fiktivní síly a momenty a s jejich pomocí lze vyřešit průhyby prutu v jednotlivých bodech. Kontrola správnosti výsledků je provedena pomocí MKP programu.

Pro výpočet je potřeba vyřešit vstupní parametry. Kromě velikosti sil, které budou vyřešeny v následujících dvou podkapitolách, se jedná také o průřezové charakteristiky řešených profilů. U normalizovaných válcovaných profilů jsou hodnoty převzaty z podkladů, které poskytuje výrobce. U ohýbaných profilů jsou průřezové charakteristiky řešeny na pozadí formulářů pro optimalizaci podle vztahů uvedených v kapitole 6.1.

Příklad výpočtů pracujících na pozadí formulářů je uveden v přílohách. Uvedeny jsou také náhledy formulářů.

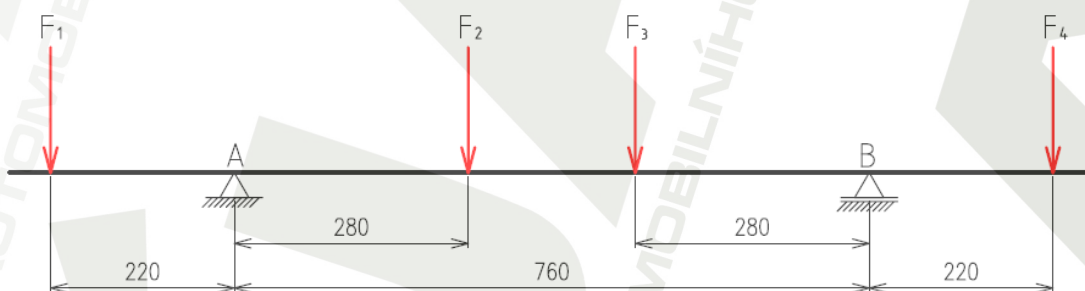
8.1.1 Zjednodušení zatěžovacího stavu 1

Válečková trať je při prvním zatěžovacím stavu zatížena dvěma europaletami, jak již bylo dříve zmíněno. Pro řešení výpočtových podkladů byla uvažována hmotnost europalety 1200 kg.



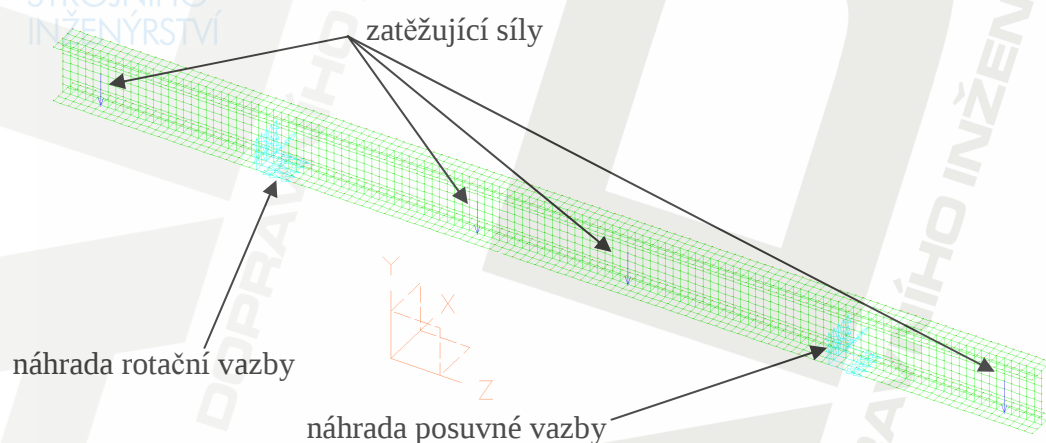
Obr. 20; Schéma zatěžovacího stavu 1

Pro analytický výpočet je rám zjednodušen na prismatický prut na dvou podporách s převislými konci zatížený čtyřmi osamělými silami v těžišti průřezu. Velikost sil při rovnoměrném zatížení je: $F_1 = 2950 \text{ N}$, $F_2 = 1475 \text{ N}$, $F_3 = 1475 \text{ N}$, $F_4 = 2950 \text{ N}$.



Obr. 21; Náčrt zjednodušeného zatěžovacího stavu 1 pro analytický výpočet

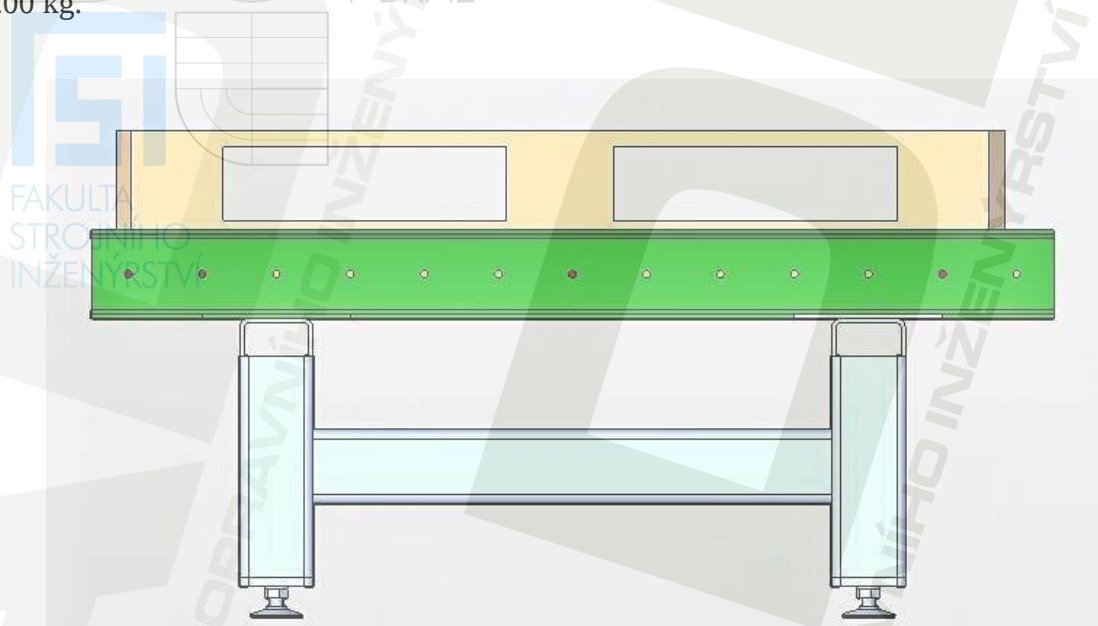
Pro výpočet pomocí MKP programu je profil hlavního rámu zjednodušen na skořepinový model. Ten je vytvořen pomocí dvourozměrných prvků o velikosti 10 mm. Např. síť profilu I 80 (Obr. 22) je složena z 1950 prvků a 2096 uzlů. Síly jsou umístěny v uzlech, v místech uchycení zatížených válečků. Jsou stejně velké jako při zjednodušení pro analytický výpočet. Vazby jsou v místech, jako jsou podpory pro analytický výpočet. Rotační vazba je provedena uzamčením posuvů ve směru os x , y , z a rotací kolem os y , z u vybraných uzlů. Posuvná vazba je provedena uzamčením posuvů ve směru os x , y a rotací kolem os y , z .



Obr. 22; Nákres zjednodušeného zatěžovacího stavu 1 pro výpočet pomocí MKP

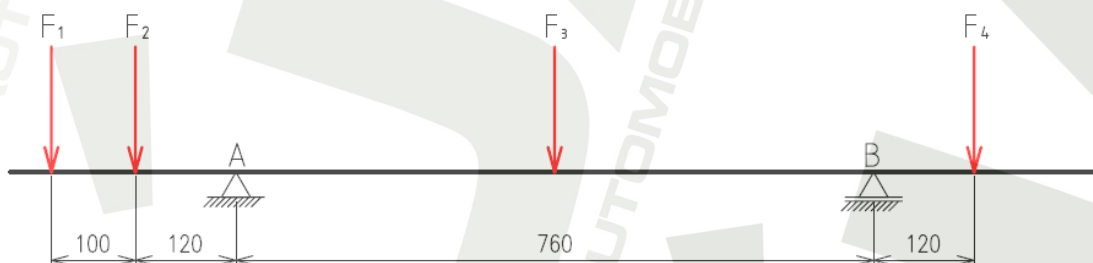
8.1.2 Zjednodušení zatěžovacího stavu 2

Při druhém zatěžovacím stavu je rám tratě zatížen jednou europaletou. Pro řešení výpočtových podkladů je stejně jako při zatěžovacím stavu 1 uvažována hmotnost europalety 1200 kg.



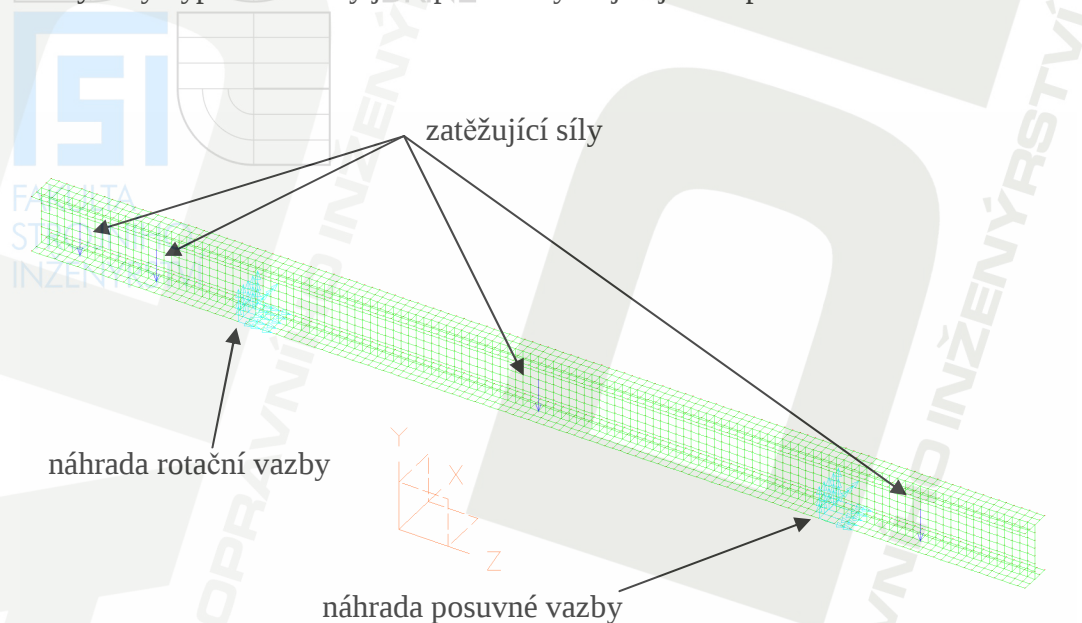
Obr. 23; Schéma zatěžovacího stavu 2

Pro analytický výpočet je rám zjednodušen na prismatický prut na dvou podporách s převislými konci zatížený čtyřmi osamělými silami v těžišti průřezu. Velikost sil při rovnoměrném zatížení je: $F_1 = 737,5 \text{ N}$, $F_2 = 737,5 \text{ N}$, $F_3 = 2950 \text{ N}$, $F_4 = 1475 \text{ N}$.



Obr. 24; Náčrt zjednodušeného zatěžovacího stavu 2 pro analytický výpočet

Pro výpočet pomocí MKP programu je profil hlavního rámu zjednodušen na skořepinový model, stejně jako zjednodušení při zatěžovacím stavu 1. Síly jsou umístěny v uzlech, v místech uchycení zatížených válečků. Jsou stejně velké jako při zjednodušení pro analytický výpočet. Vazby jsou provedeny stejně jako u předchozího modelu.



Obr. 25; Nákres zjednodušeného zatěžovacího stavu 2 pro výpočet pomocí MKP

8.2 Pevnostní kontrola hlavního rámu

Pevnostní kontrola profilu hlavního rámu je provedena v MKP programu. Zkontrolován jsou dva vybrané profily. Normalizovaný válcovaný profil I 80 a ohýbaný profilu U 80. Výsledky z MKP programu jsou zobrazeny níže.

Materiál normalizovaných válcovaných profilů je S235JR (11 375). Mez kluzu materiálu má hodnotu 235 MPa. Hodnota návrhové pevnosti je stanovena ze vztahu (18) doplněného o součinitel bezpečnosti s uvážením dynamických vlivů na konstrukci.

$$f_{yDNorm} = \frac{f_y}{\gamma_M \cdot 1,5}$$

$$f_{yDNorm} = \frac{235}{1,15 \cdot 1,5} = 136,2$$

$$f_{yDNorm} = 136,2 \text{ MPa}$$

Materiál ohýbaných profilů je S235JRC (11373). Mez kluzu tohoto materiálu je 186 MPa. Hodnota návrhové pevnosti je stanovena stejně jako u normalizovaných profilů.

$$f_{yDOh} = \frac{f_y}{\gamma_M \cdot 1,5}$$

$$f_{yDOh} = \frac{186}{1,15 \cdot 1,5} = 107,8$$

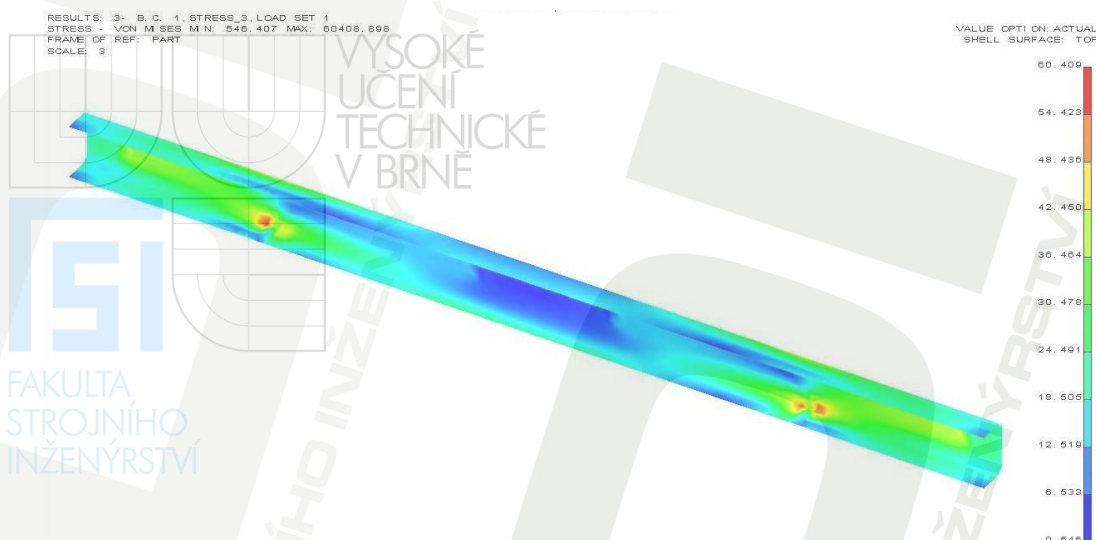
$$f_{yDOh} = 107,8 \text{ MPa}$$

RESULTS: 3, B.C. 1, STRESS: 3, LOAD SET: 1
STRESS: VON MISES, MIN: 137,371 MAX: 44300,281
FRAME OF REF: PART
SCALE: 3

VALUE OPTION: ACTUAL
SHELL SURFACE: TOP



Obr. 26; Nedeformovaný model profilu I 80 při zatěžovacím stavu 1, redukované napětí podle podmínky HMH, rozsah stupnice od 0,1 do 44 MPa, srovnávací napětí 136 MPa



Obr. 27; Nedeformovaný model profilu U 80 při zatěžovacím stavu 1, redukované napětí podle podmínky HMM, rozsah stupnice od 0,5 do 60 MPa, srovnávací napětí 108 MPa

Z dosažených výsledků (Obr. 26, 27) vyplývá, že navržené profily jsou pevnostně vyhovující při daném zatížení. Maximální napětí jsou menší než srovnávací napětí. Výsledná napětí jsou proti reálnému stavu navíc ovlivněna v důsledku koncentrací napětí v místech zjednodušení vazebních podmínek.

Kontrola je provedena při zatěžovacím stavu 1, při kterém je hlavní rám zatížen většími silami než při zatěžovacím stavu 2. Zvolené profily patří mezi nejméně robustní z použitých při podkladech optimalizace. Z toho vyplývá, že ostatní profily jsou také pevnostně vyhovující.

8.3 Formulář pro optimalizaci ohýbaných profilů

Formulář pro ohýbané plechové profily umožňuje jednoduchým způsobem získat hodnoty průhybů profilu při obou navržených zatěžovacích stavech. Zápisem hodnot do tabulky lze kompletně navrhnout rozměry profilu. Na základě zadaných hodnot formulář vypíše průhyby ve třech bodech a hmotnost 1 m profilu.

Formulář obsahuje několik částí, které slouží k zápisu hodnot, zobrazení hodnot a k usnadnění orientace ve formuláři.

V horní části formuláře (Obr. 28) jsou 3 oblasti. V zeleně zvýrazněné oblasti 1 je zobrazen náčrtek řešeného profilu se zakótovanými hlavními rozměry. Vedle něj se nachází červeně zvýrazněná oblast 2. V té je tabulka, která slouží k zápisu hlavních rozměrů profilu jako je výška, šířka, poloměr ohybu a tloušťka plechu. Pomocí těchto hodnot formulář řeší průřezové charakteristiky profilů. Pod tabulkou černě zvýrazněná oblast 3. Obsahuje pole, které na základě zadaných rozměrů profilu vypíše hmotnost 1 m profilu.

