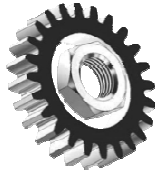




ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



Ústav konstruování a částí strojů

Modulární systém hadicového dopravníku
Modular System Of The Pipe Conveyor

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika
Ročník: 2015/2016
Vedoucí práce: Ing. Pavel Malý

Bc. Martin Havel



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením a dohledem vedoucího diplomové práce a svého odborného konzultanta, použil jsem podklady uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne _____

Podpis autora



Poděkování

Chtěl bych rád poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Malému za připomínky a odborné rady. Také chci poděkovat prof. Ing. Vojtěchovi Dynybylovi Ph.D. za umožnění práce na tomto zajímavém projektu. Dále chci poděkovat svému odbornému konzultantovi Ing. Lukáši Sáblovi a firmě VVV Most spol. s.r.o. a v neposlední řadě chci poděkovat své rodině za podporu po celou dobu studia.



Abstrakt

Práce se zabývá vytvořením 3D parametrického modelu vertikální, horizontální a kombinované zatáčky hadicového dopravníku a základních výpočtů konstrukce. Parametry modelu se mění v závislosti na potřebné kapacitě dopravníku. Celá práce proběhla ve spolupráci se společností VVV Most spol. s.r.o..

Abstract

The thesis deals with the creation of 3D parametric model of vertical, horizontal and combined turn of pipe conveyor and basic design calculations. The model parameters may be varied depending on the required capacity of the conveyor. The whole thesis was carried out in cooperation with VVV Most spol. s.r.o.

Klíčová slova

Hadicový dopravník, pásový dopravník, pásová doprava, parametrický model, zatáčka, ocelová konstrukce

Key words

Pipe conveyor, belt conveyor, telpher, parametric model, turn, steel construction



Obsah

Úvod	10
1. Rešerše přepravy materiálu	11
1.1 Pásová doprava	13
1.1.1 Pásový dopravník	14
1.2 Výrobci pásových dopravníků	19
2. Předrealizace	20
3. Návrh konstrukce	22
3.1 Vertikální zatáčka	22
3.2 Horizontální zatáčka	25
3.3 Kombinovaná zatáčka	26
4. Výpočet a analýza	27
4.1 Statický řešení prutových soustav	27
4.2 Dynamické řešení prutových soustav	28
4.3 Kontrola konstrukce pomocí EC3	28
5. Výpočet 2D konstrukce	31
5.1 Statický výpočet styčnickovou metodou 2D konstrukce	31
5.2 Statický výpočet MKP 2D konstrukce	34
5.3 Statický výpočet RFEM 5 2D konstrukce	36
5.4 Porovnání výsledků jednotlivých výpočtů	38
6. 3D konstrukce	39
6.1 Zatížení větrem	39
6.1.1 Určení síly větru na konstrukci dopravníku	39
6.1.2 Síla větru na pás	45
6.2 Kontrola 3D konstrukce	46



7. Výpočet pohonu dopravníku	48
7.1 Vstupní parametry	48
7.2 Hnací síla, potřebný výkon	49
7.2.1 Hlavní a vedlejší odpory	50
7.2.2 Přídavné odpory	53
7.2.3 Odpor k překonání dopravní výšky.....	55
7.2.4 Potřebný provozní výkon dopravníku.....	55
7.2.5 Přenos obvodové síly na poháněcím bubnu.....	57
8. Technologičnost výroby	60
9. Závěr.....	62
10. Seznam obrázků	63
11. Seznam tabulek	64
12. Seznam příloh.....	64
13. Literatura a zdroje	65



Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotky	Poznámka
G	[N]	Zatížení
g	[m.s ⁻²]	Tíhové zrychlení
m _K	[kg]	Celková hmotnost 1 m konstrukce včetně lávky s rošty, zábradlím a zakrytváním
m _M	[kg]	Hmotnost přepravovaného materiálu na 1 m dopravníku
m _P	[kg]	Hmotnost 1 m dopravního pásu
m _S	[kg]	Hmotnost sněhu na délce 1 m dopravníku
s	[-]	Počet styčníků (počet úseků)
p	[-]	Počet prutů
m	[-]	Počet reakcí
β	[°]	Úhel zatačky
α, ε	[°]	Pomocné úhly pro výpočet
S _i	[N]	Síly v prutech
v _m	[m.s ⁻¹]	Střední rychlost větru
v _{b,0}	[m.s ⁻¹]	Základní rychlost větru
Z	[m]	Výška konstrukce nad terénem
c _{dir}	[-]	Součinitel směru větru
c _{season}	[-]	Součinitel ročního období
c ₀ (Z)	[-]	Součinitel orografie
c _r (Z)	[-]	Součinitel drsnosti terénu
Z ₀	[-]	Parametr drsnosti terénu
k _r	[-]	Součinitel terénu
ρ	[kg.m ⁻³]	Poměrná hmotnost vzduchu
q _b	[N.m ⁻²]	Základní dynamický tlak větru
c _e (z)	[-]	Součinitel expozice
C _{pe, 1 (10)}	[-]	Součinitel tlaku (síly)
w _e	[N.m ⁻²]	Tlak větru působící na vnější povrchy
w _i	[N.m ⁻²]	Tlak větru působící na vnitřní povrchy
c _{pe}	[-]	Součinitel vnějšího tlaku
c _{pi}	[-]	Součinitel vnitřního tlaku
c _s	[-]	Součinitel velikosti konstrukce
c _d	[-]	Dynamický součinitel
c _f	[-]	Součinitel síly
A	[m ²]	Plocha
F _w	[N]	Síla větru
C	[-]	Součinitel odporu
S	[m ²]	Obsah průřezu kolmého ke směru proudění
v	[m.s ⁻¹]	Rychlost větru