Ohýbaný profil U

1

2

b	40
h	80
t	6
r	9

3

Hmotnost 1 m profilu [kg] 6,565

Obr. 28; Formulář pro optimalizaci ohýbaného profilu U – horní část

Další dvě části formuláře (Obr. 29) jsou podobné, obsahují další tři oblasti, první skupina patří k zatěžovacímu stavu 1, druhá skupina k zatěžovacímu stavu 2. Modře zvýrazněná oblast 4 slouží k zápisu zatěžovacích sil. Oranžově zvýrazněná oblast 5 obsahuje tři pole. Každé z nich zvýrazňuje průhyb v jednu bodě. V šedě zvýrazněné oblasti 6 se nachází nákresy zatěžovacích stavů s popsáním silami a body, ve kterých je řešen průhyb profilu.



Zatížení stav 1 [N]

F1	2950	F2	1475
F3	1475	F4	2950

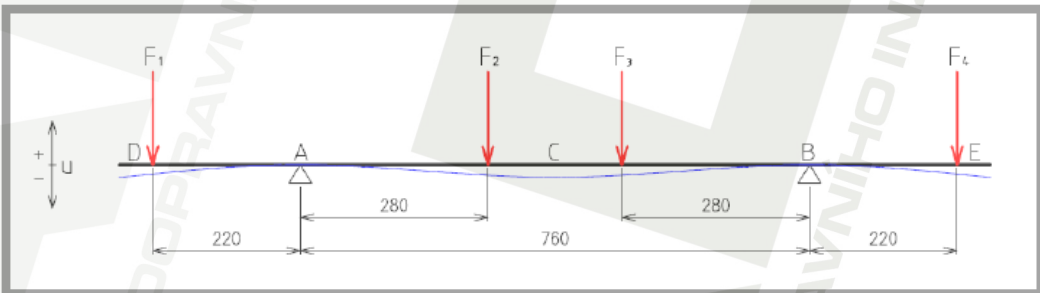
4

Průhyb [mm]

uC	-0,142187	uD	-0,272009	uE	-0,272009
----	-----------	----	-----------	----	-----------

5

6



Zatížení stav 2 [N]

F1	737,5	F2	737,5
F3	2950	F4	1475

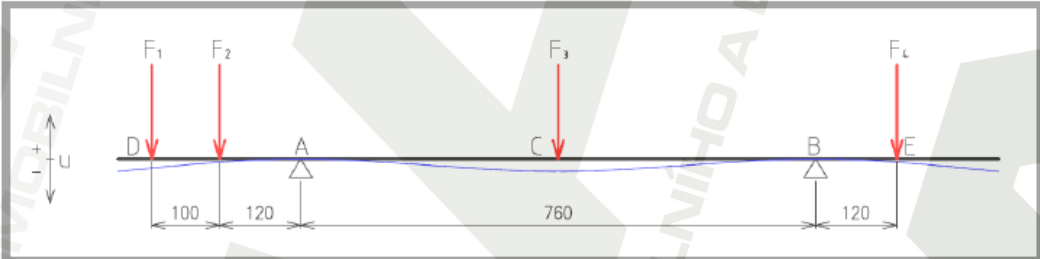
4

Průhyb [mm]

uC	-0,073116	uD	0,006008	uE	0,01735
----	-----------	----	----------	----	---------

5

6



Obr. 29; Formulář pro optimalizaci ohýbaného profilu U – dolní část

8.4 Formulář pro optimalizaci normalizovaných válcovaných profilů

Formulář pro normalizované válcované profily umožňuje podobně jako předchozí pro ohýbané profily jednoduchým způsobem získat hodnoty průhybů profilu při obou navržených zatěžovacích stavech. V tabulce lze vybrat profil a na základě zadaných hodnot formulář vypíše průhyby ve třech bodech a hmotnost 1 m profilu.

Formulář obsahuje několik oblastí, které slouží k zápisu hodnot, zobrazení hodnot a k usnadnění orientace ve formuláři.

Horní část formuláře (Obr. 30) obsahuje dvě oblasti. V červeně zvýrazněné oblasti 1 lze zadáním hodnoty 1 vybrat libovolný z předem vytipovaných profilů. V jeden moment může být vybrán pouze jeden profil. V černě zvýrazněné oblasti 2 formulář zobrazuje hmotnost 1 m vybraného profilu.

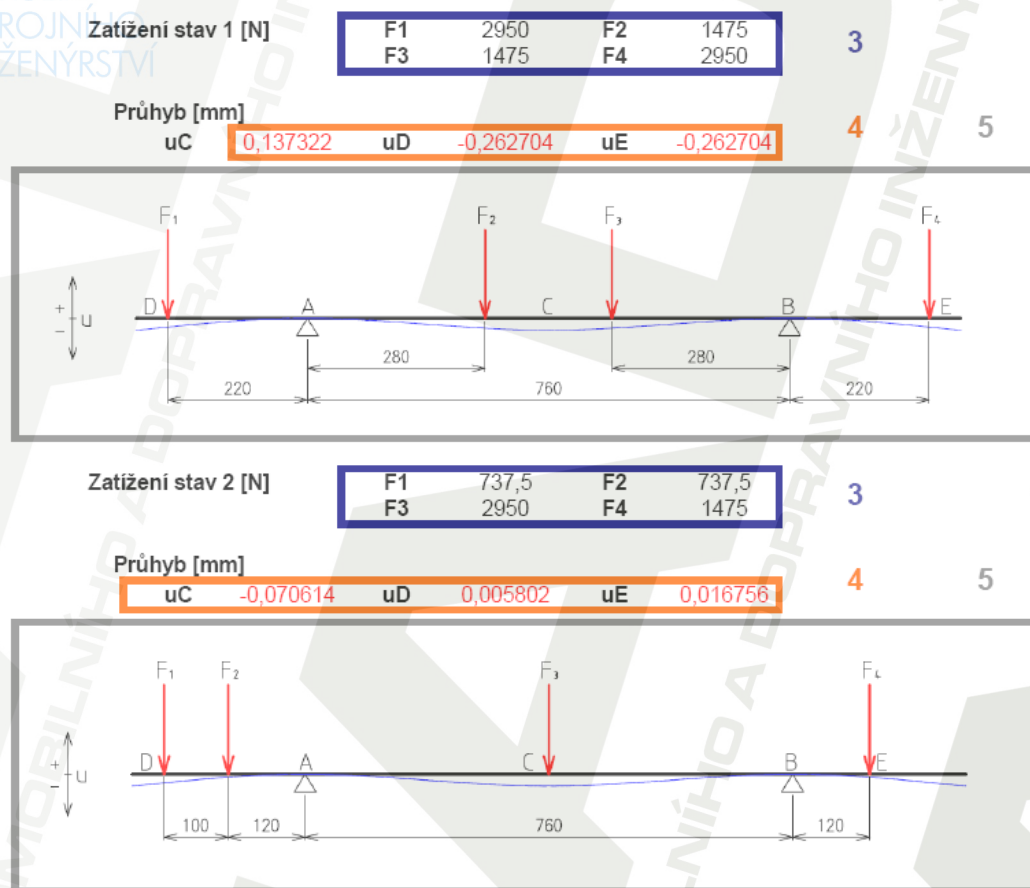
Normalizované válcované profily

I 80	1	IPE 80	0	U 80	0	L 90x60x6	0
I 100	0	IPE 100	0	U 100	0	L 90x60x8	0
I 120	0	IPE 120	0	U 120	0	L 100x75x9	0
I 140	0	IPE 140	0	U 140	0	L 120x80x10	0
I 160	0	IPE 160	0	U 160	0	L 130x65x8	0
I 180	0	IPE 180	0	U 180	0	L 130x65x10	0
I 200	0	IPE 200	0	U 200	0	L 150x75x9	0
						L 180x90x10	0
						L 200x100x14	0

Hmotnost 1 m profilu [kg] **5,940**

Obr. 30; Formulář pro optimalizaci normalizovaných profilů – horní část

Další dvě části formuláře (Obr. 31) jsou stejné, jako ve formuláři pro ohýbané profily. Obsahují další tři oblasti, první skupina patří k zatěžovacímu stavu 1, druhá skupina k zatěžovacímu stavu 2. Modře zvýrazněná oblast 3 slouží k zápisu zatěžovacích sil. Oranžově zvýrazněná oblast 4 obsahuje tři pole. Každé v nich zvýrazňuje průhyb v jednu bodě. V šedě zvýrazněné oblasti 5 se nachází nákresy zatěžovacích stavů s popsány silami a body, ve kterých je vypsán průhyb profilu.



Obr. 31; Formulář pro optimalizaci normalizovaných profilů – dolní část

8.5 Podmínky zadávání vstupních hodnot

Zadávání hlavních rozměrů ohýbaného profilu do formuláře není výrazně omezeno. Průřezové charakteristiky budou bez problémů vypočteny pro jakékoliv rozměry profilu, jediným omezením je minimální dovolený poloměr ohybu.

Minimální poloměr ohybu lze podle [8] zjednodušeně stanovit:

$$r_{\min} = t$$

Vzhledem ke způsobu řešení podkladů pro výstupy z formulářů jsou ale jistým způsobem omezeny velikosti zatěžujících sil. Pro libovolnou velikost zatížení by muselo být vytvořeno více variant formulářů. Pro konkrétní případ jsou vstupní parametry omezeny. Při jejich nedodržení by nastal jiný průběh výsledných vnitřních účinků a následně vypočtené hodnoty průhybů by byly nepřesné, ovlivněné odlišným tvarem průběhu výsledných vnitřních účinků.

Velikosti zadaného zatížení pro zatěžovací stav 1 musí splňovat tyto podmínky:

$$F_1 > F_2 = F_3$$

$$F_4 > F_2 = F_3$$

Velikosti zadaného zatížení pro zatěžovací stav 2 musí splňovat tyto podmínky:

$$F_3 > F_1 + F_2$$

$$F_3 > F_4$$

8.6 Srovnání výsledků

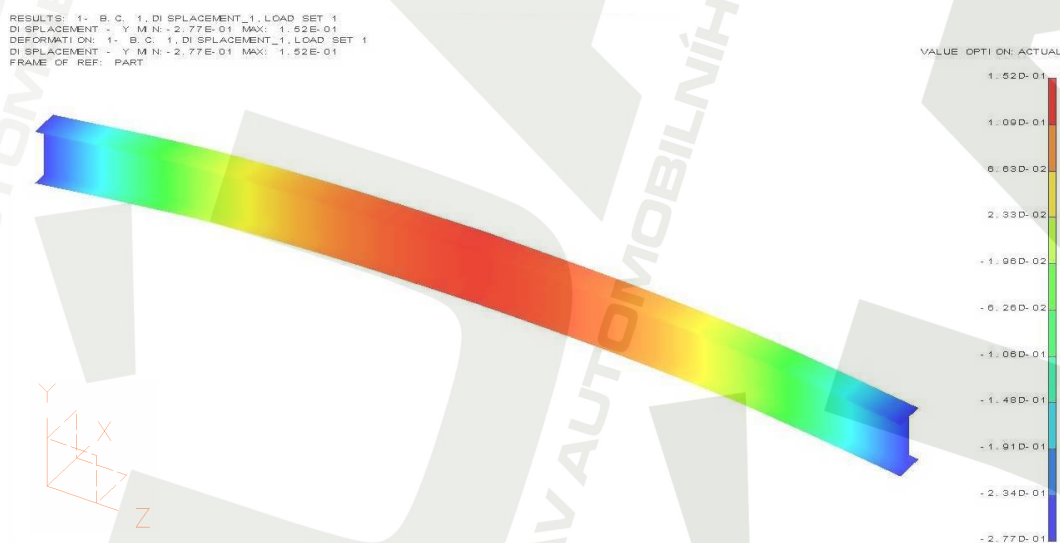
Aby byla ověřena spolehlivost výsledků dosažených analytickou metodou řešení jsou výsledky srovnány s výsledky dosaženými pomocí MKP programu při vyřešení stejných zatěžovacích stavů. Pro ověření správnosti výsledků je vybrán normalizovaný válcovaný profil I 80 a ohýbaný profil 80 x 45 x 6. Srovnání výsledků je provedeno v tab. 2 a tab. 3. Deformace jsou měřeny ve směru osy y.

8.6.1 Srovnání průhybů profilu I 80

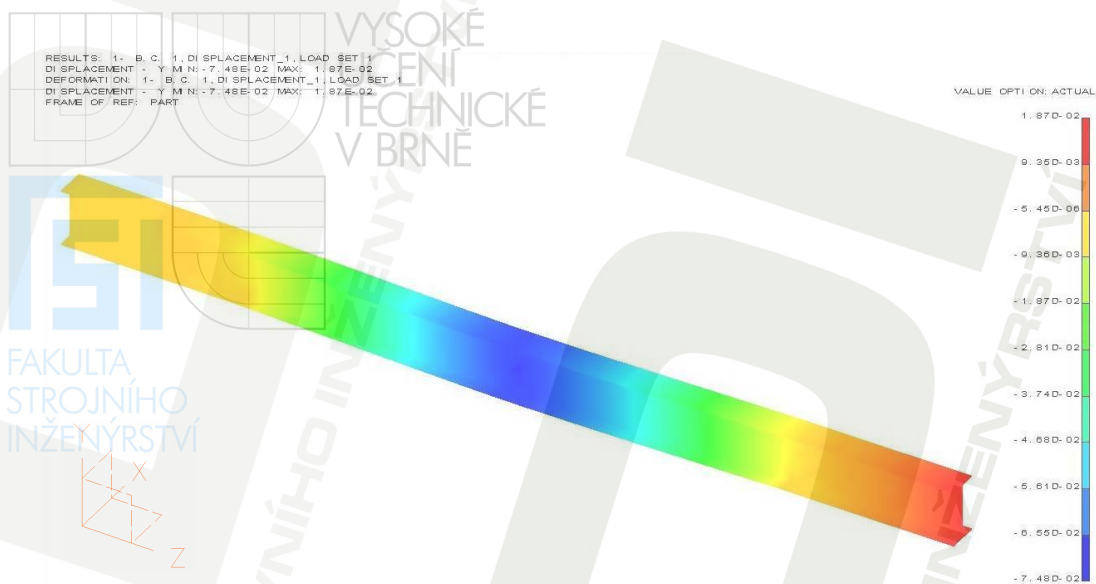
Srovnání průhybů profilu I 80 dosažených analytickým výpočtem a metodou MKP je provedeno v tab. 2, kde jsou uvedeny absolutní hodnoty maximálních průhybů. Uvažovány byly oba dříve vybrané zatěžovací stavy. Pod tabulkou jsou na obr. 32 a 33 uvedeny deformované modely profilu z MKP programu. Model profilu je vytvořen pomocí střednicových ploch.

Normalizovaný profil I 80		
Druh výpočtu	Maximální průhyb stav 1 [mm]	Maximální průhyb stav 2 [mm]
MKP	0,277	0,0748
Analytický	0,263	0,0706

Tab. 2; Deformace profilu I 80



Obr. 32; Deformovaný model profilu I 80, měřítko deformace 100:1 – zobrazení průběhu průhybu na horní ploše skřepiny při zatěžovacím stavu 1, rozsah stupnice -0,277 až 0,152 mm



Obr. 33; Deformovaný model profilu I 80, měřítko deformace 100:1 – zobrazení průběhu průhybu na horní ploše skořepiny při zatěžovacím stavu 2, rozsah stupnice -0,0748 až 0,0187 mm

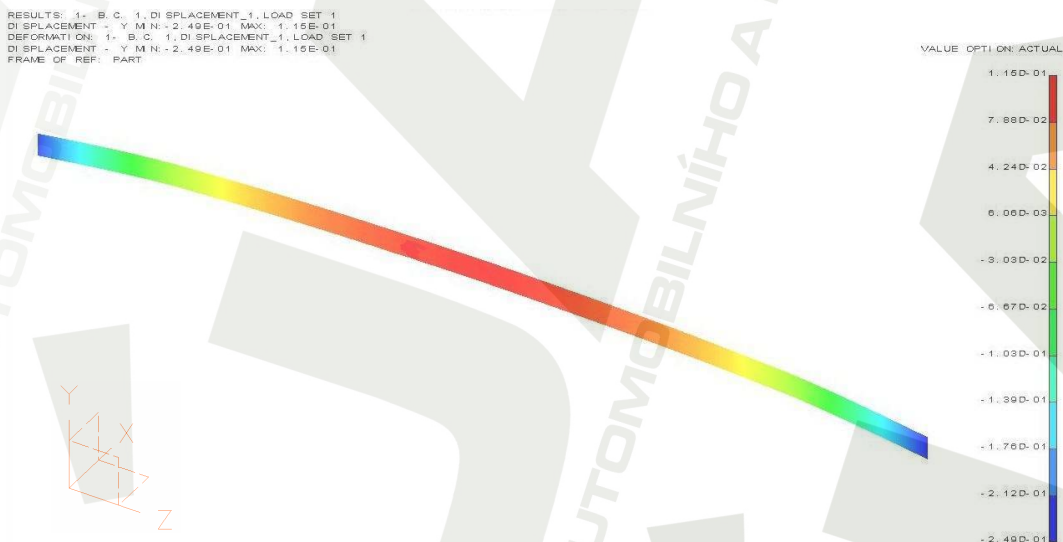
8.6.2 Srovnání průhybů ohýbaného profilu U 80

Srovnání průhybů ohýbaného profilu U 80 dosažených analytickým výpočtem a metodou MKP je provedeno v tabulce 3, kde jsou uvedeny absolutní hodnoty maximálních průhybů. Uvažovány jsou oba dříve vybrané zatěžovací stavy. Model je vytvořen pomocí střednicových ploch včetně poloměrů ohybu. Pod tabulkou na obr. 34 a 35 jsou uvedeny deformované modely z MKP programu. Zobrazeny jsou pouze prvky v blízkosti podélné osy symetrie profilu, protože jejich posuvy jsou nejméně ovlivněny kroucením profilu.

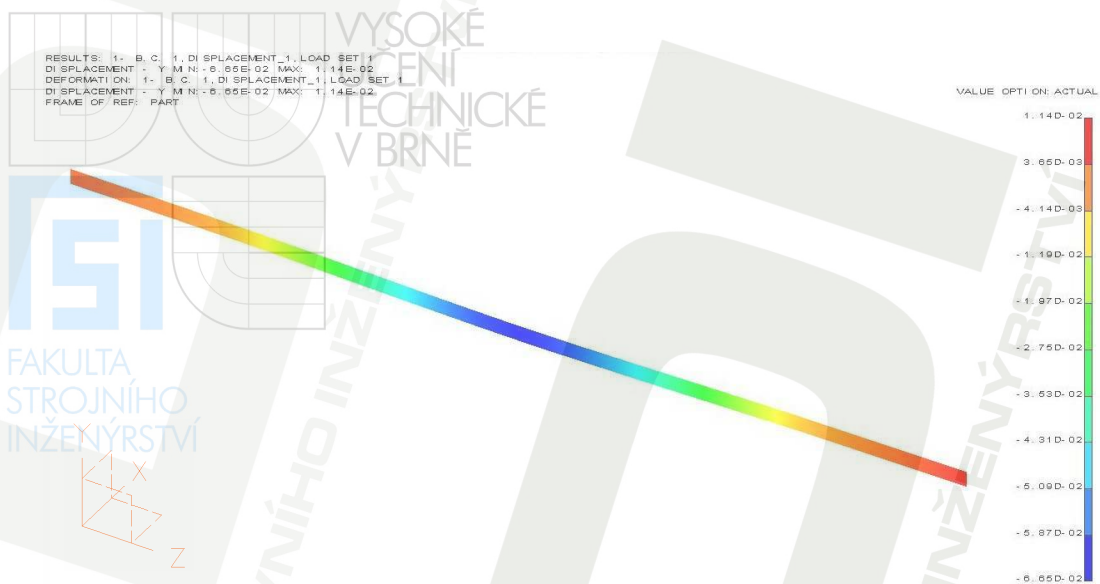
Na obr. 36 je zobrazen model celého deformovaného ohýbaného profilu U 80 při zatěžovacím stavu 2. Větší deformace jsou způsobeny kroucením profilu.

Ohýbaný profil U 80 x 45 x 6		
Druh výpočtu	Maximální průhyb stav 1 [mm]	Maximální průhyb stav 2 [mm]
MKP	0,249	0,0665
Analytický	0,239	0,0643

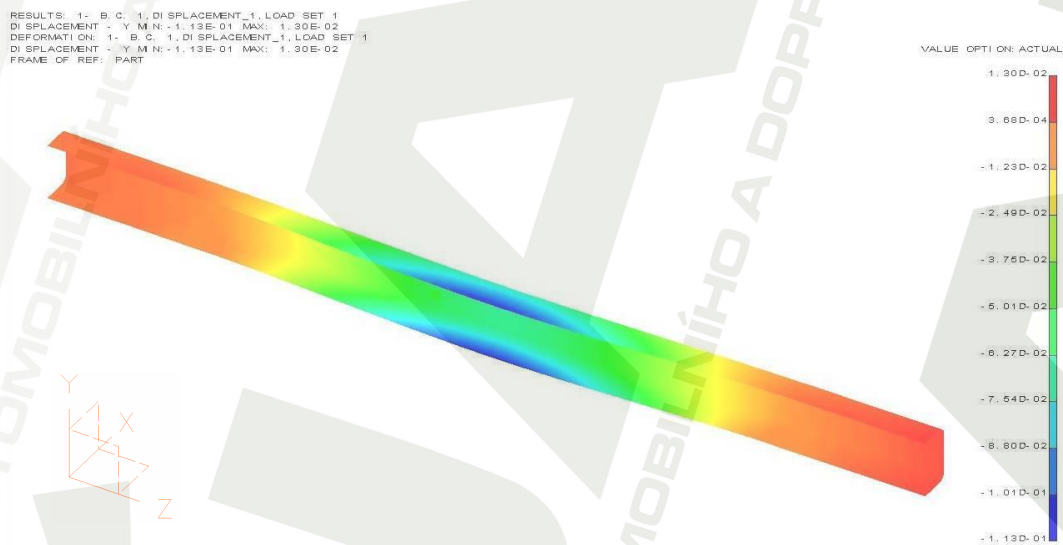
Tab. 3; Deformace profilu U 80



Obr. 34; Zobrazení deformace prvků kolem podélné osy symetrie profilu U při zatěžovacím stavu 1, měřítko deformace 100:1, rozsah stupnice -0,249 až 0,115 mm



Obr. 35; Zobrazení deformace prvků kolem podélné osy symetrie profilu U při zatěžovacím stavu 2, měřítko deformace 100:1, rozsah stupnice -0,0665 až 0,0114 mm



Obr. 36; Deformovaný model profilu U 80 při zatěžovacím stavu 2, měřítko deformace 100:1, rozsah stupnice -0,113 až 0,013 mm

8.6.3 Vyhodnocení výsledků

Výsledky dosažené oběma metodami výpočtu jsou srovnatelné. Rozdíl výsledků při porovnání obou metod je malý, vyjádřeno číslem činí asi 5%. To je dáno také rozdílností zjednodušených výpočtových modelů pro obě metody řešení.

Formuláře pro výpočet průhybů lze tedy pro podklady optimalizace hlavního rámu válečkové tratě použít. Výhodou jejich využití, vzhledem k jiným metodám, je jednoduchost zadávání vstupních dat a rychlost výpočtu.

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

9 Porovnání profilů

Podklady pro výběr nejvhodnějšího profilu hlavního rámu jsou získány z formulářů a umožňují srovnávat hlavní profil rámu válečkové tratě na základě zatížení, průhybu a hmotnosti. Hlavní profil může být vyroben z libovolného ohýbaného plechového profilu U, L nebo Z, nebo vybraných normalizovaných válcovaných profilů I, IPE, U a L.

U nesymetrických profilů je třeba brát v úvahu, že kromě průhybu vypočteného ve formulářích nastane také mnohem větší zkroucení profilu, než u symetrických profilů. Kroucení profilů vzniká v případě, že výslednice sil neprochází středem ohybu. Při daném zatížení rámu válečkové tratě výslednice sil středem ohybu neprochází.

Pro optimalizaci jsou určeny normalizované válcované profily I o výšce průřezu 80 až 200 mm, IPE 80 až 200 mm, U 80 až 200 mm a L 90 až 200 mm. Materiál normalizovaných válcovaných profilů výrobce uvádí S235JR (11 375).

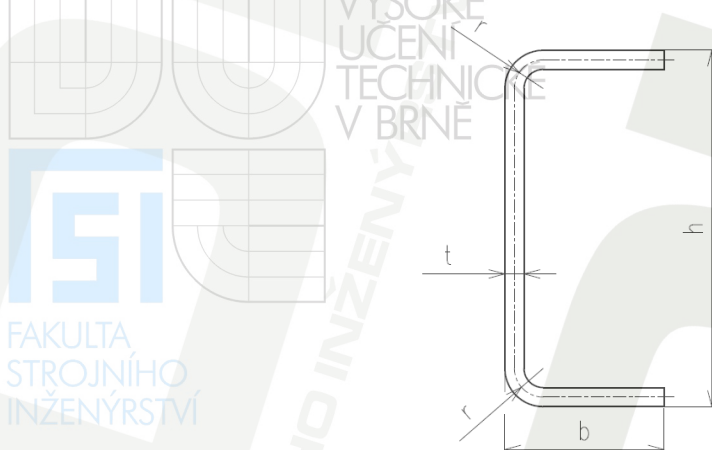
Ohýbané profily U, L a Z jsou navrženy tak, aby se rozměry a hmotností co nejvíce podobaly válcovaným profilům. Materiál ohýbaných profilů je S235JRC (11 373), což je materiál vhodný pro za studena ohýbané součásti.

Vybrané normalizované válcované profily:

Označení profilu	Výška průřezu profilu [mm]						
I	80	100	120	140	160	180	200
IPE	80	100	120	140	160	180	200
U	80	100	120	140	160	180	200
L	90	100	120	130	150	180	200

Tab. 4; Vybrané normalizované válcované profily

Vybrané ohýbané profily U:



Obr. 37; Náskres ohýbaného profilu U

Rozměr [mm]	Profil U						
h	80	100	120	140	160	180	200
b	45	50	55	60	65	70	75
t	6	6	8	8	8	10	10
r	6	6	8	8	8	10	10

Tab. 5; Vybrané ohýbané profily U

Vybrané ohýbané profily L:

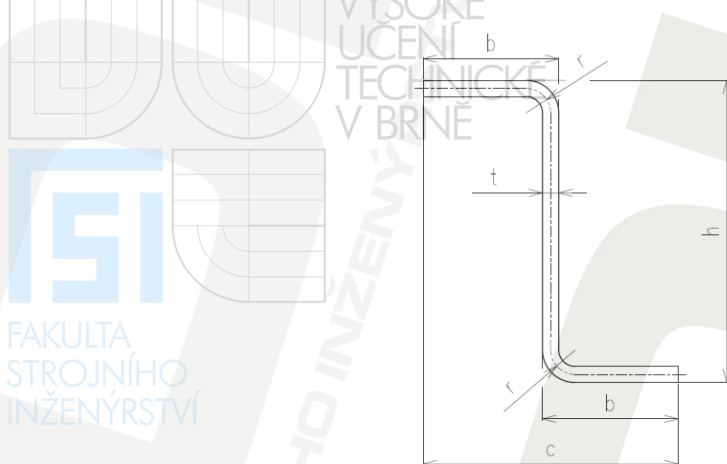


Obr. 38; Náskres ohýbaného profilu L

Rozměr [mm]	Profil L						
h	80	100	120	140	160	180	200
b	45	50	55	60	65	70	75
t	8	8	8	10	10	12	12
r	8	8	8	10	10	12	12

Tab. 6; Vybrané ohýbané profily L

Vybrané ohýbané profily Z:



Obr. 39; Náskres ohýbaného profilu L

Rozměr [mm]	Profil Z						
h	80	100	120	140	160	180	200
b	45	50	55	60	65	70	75
t	6	6	8	8	8	10	10
r	6	6	8	8	8	10	10

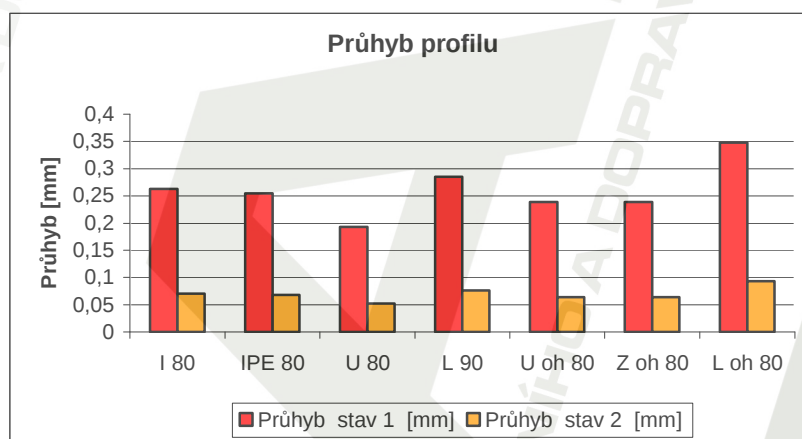
Tab. 7; Vybrané ohýbané profily Z

9.1 Grafické porovnání vybraných profilů

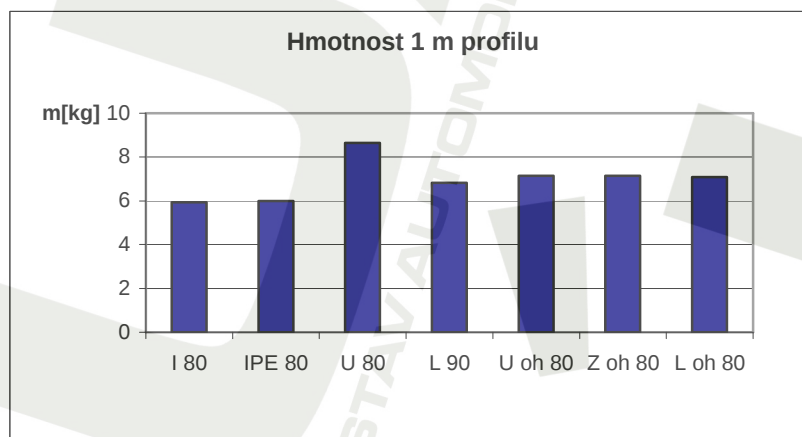
Pro grafické porovnání jsou z vybraných profilů srovnány tři rozměrové skupiny. Ze škály jsou vybrány profily s výškou průřezu 80 mm (profil L se v tomto rozměru nevyrábí, jako alternativa byl vybrán profil L 90), s výškou průřezu 140 mm (v tomto rozměru se profil L také nevyrábí, jako alternativa je vybrán profil L 150) a s výškou průřezu 200 mm.

Profil	Maximální průhyb stav 1 [mm]	Maximální průhyb stav 2 [mm]	Hmotnost 1 m [kg]
I 80	0,263	0,07	5,94
IPE 80	0,255	0,068	6
U 80	0,193	0,052	8,64
L 90x60x6	0,285	0,076	6,82
U oh 80x45x6	0,239	0,064	7,15
Z oh 80x45x6	0,239	0,064	7,15
L oh 80x45x6	0,348	0,093	7,09

Tab. 8; Tabulka průhybů a hmotností profilů první rozměrové skupiny



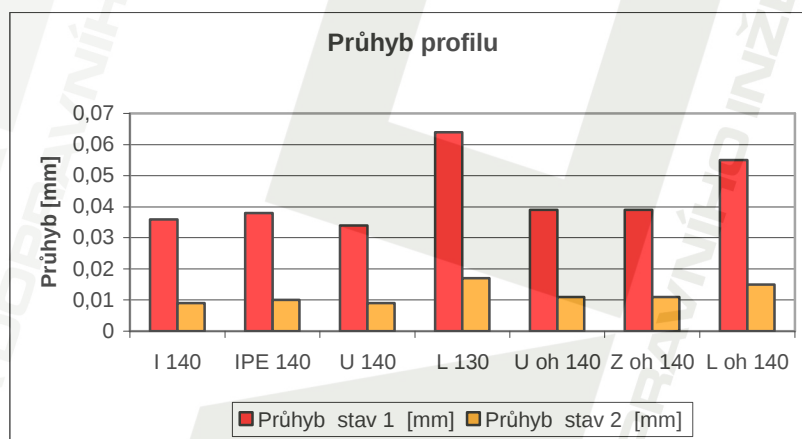
Obr. 40; Grafické zobrazení průhybu profilů první rozměrové skupiny



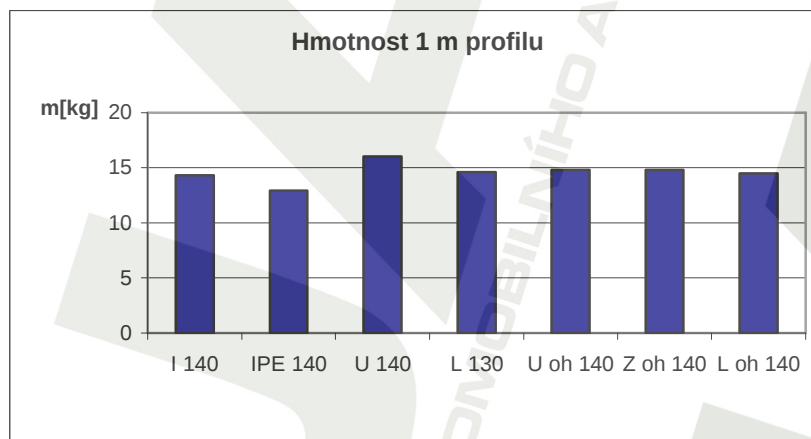
Obr. 41; Grafické zobrazení hmotností profilů první rozměrové skupiny

Profil	Maximální průhyb stav 1 [mm]	Maximální průhyb stav 2 [mm]	Hmotnost 1 m [kg]
I 140	0,036	0,009	14,3
IPE 140	0,038	0,01	12,9
U 140	0,034	0,009	16
L 130x65x10	0,064	0,017	14,6
U oh 140x65x8	0,039	0,011	14,8
Z oh 140x65x8	0,039	0,011	14,8
L oh 140x65x10	0,055	0,015	14,48

Tab. 9; Tabulka průhybů a hmotností profilů druhé rozměrové skupiny



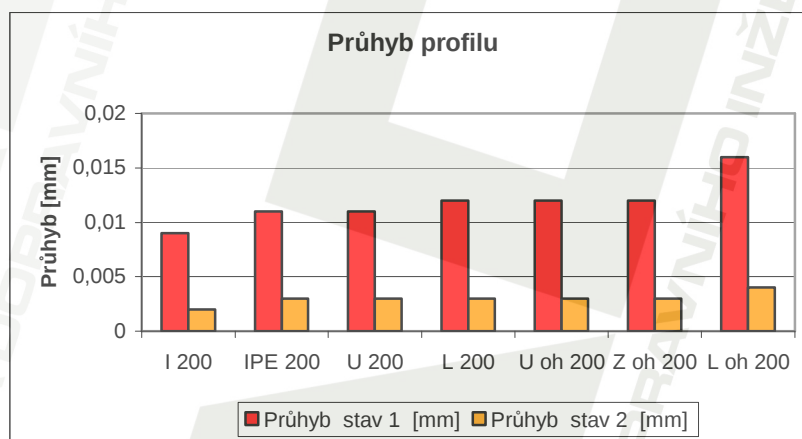
Obr. 42; Grafické zobrazení průhybu profilů druhé rozměrové skupiny



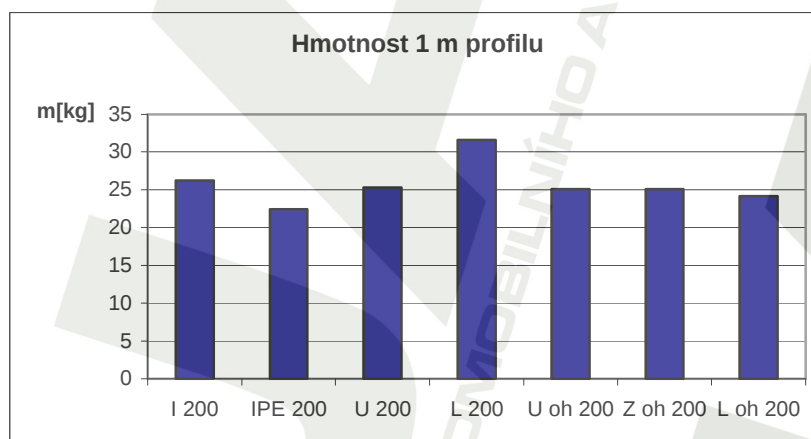
Obr. 43; Grafické zobrazení hmotností profilů druhé rozměrové skupiny

Profil	Maximální průhyb stav 1 [mm]	Maximální průhyb stav 2 [mm]	Hmotnost 1 m [kg]
I 200	0,009	0,002	26,2
IPE 200	0,011	0,003	22,4
U 200	0,011	0,003	25,3
L 200x100x14	0,012	0,003	31,6
U oh 200x75x10	0,012	0,003	25,07
Z oh 200x75x10	0,012	0,003	25,07
L oh 200x75x12	0,016	0,004	24,14

Tab. 10; Tabulka průhybů a hmotnosti profilů třetí rozměrové skupiny



Obr. 44; Grafické zobrazení průhybu profilů třetí rozměrové skupiny



Obr. 45; Grafické zobrazení hmotností profilů třetí rozměrové skupiny

9.2 Vyhodnocení vybraných profilů

Pomocí tabulek a grafů v kapitole 9.1 jsou srovnány vybrané válcované a ohýbané profily podobných rozměrů. Při výběru nejvhodnějšího profilu hraje největší roli průhyb a hmotnost. Cena válcovaného profilu, nebo plechu pro ohýbaný profil je přímo úměrná hmotnosti.

Díky konstrukci profilů klesá u většiny z nich průhyb s nárůstem hmoty. Více hmotné profily jsou tužší. Jako příklad může posloužit válcovaný profil I. V kategorii profilů s nejmenší výškou průřezu patří mezi nejlehčí, ale středně ohýbané profily. S rostoucí výškou profilu jeho hmotnost, vzhledem k ostatním profilům, stoupá a průhyb je menší. Nemusí to ale být pravidlem, např. u zmíněného profilu I záleží na rozložení hmoty na stojnu a pásnice.

Ve prospěch ohýbaných profilů hovoří nižší pořizovací cena plechů než samotných profilů. Z hlediska namáhání je z ohýbaných profilů nejlepší symetrický ohýbaný profil Z, dochází u něj k nejmenšímu kroucení. Při použití ohýbaných profilů by ale musel výrobce disponovat ohranovacím lisem, což je velká investice. Ohýbané profily by proto byly vhodné spíše pro velkosériovou výrobu.

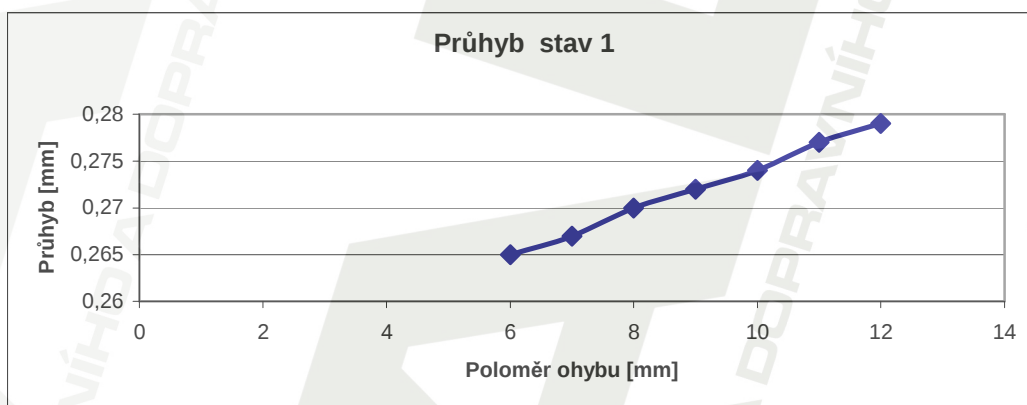
Při srovnání profilů vykazuje nejlepší poměr hmotnosti a průhybu profil IPE. Ve všech třech sledovaných kategoriích patří mezi nejlehčí a zároveň nejméně ohýbané profily. Navíc u něj bude docházet k velmi malému kroucení.

9.3 Vliv poloměru ohybu u ohýbaných profilů

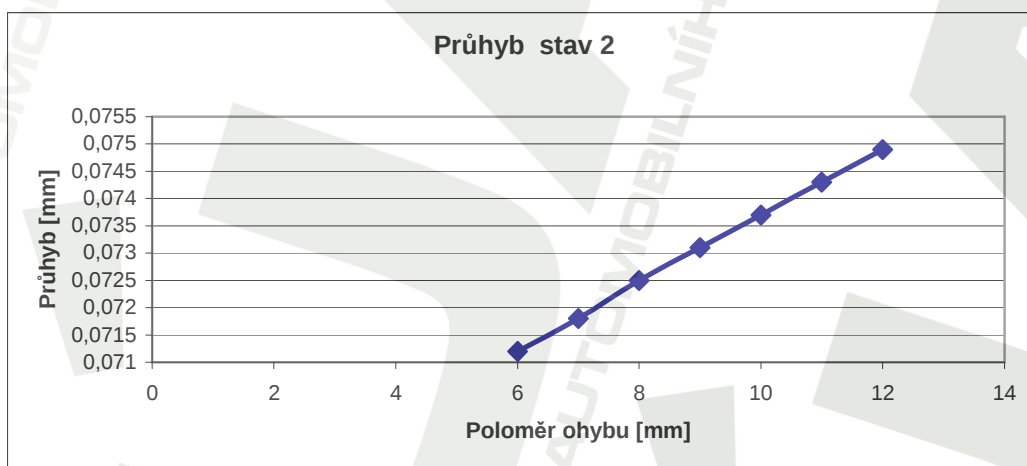
Pomocí formulářů lze také posoudit např. vliv poloměru ohybu na vlastnosti ohýbaných profilů. Pro ukázkou je vybrán profil 80 x 40 x 6 mm s poloměrem ohybu 6 až 12 mm.

Poloměr ohybu [mm]	6	7	8	9	10	11	12
Průhyb stav 1 [mm]	0,265	0,267	0,27	0,272	0,274	0,277	0,279
Průhyb stav 2 [mm]	0,0712	0,0718	0,0725	0,0731	0,0737	0,0743	0,0749

Tab. 11; Hodnoty maximálního průhybu při různém poloměru ohybu



Obr. 46; Znárodnění průhybu při různých poloměrech ohybu, zatěžovací stav 1



Obr. 47; Znárodnění průhybu při různých poloměrech ohybu, zatěžovací stav 2

Z grafického znázornění hodnot průhybu při rozdílném poloměru ohybu profilu je zřejmé, že při rostoucím poloměru ohybu klesá tuhost profilu, tím se zvětšuje jeho průhyb.

10 Závěr

Tato práce popisuje návrh podpěrného modulu válečkové tratě a tvorbu optimalizačních podkladů válečkové tratě pro dopravu manipulačních jednotek – europalet.

V první části práce je popsán návrh výškově stavitelného modulu podpěrného rámu. Ten je navržen jako jednoduchá svařovaná konstrukce z ohýbaných plechových profilů. Výšková stavitelnost je umožněna díky závitovým tyčím.

V další části práce jsou popsány výpočtové metody řešení podkladů pro optimalizaci, včetně metody konečných prvků, která byla použita ke kontrole výsledků.

Dále jsou popsány podklady pro optimalizaci. Jsou vybrány dva zatěžovací stavy pomocí kterých lze vytvořit podklady pro optimalizaci profilu hlavního rámu válečkové tratě. V rámci optimalizačních podkladů jsou vytvořeny formuláře, ve kterých lze velmi jednoduchým způsobem, na základě specifikace profilu a jeho zatížení, získat hodnoty průhybů profilu v daných bodech.

V poslední části práce jsou využity formuláře pro vytvoření podkladů pro porovnání jednotlivých profilů. Porovnání je provedeno pomocí tabulek a grafů. Na základě výstupních parametrů je také vybrán profil ideální pro hlavní rám válečkové tratě.

11 Seznam použité literatury

- [1] DRAŽAN, F. – JEŘÁBEK, K. *Manipulace s materiálem*. Praha: SNTL, 1979.
- [2] MALÍK, Vratislav. *Válečkové tratě v teorii a praxi*. Praha: SNTL, 1963.
- [3] JANÍČEK, P. – ONDRÁČEK, E. – VRBKA, J. *Pružnost a pevnost I*. Brno: CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-X.
- [4] JURÁŠEK, Oldřich. *Teorie nosných konstrukcí*. Brno 1988
- [5] ČSN 74 1401. *Navrhování ocelových konstrukcí*. Český normalizační institut 1998
- [6] LEINVEBER, J. – VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. 4. vyd. Úvaly: ALBRA, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [7] ADÁMEK, V. – PLÁNIČKA, F. – ZAJÍČEK, M. *Podpůrné materiály pro studium*. [cit. 3009-5-20]. Dostupné z: <<http://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/>>
- [8] DVOŘÁK, M. – MAREČKOVÁ, M. *Technologie tváření*. Brno 2006
Dostupné z:
<http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/index.htm>
- [9] FERONA, a. s. *Sortimentní katalog*. 2004 – 2009.
Dostupné z: < <http://www.ferona.cz/cze/katalog/>>
- [10] TRANZA, a. s. *Válečkové tratě*. 2008.
Dostupné z: < <http://www.tranza.cz/cs/dopravni-systemy/valeckove-trate/>>

12 Seznam použité symboliky

Značka	Význam	Jednotka
b	šířka profilu	[mm]
D_{oy}	výsečový deviační moment k ose y	[mm ⁵]
D_{oz}	výsečový deviační moment k ose z	[mm ⁵]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F_i	zatěžující síla	[N]
f_y	mez kluzu	[MPa]
f_{yD}	návrhová pevnost materiálu	[MPa]
h	výška profilu	[mm]
J_y	kvadratický moment průřezu k ose y	[mm ⁴]
$J_{y'}$	transformovaný kvadratický moment průřezu k ose y	[mm ⁴]
J_z	kvadratický moment průřezu k ose z	[mm ⁴]
$J_{z'}$	transformovaný kvadratický moment průřezu k ose z	[mm ⁴]
M_f^i	fiktivní ohybový moment	[N · mm ³]
M_k	krouťící moment	[N · mm]
M_o	ohybový moment	[N · mm]
m	hmotnost	[kg]
N	normálová síla	[N]
r	poloměr ohybu	[mm]
r_{min}	minimální poloměr ohybu	[mm]
S	plocha průřezu	[mm]
T	posouvající síla	[N]
t	tloušťka materiálu	[mm]
U_i	fiktivní síla	[N · mm ²]
u	průhyb	[mm]
y_B	souřadnice pólu v ose y	[mm]
y_M	součinitel spolehlivosti materiálu	[-]
y_S	souřadnice středu ohybu v ose y	[mm]
y_T	souřadnice těžiště v ose y	[mm]
z_B	souřadnice pólu v ose z	[mm]

Značka	Význam	Jednotka
z_s	souřadnice středu ohybu v ose z	[mm]
z_T	souřadnice těžiště v ose z	[mm]
ω	výsečová souřadnice	[mm ²]
γ	střednice prutu	[-]
ψ	příčný průřez prutu	[-]

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

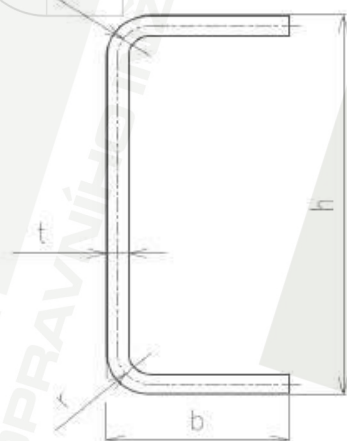
Přílohy

Příloha 1

Formulář pro řešení ohýbaného profilu U

Ohýbaný profil U

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ



b 40
h 80
t 6
r 6

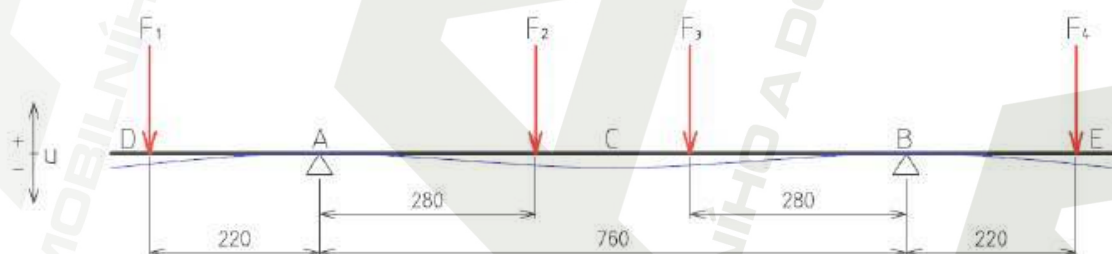
Hmotnost 1 m profilu [kg] **6,685**

Zatížení stav 1 [N]

F1	2950	F2	1475
F3	1475	F4	2950

Průhyb [mm]

uC	0,138456	uD	-0,264873	uE	-0,264873
----	----------	----	-----------	----	-----------

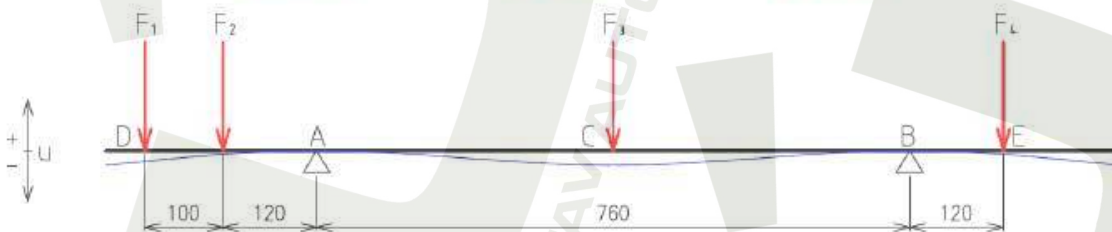


Zatížení stav 2 [N]

F1	737,5	F2	737,5
F3	2950	F4	1475

Průhyb [mm]

uC	-0,071197	uD	0,00585	uE	0,016894
----	-----------	----	---------	----	----------

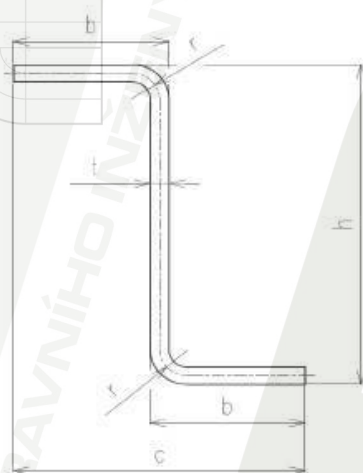


Příloha 2

Formulář pro řešení ohýbaného profilu Z

Ohýbaný profil Z

ISI
FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ



b	40
h	80
t	6
r	9
c	74

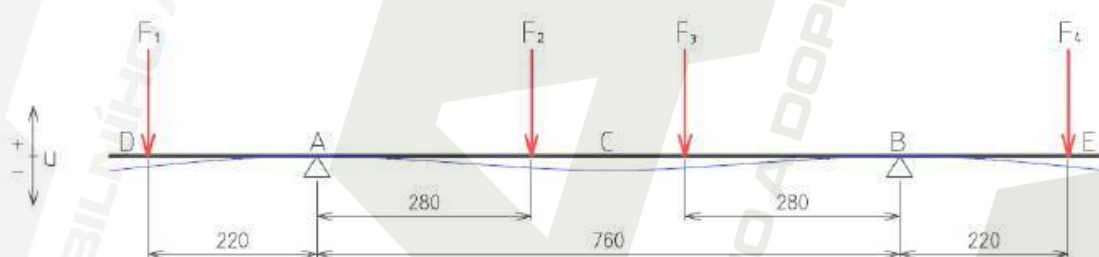
Hmotnost 1 m profilu [kg] **6,565**

Zatížení stav 1 [N]

F1	2950	F2	1475
F3	1475	F4	2950

Průhyb [mm]

uC	0,142187	uD	-0,272009	uE	-0,272009
----	----------	----	-----------	----	-----------

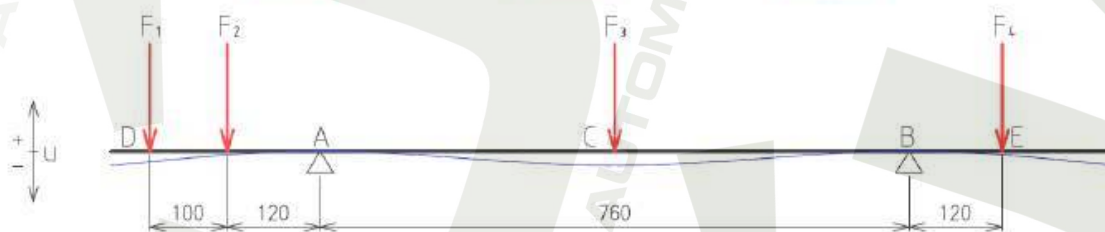


Zatížení stav 2 [N]

F1	737,5	F2	737,5
F3	2950	F4	1475

Průhyb [mm]

uC	-0,073116	uD	0,006008	uE	0,01735
----	-----------	----	----------	----	---------

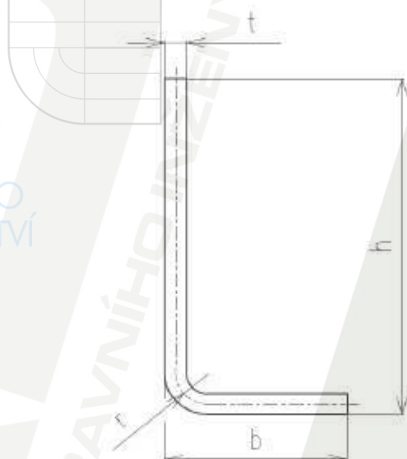


Příloha 3

Formulář pro řešení ohýbaného profilu L

Ohýbaný profil L

ISI
FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ



b 40
h 80
t 6
r 9

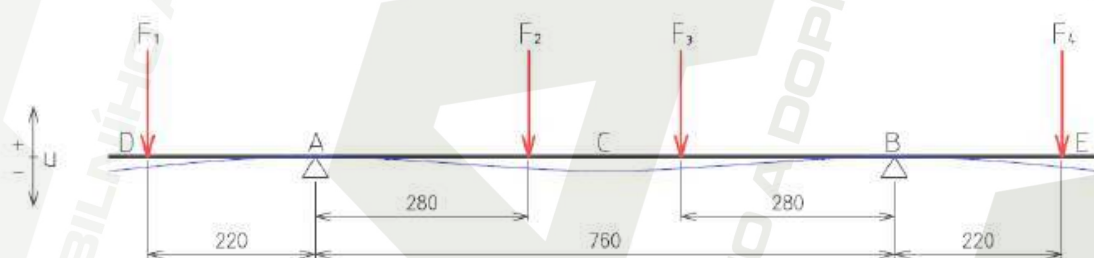
Hmotnost 1 m profilu [kg] 5,154

Zatížení stav 1 [N]

F1	2950	F2	1475
F3	1475	F4	2950

Průhyb [mm]

uC 0,244572 uD -0,467877 uE -0,467877

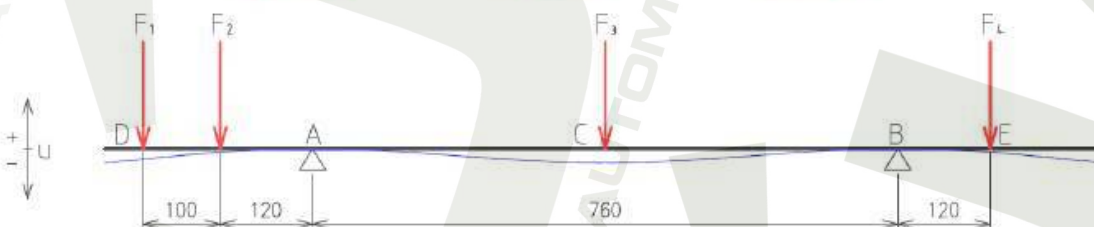


Zatížení stav 2 [N]

F1	737,5	F2	737,5
F3	2950	F4	1475

Průhyb [mm]

uC -0,125764 uD 0,010333 uE 0,029843



Příloha 4

Formulář pro řešení normalizovaných válcovaných profilů

Normalizované válcované profily

I 80	1	IPE 80	0	U 80	0	L 90x60x6	0
I 100	0	IPE 100	0	U 100	0	L 90x60x8	0
I 120	0	IPE 120	0	U 120	0	L 100x75x9	0
I 140	0	IPE 140	0	U 140	0	L 120x80x10	0
I 160	0	IPE 160	0	U 160	0	L 130x65x8	0
I 180	0	IPE 180	0	U 180	0	L 130x65x10	0
I 200	0	IPE 200	0	U 200	0	L 150x75x9	0
						L 180x90x10	0
						L 200x100x14	0

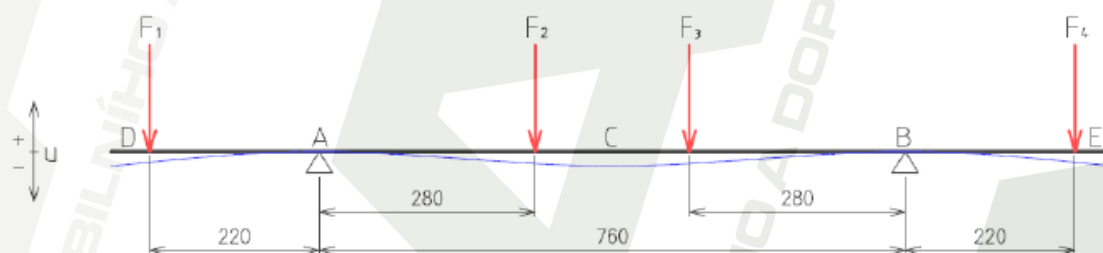
Hmotnost 1 m profilu [kg] **5,940**

Zatížení stav 1 [N]

F1	2950	F2	1475
F3	1475	F4	2950

Průhyb [mm]

uC	0,137322	uD	-0,262704	uE	-0,262704
----	----------	----	-----------	----	-----------

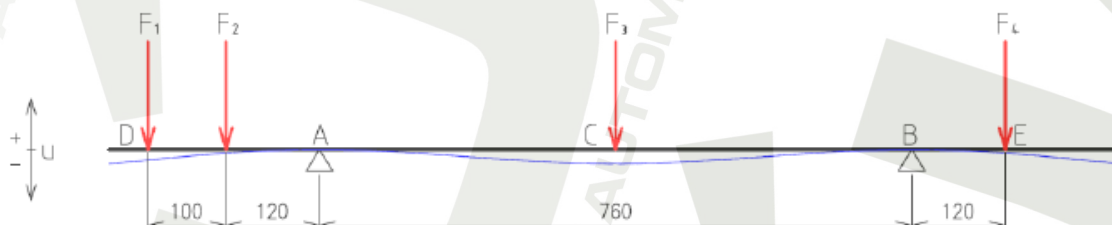


Zatížení stav 2 [N]

F1	737,5	F2	737,5
F3	2950	F4	1475

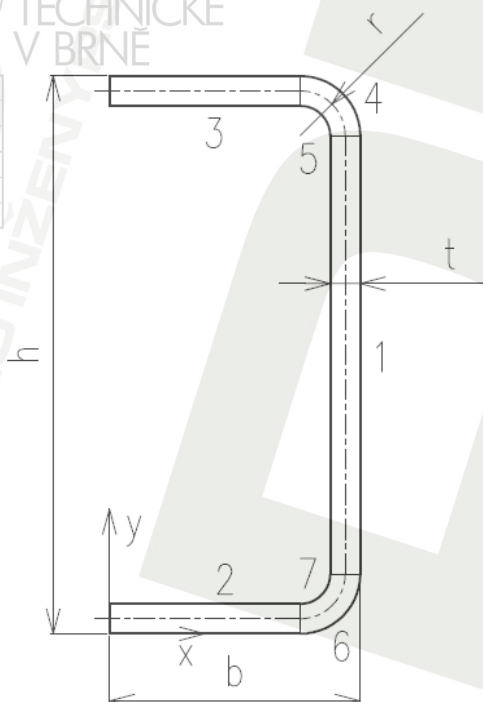
Průhyb [mm]

uC	-0,070614	uD	0,005802	uE	0,016756
----	-----------	----	----------	----	----------



Příloha 5

Výpočet průřezových charakteristik profilu U



Rozměry profilu:

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$h = 80 \text{ mm}$$

$$t = 6 \text{ mm}$$

$$r = 9 \text{ mm}$$

$$r_4 = r + \frac{t}{2} = 9 + \frac{6}{2} = 12$$

$$r_5 = r - \frac{t}{2} = 9 - \frac{6}{2} = 6$$

$$r_6 = r + \frac{t}{2} = 9 + \frac{6}{2} = 12$$

$$r_7 = r - \frac{t}{2} = 9 - \frac{6}{2} = 6$$

Těžiště úseku 1:

$$x_{T1} = b - \frac{t}{2} = 40 - \frac{6}{2} = 37$$

$$y_{T1} = \frac{h}{2} = \frac{80}{2} = 40$$

Plocha úseku 1:

$$S_1 = (h - r_4 - r_6) \cdot t = (80 - 12 - 12) \cdot 6 = 336$$

$$r_4 = 12 \text{ mm}$$

$$r_5 = 6 \text{ mm}$$

$$r_6 = 12 \text{ mm}$$

$$r_7 = 6 \text{ mm}$$

$$x_{T1} = 37 \text{ mm}$$

$$y_{T1} = 40 \text{ mm}$$

$$S_1 = 336 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 2:

$$x_{T2} = \frac{b - r_6}{2} = \frac{40 - 12}{2} = 14$$

$$y_{T2} = \frac{t}{2} = \frac{6}{2} = 3$$

Plocha úseku 2:

$$S_2 = (b - r_6) \cdot t = (40 - 12) \cdot 6 = 168$$

Těžiště úseku 3:

$$x_{T3} = \frac{b - r_4}{2} = \frac{40 - 12}{2} = 14$$

$$y_{T3} = h - \frac{t}{2} = 80 - \frac{6}{2} = 77$$

Plocha úseku 3:

$$S_3 = (b - r_4) \cdot t = (40 - 12) \cdot 6 = 168$$

Těžiště úseku 4:

$$x_{T4} = b - r_4 + \frac{4 \cdot r_4}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 33,093$$

$$y_{T4} = h - r_4 + \frac{4 \cdot r_4}{3 \cdot \pi} = 80 - 12 + \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 73,093$$

Plocha úseku 4:

$$S_4 = \frac{\pi \cdot r_4^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 113,097$$

Těžiště úseku 5:

$$x_{T5} = b - r_4 + \frac{4 \cdot r_5}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 30,546$$

$$y_{T5} = h - r_4 + \frac{4 \cdot r_5}{3 \cdot \pi} = 80 - 12 + \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 70,546$$

Plocha úseku 5:

$$S_5 = \frac{\pi \cdot r_5^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,274$$

$$x_{T2} = 14 \text{ mm}$$

$$y_{T2} = 3 \text{ mm}$$

$$S_2 = 168 \text{ mm}^2$$

$$x_{T3} = 14 \text{ mm}$$

$$y_{T3} = 77 \text{ mm}$$

$$S_3 = 168 \text{ mm}^2$$

$$x_{T4} = 33,093 \text{ mm}$$

$$y_{T4} = 73,093 \text{ mm}$$

$$S_4 = 113,097 \text{ mm}^2$$

$$x_{T5} = 30,546 \text{ mm}$$

$$y_{T5} = 70,546 \text{ mm}$$

$$S_5 = 28,274 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 6:

$$x_{T6} = b - r_6 + \frac{4 \cdot r_6}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 33,093$$

$$x_{T6} = 33,093 \text{ mm}$$

$$y_{T6} = r_6 - \frac{4 \cdot r_6}{3 \cdot \pi} = 12 - \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 6,907$$

$$y_{T6} = 6,907 \text{ mm}$$

Plocha úseku 6:

$$S_6 = \frac{\pi \cdot r_6^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 113,097$$

$$S_6 = 113,097 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 7:

$$x_{T7} = b - r_7 + \frac{4 \cdot r_7}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 30,546$$

$$x_{T7} = 30,546 \text{ mm}$$

$$y_{T7} = r_7 - \frac{4 \cdot r_7}{3 \cdot \pi} = 12 - \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 9,454$$

$$y_{T7} = 9,454 \text{ mm}$$

Plocha úseku 7:

$$S_7 = \frac{\pi \cdot r_7^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,274$$

$$S_7 = 28,274 \text{ mm}^2$$

Těžiště profilu:

$$x_T = \frac{x_{T1} \cdot S_1 + x_{T2} \cdot S_2 + x_{T3} \cdot S_3 + x_{T4} \cdot S_4 - x_{T5} \cdot S_5 + x_{T6} \cdot S_6 - x_{T7} \cdot S_7}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 - S_5 + S_6 - S_7} =$$

$$= \frac{37 \cdot 336 + 14 \cdot 168 + 14 \cdot 168 + 33,093 \cdot 113,097 - 30,546 \cdot 28,274 + 33,093 \cdot 113,097 - 30,546 \cdot 28,274}{336 + 168 + 168 + 113,097 - 28,274 + 113,097 - 28,274} =$$

$$= 27,202$$

$$x_T = 27,202 \text{ mm}$$

$$\text{Profil U je symetrický podle osy x} \Rightarrow y_T = \frac{h}{2} = \frac{80}{2} = 40$$

$$y_T = 40 \text{ mm}$$

Kvadratické momenty průřezů

Pomocné parametry (rozměry jednotlivých úseků):

$$b_1 = t = 6$$

$$h_1 = h - r_4 - r_6 = 80 - 12 - 12 = 56$$

$$b_2 = b - r_6 = 40 - 12 = 28$$

$$h_2 = t = 6$$

$$b_3 = b - r_4 = 40 - 12 = 28$$

$$h_3 = t = 6$$

$$b_1 = 6 \text{ mm}$$

$$h_1 = 56 \text{ mm}$$

$$b_2 = 28 \text{ mm}$$

$$h_2 = 6 \text{ mm}$$

$$b_3 = 28 \text{ mm}$$

$$h_3 = 6 \text{ mm}$$

Osové kvadratické momenty J_x dílčích průřezů:

$$J_{x1} = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{6 \cdot 56^3}{12} = 87808$$

$$J_{x1} = 87808 \text{ mm}^4$$

$$J_{x2} = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{28 \cdot 6^3}{12} = 504$$

$$J_{x2} = 504 \text{ mm}^4$$

$$J_{x3} = \frac{b_3 \cdot h_3^3}{12} = \frac{28 \cdot 6^3}{12} = 504$$

$$J_{x3} = 504 \text{ mm}^4$$

$$J_{x4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_4^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 12^4}{4} = 4071,5$$

$$J_{x4} = 4071,5 \text{ mm}^4$$

$$J_{x5} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_5^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 6^4}{4} = 254,469$$

$$J_{x5} = 254,469 \text{ mm}^4$$

$$J_{x6} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_6^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 12^4}{4} = 4071,5$$

$$J_{x6} = 4071,5 \text{ mm}^4$$

$$J_{x7} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_7^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 6^4}{4} = 254,469$$

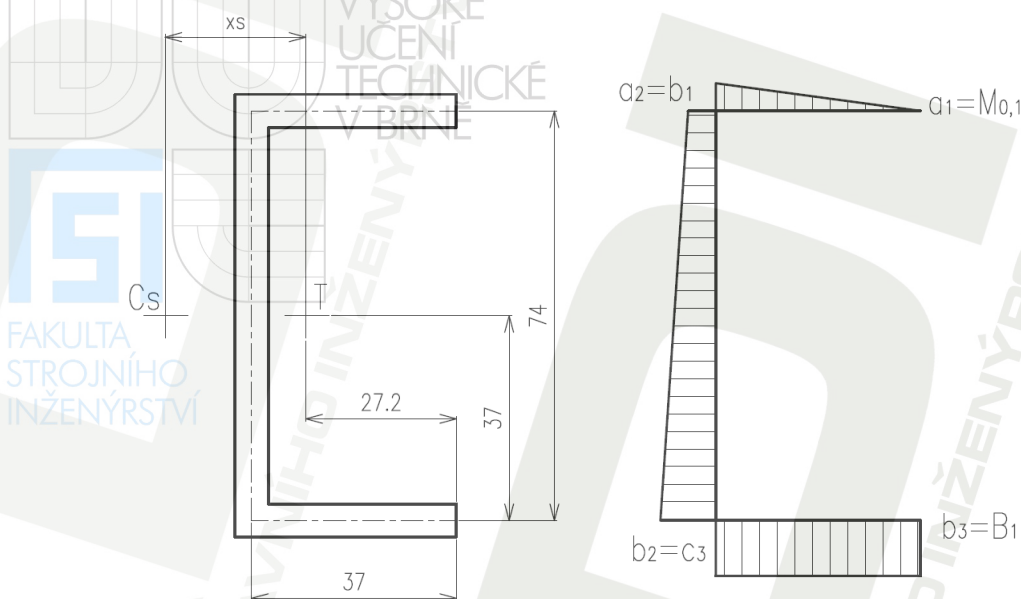
$$J_{x7} = 254,469 \text{ mm}^4$$

Osový kvadratický moment průřezu profilu J_x :

$$\begin{aligned} J_x &= J_{x1} + (y_T - y_{T1})^2 \cdot S_1 + J_{x2} + (y_T - y_{T2})^2 \cdot S_2 + J_{x3} + (y_T - y_{T3})^2 \cdot S_3 - \\ &+ J_{x4} + (y_T - y_{T4})^2 \cdot S_4 - J_{x5} - (y_T - y_{T5})^2 \cdot S_5 + J_{x6} + (y_T - y_{T6})^2 \cdot S_6 - J_{x7} - (y_T - y_{T7})^2 \cdot S_7 = \\ &= 87808 + (40 - 40)^2 \cdot 336 + 504 + (40 - 3)^2 \cdot 168 + 504 + \\ &+ (40 - 77)^2 \cdot 168 + 4071,5 + (40 - 73,093)^2 \cdot 113,097 - 254,469 - (40 - 70,546)^2 \cdot 28,274 + \\ &+ 4071,5 + (40 - 6,907)^2 \cdot 113,097 - 254,469 - (40 - 9,454)^2 \cdot 28,274 = 751384,9 \end{aligned}$$

$$J_x = 751384,9 \text{ mm}^4$$

Výpočet středu ohybu (smyku) profilu U



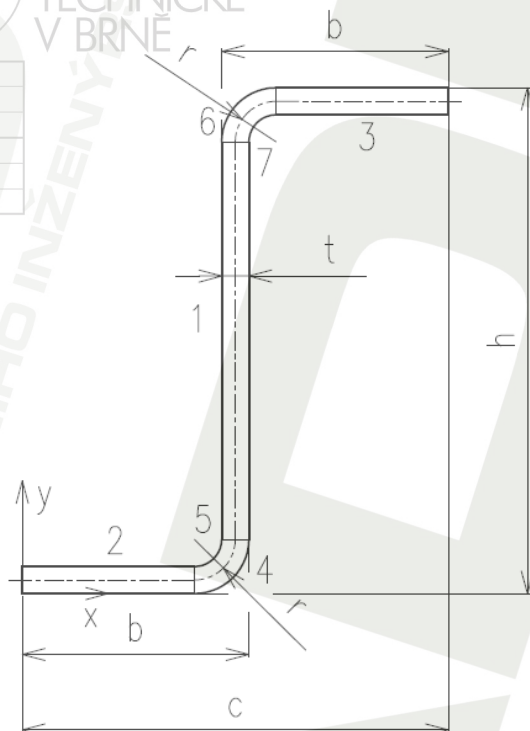
$$\begin{aligned}
 D_{\omega 1x} &= \sum S_i \cdot \left[\frac{(\omega_{b,i} - \omega_{a,i}) \cdot (y_{b,i} - y_{a,i})}{12} + \omega_{c,i} \cdot y_{c,i} \right] = S_1 \cdot \left[\frac{(\omega_{b,1} - \omega_{a,1}) \cdot (y_{b,1} - y_{a,1})}{12} + \omega_{c,1} \cdot y_{c,1} \right] + \\
 &+ S_2 \cdot \left[\frac{(\omega_{b,2} - \omega_{a,2}) \cdot (y_{b,2} - y_{a,2})}{12} + \omega_{c,2} \cdot y_{c,2} \right] + S_3 \cdot \left[\frac{(\omega_{b,3} - \omega_{a,3}) \cdot (y_{b,3} - y_{a,3})}{12} + \omega_{c,3} \cdot y_{c,3} \right] = \\
 &= 222 \cdot \left[\frac{(2738 - 0) \cdot (-37 + 37)}{12} + 1369 \cdot (-37) \right] + 444 \cdot \left[\frac{(5476 - 2738) \cdot (37 + 37)}{12} + 4107 \cdot 0 \right] + \\
 &+ 222 \cdot \left[\frac{(5476 - 5476) \cdot (37 - 37)}{12} + 5476 \cdot 37 \right] = 41231542
 \end{aligned}$$

$$x_s = \left| x_{B1} + \frac{D_{\omega 1x}}{J_x} \right| = \left| -27,2 + \frac{41231542}{751384,9} \right| = 27,67$$

$$x_s = 27,67 \text{ mm}$$

Příloha 6

Výpočet průřezových charakteristik profilu Z



Rozměry profilu:

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$c = 74 \text{ mm}$$

$$h = 80 \text{ mm}$$

$$t = 6 \text{ mm}$$

$$r = 9 \text{ mm}$$

$$r_4 = r + \frac{t}{2} = 9 + \frac{6}{2} = 12$$

$$r_5 = r - \frac{t}{2} = 9 - \frac{6}{2} = 6$$

$$r_6 = r + \frac{t}{2} = 9 + \frac{6}{2} = 12$$

$$r_7 = r - \frac{t}{2} = 9 - \frac{6}{2} = 6$$

Těžiště úseku 1:

$$x_{T1} = b - \frac{t}{2} = 40 - \frac{6}{2} = 37$$

$$y_{T1} = \frac{h}{2} = \frac{80}{2} = 40$$

$$r_4 = 12 \text{ mm}$$

$$r_5 = 6 \text{ mm}$$

$$r_6 = 12 \text{ mm}$$

$$r_7 = 6 \text{ mm}$$

$$x_{T1} = 37 \text{ mm}$$

$$y_{T1} = 40 \text{ mm}$$

Plocha úseku 1:

$$S_1 = (h - r_4 - r_6) \cdot t = (80 - 12 - 12) \cdot 6 = 336$$

$$S_1 = 336 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 2:

$$x_{T2} = \frac{b - r_4}{2} = \frac{40 - 12}{2} = 14$$

$$x_{T2} = 14 \text{ mm}$$

$$y_{T2} = \frac{t}{2} = \frac{6}{2} = 3$$

$$y_{T2} = 3 \text{ mm}$$

Plocha úseku 2:

$$S_2 = (b - r_4) \cdot t = (40 - 12) \cdot 6 = 168$$

$$S_2 = 168 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 3:

$$x_{T3} = c - x_{T2} = 74 - 14 = 60$$

$$x_{T3} = 60 \text{ mm}$$

$$y_{T3} = h - \frac{t}{2} = 80 - \frac{6}{2} = 77$$

$$y_{T3} = 77 \text{ mm}$$

Plocha úseku 3:

$$S_3 = (b - r_6) \cdot t = (40 - 12) \cdot 6 = 168$$

$$S_3 = 168 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 4:

$$x_{T4} = b - r_4 + \frac{4 \cdot r_4}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 33,093$$

$$x_{T4} = 33,093 \text{ mm}$$

$$y_{T4} = r_4 - \frac{4 \cdot r_4}{3 \cdot \pi} = 12 - \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 6,907$$

$$y_{T4} = 6,907 \text{ mm}$$

Plocha úseku 4:

$$S_4 = \frac{\pi \cdot r_4^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 113,097$$

$$S_4 = 113,097 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 5:

$$x_{T5} = b - r_4 + \frac{4 \cdot r_5}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 30,546$$

$$x_{T5} = 30,546 \text{ mm}$$

$$y_{T5} = r_4 - \frac{4 \cdot r_5}{3 \cdot \pi} = 12 - \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 9,454$$

$$y_{T5} = 9,454 \text{ mm}$$

Plocha úseku 5:

$$S_5 = \frac{\pi \cdot r_5^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,274$$

$$S_5 = 28,274 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 6:

$$x_{T6} = b - t + r_6 - \frac{4 \cdot r_6}{3 \cdot \pi} = 40 - 6 + 12 - \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 40,907$$

$$x_{T6} = 40,907 \text{ mm}$$

$$y_{T6} = h - r_6 + \frac{4 \cdot r_6}{3 \cdot \pi} = 80 - 12 + \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 73,093$$

$$y_{T6} = 73,093 \text{ mm}$$

Plocha úseku 6:

$$S_6 = \frac{\pi \cdot r_6^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 113,097$$

$$S_6 = 113,097 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 7:

$$x_{T7} = b - t + r_6 - \frac{4 \cdot r_7}{3 \cdot \pi} = 40 - 6 + 12 - \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 43,454$$

$$x_{T7} = 43,454 \text{ mm}$$

$$y_{T7} = h - r_6 + \frac{4 \cdot r_7}{3 \cdot \pi} = 80 - 12 + \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 70,546$$

$$y_{T7} = 70,546 \text{ mm}$$

Plocha úseku 7:

$$S_7 = \frac{\pi \cdot r_7^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,274$$

$$S_7 = 28,274 \text{ mm}^2$$

Těžiště profilu:

$$\text{Profil Z je symetrický podle osy } y \Rightarrow x_T = \frac{c}{2} = \frac{74}{2} = 37$$

$$x_T = 37 \text{ mm}$$

$$\text{Profil Z je symetrický podle osy } x \Rightarrow y_T = \frac{h}{2} = \frac{80}{2} = 40$$

$$y_T = 40 \text{ mm}$$

Kvadratické momenty průřezů

Pomocné parametry (rozměry jednotlivých úseků):

$$b_1 = t = 6$$

$$h_1 = h - r_4 - r_6 = 80 - 12 - 12 = 56$$

$$b_2 = b - r_4 = 40 - 12 = 28$$

$$h_2 = t = 6$$

$$b_3 = b_2 = 28$$

$$h_3 = t = 6$$

$$b_1 = 6 \text{ mm}$$

$$h_1 = 56 \text{ mm}$$

$$b_2 = 28 \text{ mm}$$

$$h_2 = 6 \text{ mm}$$

$$b_3 = 28 \text{ mm}$$

$$h_3 = 6 \text{ mm}$$

Osový kvadratický moment dílčích průřezů J_x :

$$J_{x1} = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{6 \cdot 56^3}{12} = 87808$$

$$J_{x1} = 87808 \text{ mm}^4$$

$$J_{x2} = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{28 \cdot 6^3}{12} = 504$$

$$J_{x2} = 504 \text{ mm}^4$$

$$J_{x3} = \frac{b_3 \cdot h_3^3}{12} = \frac{28 \cdot 6^3}{12} = 504$$

$$J_{x3} = 504 \text{ mm}^4$$

$$J_{x4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_4^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 12^4}{4} = 4071,5$$

$$J_{x4} = 4071,5 \text{ mm}^4$$

$$J_{x5} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_5^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 6^4}{4} = 254,469$$

$$J_{x5} = 254,469 \text{ mm}^4$$

$$J_{x6} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_6^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 12^4}{4} = 4071,5$$

$$J_{x6} = 4071,5 \text{ mm}^4$$

$$J_{x7} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_7^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 6^4}{4} = 254,469$$

$$J_{x7} = 254,469 \text{ mm}^4$$

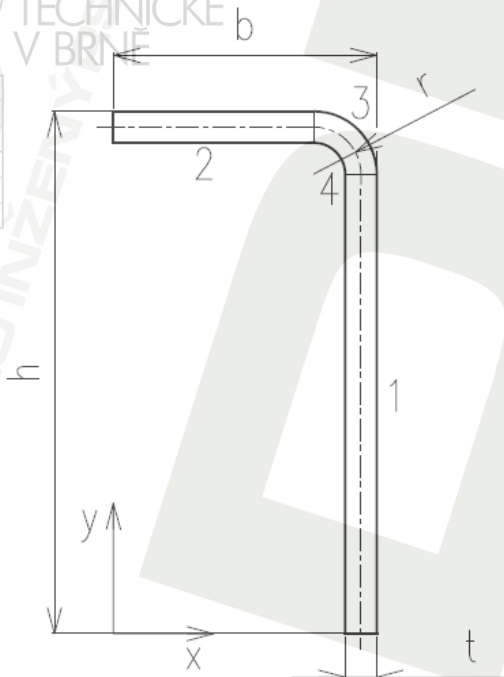
Osový kvadratický moment průřezu profilu J_x :

$$\begin{aligned} J_x &= J_{x1} + (y_T - y_{T1})^2 \cdot S_1 + J_{x2} + (y_T - y_{T2})^2 \cdot S_2 + J_{x3} + (y_T - y_{T3})^2 \cdot S_3 - \\ &+ J_{x4} + (y_T - y_{T4})^2 \cdot S_4 - J_{x5} - (y_T - y_{T5})^2 \cdot S_5 + J_{x6} + (y_T - y_{T6})^2 \cdot S_6 - J_{x7} - (y_T - y_{T7})^2 \cdot S_7 = \\ &= 87808 + (40 - 40)^2 \cdot 336 + 504 + (40 - 3)^2 \cdot 168 + 504 + \\ &+ (40 - 77)^2 \cdot 168 + 4071,5 + (40 - 6,907)^2 \cdot 113,097 - 254,469 - (40 - 9,454)^2 \cdot 28,274 + \\ &+ 4071,5 + (40 - 73,093)^2 \cdot 113,097 - 254,469 - (40 - 70,546)^2 \cdot 28,274 = 751384,9 \end{aligned}$$

$$J_x = 751384,9 \text{ mm}^4$$

Příloha 7

Výpočet průřezových charakteristik profilu L



Rozměry profilu:

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$h = 80 \text{ mm}$$

$$t = 6 \text{ mm}$$

$$r = 9 \text{ mm}$$

$$r_3 = r + \frac{t}{2} = 9 + \frac{6}{2} = 12$$

$$r_3 = 12 \text{ mm}$$

$$r_4 = r - \frac{t}{2} = 9 - \frac{6}{2} = 6$$

$$r_4 = 6 \text{ mm}$$

Těžiště úseku 1:

$$x_{T1} = b - \frac{t}{2} = 40 - \frac{6}{2} = 37$$

$$x_{T1} = 37 \text{ mm}$$

$$y_{T1} = \frac{h - r_3}{2} = \frac{80 - 12}{2} = 34$$

$$y_{T1} = 34 \text{ mm}$$

Plocha úseku 1:

$$S_1 = (h - r_3) \cdot t = (80 - 12) \cdot 6 = 408$$

$$S_1 = 408 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 2:

$$x_{T2} = \frac{b - r_3}{2} = \frac{40 - 12}{2} = 14$$

$$y_{T2} = h - \frac{t}{2} = 80 - \frac{6}{2} = 77$$

$$x_{T2} = 14 \text{ mm}$$

$$y_{T2} = 77 \text{ mm}$$

Plocha úseku 2:

$$S_2 = (b - r_3) \cdot t = (40 - 12) \cdot 6 = 168$$

$$S_2 = 168 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 3:

$$x_{T3} = b - r_3 + \frac{4 \cdot r_3}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 33,093$$

$$x_{T3} = 33,093 \text{ mm}$$

$$y_{T3} = h - r_3 + \frac{4 \cdot r_3}{3 \cdot \pi} = 80 - 12 + \frac{4 \cdot 12}{3 \cdot \pi} = 73,093$$

$$y_{T3} = 73,093 \text{ mm}$$

Plocha úseku 3:

$$S_3 = \frac{\pi \cdot r_3^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 113,097$$

$$S_3 = 113,097 \text{ mm}^2$$

Těžiště úseku 4:

$$x_{T4} = b - r_3 + \frac{4 \cdot r_4}{3 \cdot \pi} = 40 - 12 + \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 30,546$$

$$x_{T4} = 30,546 \text{ mm}$$

$$y_{T4} = h - r_3 + \frac{4 \cdot r_4}{3 \cdot \pi} = 80 - 12 + \frac{4 \cdot 6}{3 \cdot \pi} = 70,546$$

$$y_{T4} = 70,546 \text{ mm}$$

Plocha úseku 4:

$$S_4 = \frac{\pi \cdot r_4^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,274$$

$$S_4 = 28,274 \text{ mm}^2$$

Těžiště profilu:

$$x_T = \frac{x_{T1} \cdot S_1 + x_{T2} \cdot S_2 + x_{T3} \cdot S_3 - x_{T4} \cdot S_4}{S_1 + S_2 + S_3 - S_4} =$$
$$= \frac{37 \cdot 408 + 14 \cdot 168 + 33,093 \cdot 113,097 - 30,546 \cdot 28,274}{408 + 168 + 113,097 - 28,274} = 30,76$$

$$x_T = 30,76 \text{ mm}$$

$$y_T = \frac{y_{T1} \cdot S_1 + y_{T2} \cdot S_2 + y_{T3} \cdot S_3 - y_{T4} \cdot S_4}{S_1 + S_2 + S_3 - S_4} =$$
$$= \frac{37 \cdot 408 + 14 \cdot 168 + 33,093 \cdot 113,097 - 30,546 \cdot 28,274}{408 + 168 + 113,097 - 28,274} = 50,059$$

$$y_T = 50,059 \text{ mm}$$

Kvadratické momenty průřezu

Pomocné parametry (rozměry jednotlivých úseků):

$$b_1 = t = 6$$

$$b_1 = 6 \text{ mm}$$

$$h_1 = h - r_3 = 80 - 12 = 68$$

$$h_1 = 68 \text{ mm}$$

$$b_2 = b - r_3 = 40 - 12 = 28$$

$$b_2 = 28 \text{ mm}$$

$$h_2 = t = 6$$

$$h_2 = 6 \text{ mm}$$

Osové kvadratické momenty J_x dílčích průřezů:

$$J_{x1} = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{6 \cdot 68^3}{12} = 157216$$

$$J_{x1} = 157216 \text{ mm}^4$$

$$J_{x2} = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{28 \cdot 6^3}{12} = 504$$

$$J_{x2} = 504 \text{ mm}^4$$

$$J_{x3} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_3^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 12^4}{4} = 4071,5$$

$$J_{x3} = 4071,5 \text{ mm}^4$$

$$J_{x4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_4^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 6^4}{4} = 254,469$$

$$J_{x4} = 254,469 \text{ mm}^4$$

Osový kvadratický moment průřezu profilu J_x :

$$J_x = J_{x1} + (y_T - y_{T1})^2 \cdot S_1 + J_{x2} + (y_T - y_{T2})^2 \cdot S_2 + J_{x3} + (y_T - y_{T3})^2 \cdot S_3 -$$
$$- J_{x4} - (y_T - y_{T4})^2 \cdot S_4 = 157216 + (50,059 - 34)^2 \cdot 408 + 504 + (50,059 - 77)^2 \cdot 168 +$$
$$+ 4071,5 + (50,059 - 73,093)^2 \cdot 113,097 - 254,469 - (50,059 - 70,546)^2 \cdot 28,274 = 436831,6$$

$$J_x = 436831,6 \text{ mm}^4$$

Osové kvadratické momenty J_y dílčích průřezů:

$$J_{y1} = \frac{b_1^3 \cdot h_1}{12} = \frac{6^3 \cdot 68}{12} = 1224$$

$$J_{y1} = 1224 \text{ mm}^4$$

$$J_{y2} = \frac{b_2^3 \cdot h_2}{12} = \frac{28^3 \cdot 6}{12} = 10980$$

$$J_{y2} = 10980 \text{ mm}^4$$

$$J_{y3} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_3^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 12^4}{4} = 4071,5$$

$$J_{y3} = 4071,5 \text{ mm}^4$$

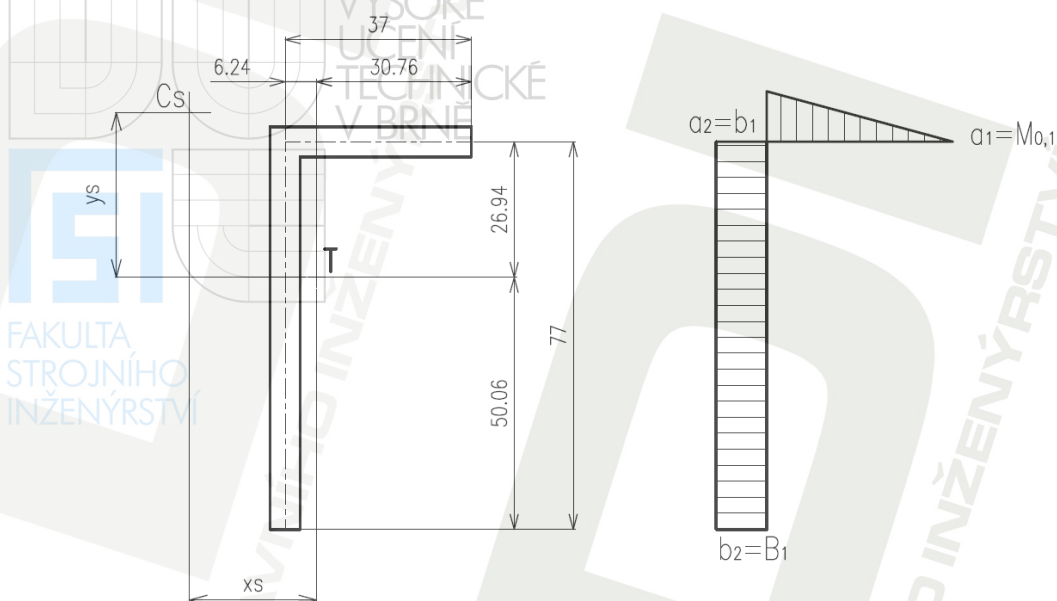
$$J_{y4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot r_4^4}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 6^4}{4} = 254,469$$

$$J_{y4} = 254,469 \text{ mm}^4$$

Osový kvadratický moment průřezu profilu J_y :

$$\begin{aligned} J_y &= J_{y1} + (x_T - x_{T1})^2 \cdot S_1 + J_{y2} + (x_T - x_{T2})^2 \cdot S_2 + J_{y3} + (x_T - x_{T3})^2 \cdot S_3 - \\ &- J_{y4} - (x_T - x_{T4})^2 \cdot S_4 = 1224 + (30,76 - 37)^2 \cdot 408 + 10980 + (30,76 - 14)^2 \cdot 168 + \\ &+ 4071,5 + (30,76 - 33,093)^2 \cdot 113,097 - 254,469 - (30,76 - 30,546)^2 \cdot 28,274 = 79710 \\ J_y &= 79710 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Střed ohybu (smyku) profilu L



$$D_{\omega 1x} = \sum S_i \cdot \left[\frac{(\omega_{b,i} - \omega_{a,i}) \cdot (y_{b,i} - y_{a,i})}{12} + \omega_{c,i} \cdot y_{c,i} \right] = S_1 \cdot \left[\frac{(\omega_{b,1} - \omega_{a,1}) \cdot (y_{b,1} - y_{a,1})}{12} + \omega_{c,1} \cdot y_{c,1} \right] +$$

$$+ S_2 \cdot \left[\frac{(\omega_{b,2} - \omega_{a,2}) \cdot (y_{b,2} - y_{a,2})}{12} + \omega_{c,2} \cdot y_{c,2} \right] = 222 \cdot \left[\frac{(2849 - 0) \cdot (-26,94 + 26,94)}{12} + 1424,5 \cdot (-26,94) \right] +$$

$$+ 462 \cdot \left[\frac{(2849 - 2849) \cdot (50,06 + 26,94)}{12} + 2849 \cdot 11,56 \right] = 6696232,62$$

$$x_s = \left| x_{B1} + \frac{D_{\omega 1x}}{J_x} \right| = \left| 6,24 + \frac{6696232,62}{436831,6,9} \right| = 21,57$$

$$x_s = 21,57 \text{ mm}$$

$$D_{\omega 1y} = \sum S_i \cdot \left[\frac{(\omega_{b,i} - \omega_{a,i}) \cdot (x_{b,i} - x_{a,i})}{12} + \omega_{c,i} \cdot x_{c,i} \right] = S_1 \cdot \left[\frac{(\omega_{b,1} - \omega_{a,1}) \cdot (x_{b,1} - x_{a,1})}{12} + \omega_{c,1} \cdot x_{c,1} \right] +$$

$$+ S_2 \cdot \left[\frac{(\omega_{b,2} - \omega_{a,2}) \cdot (x_{b,2} - x_{a,2})}{12} + \omega_{c,2} \cdot x_{c,2} \right] = 222 \cdot \left[\frac{(2849 - 0) \cdot (-6,24 - 30,76)}{12} + 1424,5 \cdot 12,26 \right] +$$

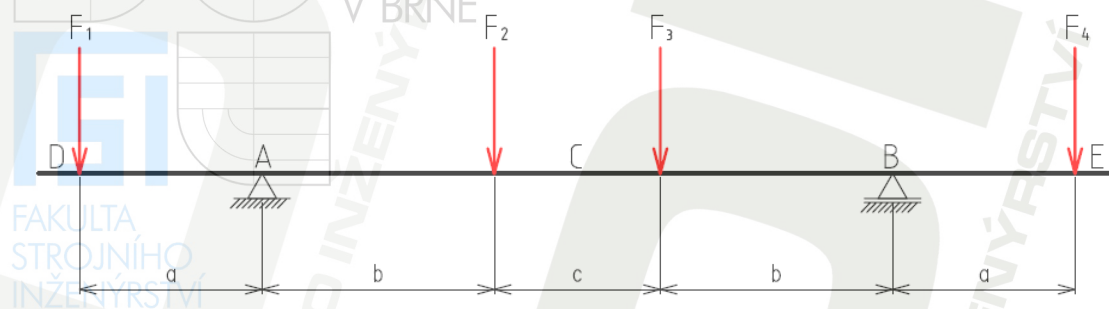
$$+ 462 \cdot \left[\frac{(2849 - 2849) \cdot (-6,24 + 6,24)}{12} + 2849 \cdot (-6,24) \right] = -6286375,48$$

$$y_s = \left| y_{B1} + \frac{D_{\omega 1y}}{J_y} \right| = \left| 50,06 + \frac{-6286375,48}{79710} \right| = 28,81$$

$$y_s = 28,81 \text{ mm}$$

Příloha 8

Výpočet průhybů – zatěžovací stav 1



$$F_1 = 2950 \text{ N}$$

$$a = 220 \text{ mm}$$

$$F_2 = 1475 \text{ N}$$

$$b = 280 \text{ mm}$$

$$F_3 = 1475 \text{ N}$$

$$c = 200 \text{ mm}$$

$$F_4 = 2950 \text{ N}$$

$$l = 760 \text{ mm}$$

$$\sum F_y = 0: F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - R_A - R_B = 0$$

$$\sum M_z = 0: -F_1 \cdot a + F_2 \cdot b + F_3 \cdot (b+c) + F_4 \cdot (2 \cdot b + c + a) - R_B \cdot (2 \cdot b + c) = 0$$

$$R_B = \frac{-F_1 \cdot a + F_2 \cdot b + F_3 \cdot (b+c) + F_4 \cdot (2 \cdot b + c + a)}{(2 \cdot b + c)} =$$

$$= \frac{-2950 \cdot 220 + 1475 \cdot 280 + 1475 \cdot (280 + 200) + 2950 \cdot (2 \cdot 280 + 200 + 220)}{(2 \cdot 280 + 200)} = 4425$$

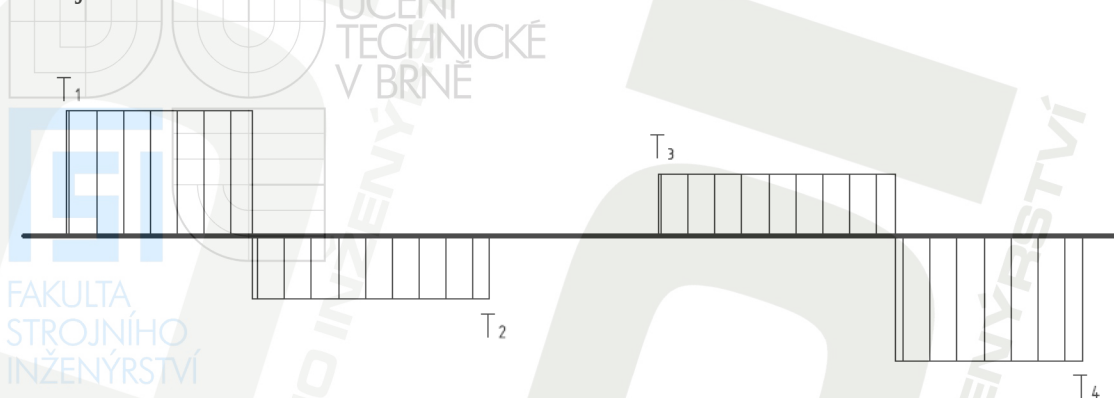
$$R_B = 4425 \text{ N}$$

$$R_A = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - R_B = 2950 + 1475 + 1475 + 2950 - 4425 = 4425$$

$$R_A = 4425 \text{ N}$$

Výsledné vnitřní účinky

Posouvající síla:



$$T_1 = F_1 = 2950$$

$$T_2 = F_1 - R_A = 2950 - 4425 = -1475$$

$$T_3 = F_1 - R_A + F_2 = 2950 - 4425 + 1475 = 0$$

$$T_4 = R_B - F_4 = 4425 - 2950 = 1475$$

$$T_5 = -F_4 = -2950$$

$$T_1 = 2950 \text{ N}$$

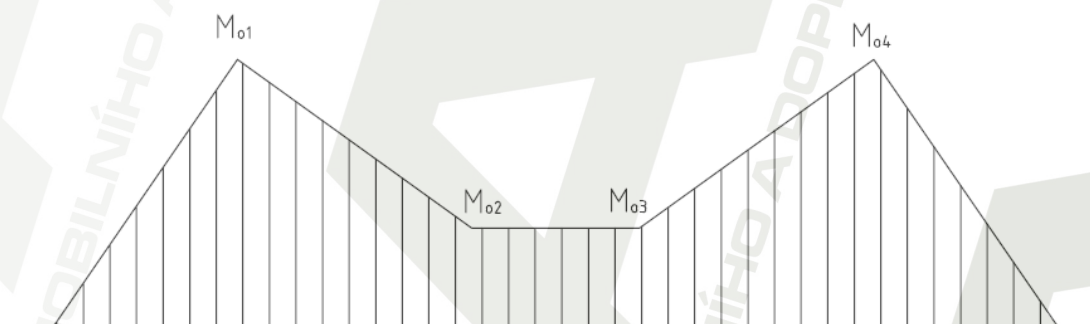
$$T_2 = -1475 \text{ N}$$

$$T_3 = 0 \text{ N}$$

$$T_4 = 1475 \text{ N}$$

$$T_5 = -2950 \text{ N}$$

Ohybový moment:



$$M_{01} = F_1 \cdot a = 2950 \cdot 220 = 649000$$

$$M_{01} = 649000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{02} = F_1 \cdot (a + b) - R_A \cdot b = 2950 \cdot (220 + 280) - 4425 \cdot 280 = 236000$$

$$M_{02} = 236000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{03} = F_1 \cdot (a + b + c) - R_A \cdot (b + c) + F_2 \cdot c =$$

$$= 2950 \cdot (220 + 280 + 200) - 4425 \cdot (280 + 200) + 1475 \cdot 200 = 236000$$

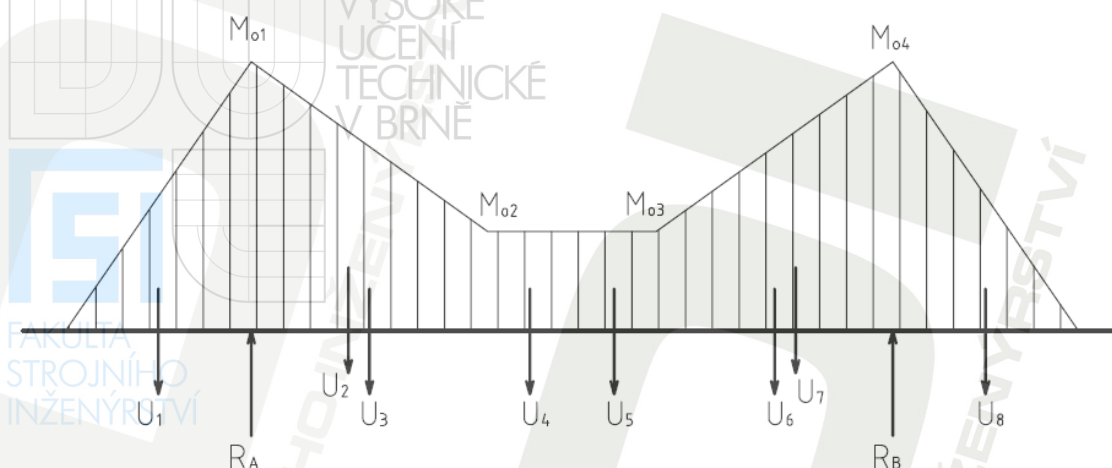
$$M_{03} = 236000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{04} = F_1 \cdot (a + 2 \cdot b + c) - R_A \cdot (2 \cdot b + c) + F_2 \cdot (b + c) + F_2 \cdot b =$$

$$= 2950 \cdot (220 + 2 \cdot 280 + 200) - 4425 \cdot (2 \cdot 280 + 200) + 1475 \cdot (200 + 280) + 1475 \cdot 280 = 649000$$

$$M_{04} = 649000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Fiktivní síly:



$$U_1 = \frac{M_{o1} \cdot a}{2} = \frac{649000 \cdot 220}{2} = 71,36 \cdot 10^6$$

$$U_1 = 71,36 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_2 = \frac{(M_{o1} - M_{o2}) \cdot b}{2} = \frac{(649000 - 236000) \cdot 280}{2} = 57,82 \cdot 10^6$$

$$U_2 = 57,82 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_3 = M_{o2} \cdot b = 236000 \cdot 280 = 66,08 \cdot 10^6$$

$$U_3 = 66,08 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_4 = M_{o2} \cdot \frac{c}{2} = 236000 \cdot \frac{200}{2} = 23,6 \cdot 10^6$$

$$U_4 = 23,6 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_5 = M_{o3} \cdot \frac{c}{2} = 236000 \cdot \frac{200}{2} = 23,6 \cdot 10^6$$

$$U_5 = 23,6 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_6 = M_{o3} \cdot b = 236000 \cdot 280 = 66,08 \cdot 10^6$$

$$U_6 = 66,08 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_7 = \frac{(M_{o4} - M_{o3}) \cdot b}{2} = \frac{(649000 - 236000) \cdot 280}{2} = 57,82 \cdot 10^6$$

$$U_7 = 57,82 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_8 = \frac{M_{o4} \cdot a}{2} = \frac{649000 \cdot 220}{2} = 71,36 \cdot 10^6$$

$$U_8 = 71,36 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 U_B &= \frac{U_7 \cdot \left(2 \cdot b + c - \frac{b}{3}\right) + U_6 \cdot \left(b + c + \frac{b}{2}\right) + U_5 \cdot \left(b + c - \frac{c}{4}\right) + U_4 \cdot \left(b + \frac{c}{4}\right) + U_3 \cdot \frac{b}{2} + U_2 \cdot \frac{b}{3}}{2 \cdot b + c} = \\
 &= \frac{57,82 \cdot 10^6 \cdot \left(2 \cdot 280 + 200 - \frac{280}{3}\right) + 66,08 \cdot 10^6 \cdot \left(280 + 200 + \frac{280}{2}\right)}{2 \cdot 280 + 200} + \\
 &+ \frac{23,6 \cdot 10^6 \cdot \left(280 + 200 - \frac{200}{4}\right) + 23,6 \cdot 10^6 \cdot \left(280 + \frac{200}{4}\right) + 66,08 \cdot 10^6 \cdot \frac{280}{2} + 57,82 \cdot 10^6 \cdot \frac{280}{3}}{2 \cdot 280 + 200} = \\
 &= 147,5 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \\
 U_B &= 147,5 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7 - U_B = 57,82 \cdot 10^6 + 66,08 \cdot 10^6 + 23,6 \cdot 10^6 + \\
 &+ 23,6 \cdot 10^6 + 66,08 \cdot 10^6 + 57,82 \cdot 10^6 - 147,5 \cdot 10^6 = 147,5 \cdot 10^6 \\
 U_A &= 147,5 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Fiktivní ohybové momenty v daných bodech:

$$\begin{aligned}
 M_C &= U_A \cdot \left(b + \frac{c}{2}\right) - U_2 \cdot \left(b + \frac{c}{2} - \frac{b}{3}\right) - U_3 \cdot \left(\frac{b}{2} + \frac{c}{2}\right) - U_4 \cdot \frac{c}{4} = \\
 &= 147,5 \cdot 10^6 \cdot \left(280 + \frac{200}{2}\right) - 57,82 \cdot 10^6 \cdot \left(280 + \frac{200}{2} - \frac{280}{3}\right) - 66,08 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{280}{2} + \frac{200}{2}\right) - \\
 &- 23,6 \cdot 10^6 \cdot \frac{200}{4} = 22,435 \cdot 10^9
 \end{aligned}$$

$$M_C = 22,435 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$$

$$M_D = -U_A \cdot a - U_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot a = 147,5 \cdot 10^6 \cdot 220 - 71,36 \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 220 = -42,92 \cdot 10^9$$

$$M_D = -42,92 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$$

$$M_E = -U_B \cdot a - U_8 \cdot \frac{2}{3} \cdot a = 147,5 \cdot 10^6 \cdot 220 - 71,36 \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 220 = -42,92 \cdot 10^9$$

$$M_E = -42,92 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$$

Průhyby v daných bodech:

$$u_C = \frac{1}{E \cdot J_x} \cdot M_C$$

$$u_D = \frac{1}{E \cdot J_x} \cdot M_D$$

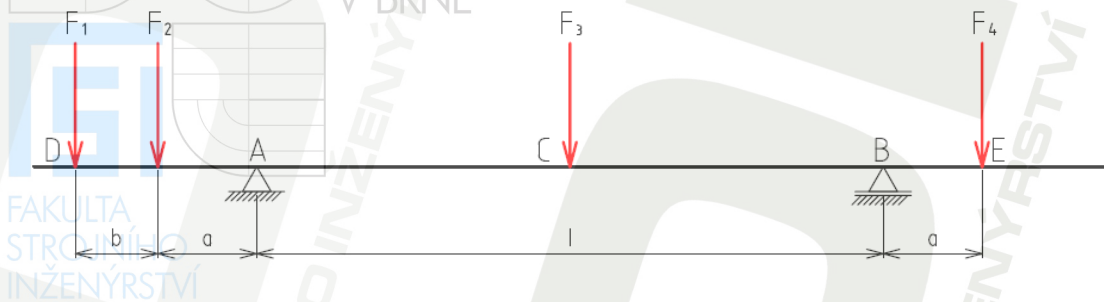
$$u_E = \frac{1}{E \cdot J_x} \cdot M_E$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

J_x dle daného profilu

Příloha 9

Výpočet průhybů – zatěžovací stav 2



$$F_1 = 737,5 \text{ N}$$

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

$$F_2 = 737,5 \text{ N}$$

$$b = 100 \text{ mm}$$

$$F_3 = 2950 \text{ N}$$

$$l = 760 \text{ mm}$$

$$F_4 = 1475 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0: F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - R_A - R_B = 0$$

$$\sum M_z = 0: -F_1 \cdot (a + b) - F_2 \cdot a + F_3 \cdot \frac{l}{2} + F_4 \cdot (a + l) - R_B \cdot l = 0$$

$$R_B = \frac{-F_1 \cdot (a + b) - F_2 \cdot a + F_3 \cdot \frac{l}{2} + F_4 \cdot (a + l)}{l} =$$

$$= \frac{-737,5 \cdot (120 + 100) - 737,5 \cdot 120 + 2950 \cdot \frac{760}{2} + 1475 \cdot (120 + 760)}{760} = 2852,96$$

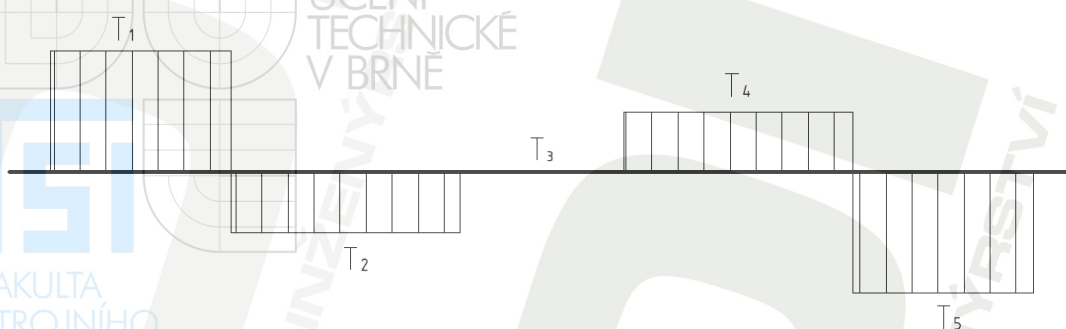
$$R_B = 2852,96 \text{ N}$$

$$R_A = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - R_B = 737,5 + 737,5 + 2950 + 1475 - 2852,96 = 3047,04$$

$$R_A = 3047,04 \text{ N}$$

Výsledné vnitřní účinky

Posouvající síla:



$$T_1 = F_1 = 737,5$$

$$T_1 = 737,5 \text{ N}$$

$$T_2 = F_1 + F_2 = 737,5 + 737,5 = 1475$$

$$T_2 = 1475 \text{ N}$$

$$T_3 = F_1 + F_2 - R_A = 737,5 + 737,5 - 3047,04 = -1572,04$$

$$T_3 = -1572,04 \text{ N}$$

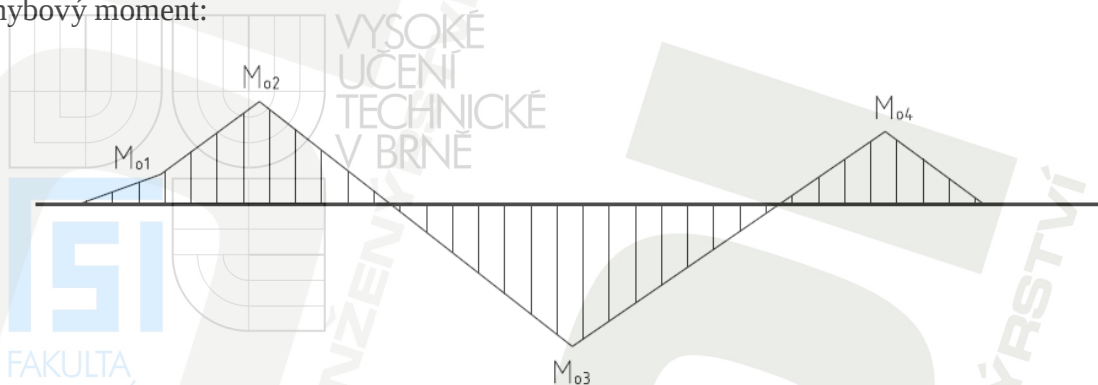
$$T_4 = -F_4 + R_B = -1475 + 2852,96 = 1377,96$$

$$T_4 = 1377,96 \text{ N}$$

$$T_5 = -F_4 = -1475$$

$$T_5 = -1475 \text{ N}$$

Ohybový moment:



$$M_{o1} = F_1 \cdot b = 737,5 \cdot 100 = 73750$$

$$M_{o1} = 73750 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{o2} = F_1 \cdot (a + b) + F_2 \cdot a = 737,5 \cdot (120 + 100) + 737,5 \cdot 120 = 250750$$

$$M_{o2} = 250750 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

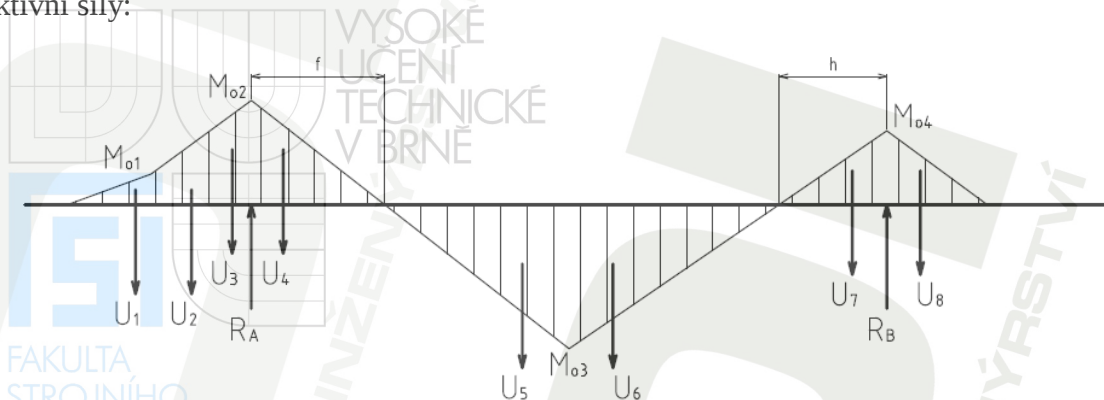
$$\begin{aligned} M_{o3} &= F_1 \cdot \left(a + b + \frac{1}{2} \right) + F_2 \cdot \left(a + \frac{1}{2} \right) - R_A \cdot \frac{1}{2} = \\ &= 737,5 \cdot \left(120 + 110 + \frac{760}{2} \right) + 737,5 \cdot \left(120 + \frac{760}{2} \right) - 3047,04 \cdot \frac{760}{2} = -346625 \end{aligned}$$

$$M_{o3} = -346625 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{o4} = F_4 \cdot a = 1475 \cdot 120 = 177000$$

$$M_{o4} = 177000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Fiktivní síly:



$$\frac{M_{o2}}{f} = \frac{|M_{o3}|}{\frac{1}{2} - f} \Rightarrow f = \frac{M_{o2} \cdot \frac{1}{2}}{M_{o2} + |M_{o3}|} = \frac{250750 \cdot \frac{760}{2}}{250750 + 346625} = 159,5$$

$$f = 159,5 \text{ mm}$$

$$\frac{M_{o4}}{h} = \frac{|M_{o3}|}{\frac{1}{2} - h} \Rightarrow h = \frac{M_{o4} \cdot \frac{1}{2}}{M_{o4} + |M_{o3}|} = \frac{177000 \cdot \frac{760}{2}}{177000 + 346625} = 128,45$$

$$h = 128,45 \text{ mm}$$

$$U_1 = \frac{M_{o1} \cdot b}{2} = \frac{73750 \cdot 100}{2} = 3,68 \cdot 10^6$$

$$U_1 = 3,68 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_2 = M_{o1} \cdot a = 73750 \cdot 120 = 8,85 \cdot 10^6$$

$$U_2 = 8,85 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_3 = \frac{(M_{o2} - M_{o1}) \cdot a}{2} = \frac{(250750 - 73750) \cdot 120}{2} = 1,06 \cdot 10^6$$

$$U_3 = 1,06 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_4 = \frac{M_{o2} \cdot f}{2} = \frac{250750 \cdot 159,5}{2} = 20 \cdot 10^6$$

$$U_4 = 20 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_5 = \frac{M_{o3} \cdot \left(\frac{1}{2} - f\right)}{2} = \frac{346625 \cdot \left(\frac{760}{2} - 159,5\right)}{2} = -38,2 \cdot 10^6$$

$$U_5 = -38,2 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_6 = \frac{M_{o3} \cdot \left(\frac{1}{2} - h\right)}{2} = \frac{-346625 \cdot \left(\frac{760}{2} - 128,45\right)}{2} = -43,6 \cdot 10^6$$

$$U_6 = -43,6 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_7 = \frac{M_{o4} \cdot h}{2} = \frac{177000 \cdot 128,45}{2} = 11,37 \cdot 10^6$$

$$U_7 = 11,37 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_8 = \frac{M_{o4} \cdot a}{2} = \frac{177000 \cdot 120}{2} = 10,62 \cdot 10^6$$

$$U_8 = 10,62 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_B = \frac{U_7 \cdot \left(1 - \frac{h}{3}\right) + U_6 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\frac{1}{2} - h}{3}\right) + U_5 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\frac{1}{2} - f}{3}\right) + U_4 \cdot \frac{f}{3}}{1} =$$

$$= \frac{11,37 \cdot 10^6 \cdot \left(760 - \frac{128,45}{3}\right) - 43,6 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{760}{2} + \frac{\frac{760}{2} - 128,45}{3}\right)}{760} +$$

$$+ \frac{-38,2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{760}{2} - \frac{\frac{760}{2} - 159,5}{3}\right) + 20 \cdot 10^6 \cdot \frac{159,5}{3}}{760} = -29,89 \cdot 10^6$$

$$U_B = -29,89 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$U_A = U_4 + U_5 + U_6 + U_7 - U_B = 20 \cdot 10^6 - 38,2 \cdot 10^6 - 43,6 \cdot 10^6 + 11,37 \cdot 10^6 + 29,89 \cdot 10^6 = -20,55 \cdot 10^6$$

$$U_A = -20,55 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Fiktivní ohybové momenty v daných bodech:

$$M_C = U_A \cdot \frac{1}{2} - U_4 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{f}{3} \right) - U_5 \cdot \frac{\left(\frac{1}{2} - f \right)}{3} =$$

$$= -20,55 \cdot 10^6 \cdot \frac{760}{2} - 20 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{760}{2} - \frac{159,5}{3} \right) - 38,2 \cdot 10^6 \cdot \frac{\left(\frac{760}{2} - 159,5 \right)}{3} =$$

$$= -11,537 \cdot 10^9$$

$$M_C = -11,537 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$$

$$M_D = -U_A \cdot (a + b) - U_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot b - U_2 \cdot \left(b + \frac{a}{2} \right) - U_3 \cdot \left(b + \frac{2 \cdot a}{3} \right) =$$

$$= 20,55 \cdot 10^6 \cdot (120 + 100) - 3,68 \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 100 - 8,85 \cdot 10^6 \cdot \left(100 + \frac{120}{2} \right) - 1,06 \cdot 10^6 \cdot \left(100 + \frac{2 \cdot 120}{3} \right) =$$

$$= 0,948 \cdot 10^9$$

$$M_D = 0,948 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$$

$$M_E = -U_B \cdot a - U_8 \cdot \frac{2}{3} \cdot a = 29,89 \cdot 10^6 \cdot 120 - 10,62 \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 120 = 2,74 \cdot 10^9$$

$$M_E = 2,74 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$$

Průhyby v daných bodech:

$$u_C = \frac{1}{E \cdot J_x} \cdot M_C$$

$$u_D = \frac{1}{E \cdot J_x} \cdot M_D$$

$$u_E = \frac{1}{E \cdot J_x} \cdot M_E$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

J_x dle daného profilu