b', B	[mm]	Šíře dopravního pásu
$Q'_{(v)}$	[t. h ⁻¹]	Hmotnostní (objemový) dopravní výkon
v'	[ms ⁻¹]	Dopravní rychlost
S'	[mm ²]	Plocha průřezu dopravovaného materiálu
ρ	[t. m ⁻³]	Sypná hmotnost
n	[min ⁻¹]	Otáčky hnacího bubnu
d	[mm]	Průměr hnacího bubnu
F_U	[N]	Celkový pohybový odpor
F_H	[N]	Hlavní odpory
F_V	[N]	Vedlejší odpory
$F_{S1,2}$	[N]	Přídavný odpory
F_{St}	[N]	Odpor k překonání dopravní výšky
$f, (f_1)$	[-]	Globální součinitel tření, při 20°C
k_2	[-]	Teplotní součinitel
L	[m]	Délka dopravníku
g	[m.s ⁻²]	Gravitační zrychlení
$q_{RH, DH}$	[kg.m ⁻¹]	Hmotnost rotujících částí válečků na 1m délky horní (dolní) větve dopravníku
q_B	[kg.m ⁻¹]	Hmotnost 1 m dopravního pásu
q_G	[kg.m ⁻¹]	Hmotnost nákladu na 1m délky pásu
δ	[°]	Úhel sklonu dopravníku
C	[-]	Součinitel C
L_0	[m]	Přídavná délka
p_i	[-]	Udává počet řad horních a dolních válečků
q_i	[kg]	Udává hmotnost válečku v horní a dolní větvi
m_p	[kg. m ⁻²]	Hmotnost 1 m ² dopravního pásu
k_p	[kg/m ² . mm]	Hmotnost 1 m ² vrstvy pásu o tloušťce 1 mm
t	[mm]	Celková tloušťka krycích vrstev pásu
G_p	[kg. m ⁻²]	Hmotnost nosné kostry bez krycích vrstev
F_ε	[N]	Odpor vychýlených bočních válečků
$F_{\check{c}}$	[N]	Odpor čističů pásu
F_a	[N]	Odpor shrnovače pásu
C_ε	[-]	Součinitel Korýtkovosti
μ_0	[-]	Součinitel tření mezi nosnými válečky a pásem
L_ε	[m]	Délka dopravníku s vychýlenými válečky
ε	[°]	Úhel vychýlení osy válečku vzhledem k rovině kolmé k podélné ose pásu
z_c	[1]	Počet čističů pásu
H	[m]	Dopravní výška
P_A	[W]	Potřebný provozní výkon
P_M	[W]	Výkon motoru
η_i, ξ	[-]	Účinnosti, součinitel rozběhu
F_{Umax}	[N]	Maximální obvodová hnací síla plně zatíženého dopravníku
φ	[rad]	Úhel opásání poháněcího bubnu
F_{2min}	[N]	Minimální obvodová síla v dolní větvi
T_i	[N]	Síly v pásu



Úvod

Jeden z mnoha důležitých (zásadních) úkonů lidstva je přeprava, zvedání a přemísťování věcí. Mezi to spadá i přeprava pracovního materiálu kam spadá i přeprava sypkých hmot. Pro přepravu těchto hmot se nejčastěji používají dopravníky. Je mnoho typů, ale nejpoužívanější je pásový dopravník. Jedním z typu pásového dopravníku je takzvaný hadicový pásový dopravník. Tento typ je ve srovnání s klasickým dopravníkem výhodnější v několika případech, především možností použití pro složité trajektorie přepravy a také z ekologického hlediska.

Česká firma VVV Most spol. s.r.o. se zabývá vývojem těchto typů dopravníku. Konstruací pro různé zatáčky, pro které se vytváří parametrické modely. Ty se mohou měnit úpravou vstupních parametrů. Mezi parametry patří: výška konstrukce, šířka konstrukce, délka (přímý díl), úhel zatáčky a poloměr zaoblení (zatáčka). Volba parametrů je dle požadavků zákazníka.

Cíle práce

Cílem mé diplomové práce je nahlédnout do problematiky návrhu hadicového dopravníku. Zejména návrhu parametrického modelu. Hlavním úkolem je vytvořit parametrický model horizontální, vertikální a později kombinované zatáčky hadicového dopravníku ve spolupráci s firmou VVV Most spol. s.r.o., poté provedení statického výpočtu dané 2D soustavy.

Výpočet je poté prověřen také metodou konečných prvků (MKP) v programu Abaqus a RFEM 5. V další části své práce je potřeba provést ověření 3D konstrukce, na níž působí i vliv větru, celou konstrukci je třeba ověřit pomocí eurokódu.

Po konzultaci s firmou a s ohledem na složitost výroby je nutné vymyslet přípravek pro výrobu (svařování) konstrukce zatáček. Součástí práce je výpočtový model pro určení potřebného výkonu dopravníku dle výchozích (zadaných) parametrů, jako je např. přepravované množství, dopravní výška, materiál atd. Posledním úkolem je vytvoření výkresové dokumentace požadovaných parametrických modelů.

1. Rešerše přepravy materiálu

Manipulace s materiálem, jehož významnou částí je právě doprava, je neoddělitelnou součástí prakticky každého technologického procesu. Výrazně ovlivňuje kvalitu, ekonomiku a bezpečnost práce ve strojírenství, stavebnictví, těžebním průmyslu a dalších aktivitách lidské činnosti [1].

Dopravní a manipulační zařízení se dělí dle funkce, konstrukce:

- *Zdvihací zařízení*

Zdvih do malých výšek, ale s velkou silou (zvedáky) – mechanické, pneumatické, hydraulické

Výhody: levné, jednoduché, velké zvedací síly

Nevýhody: malé výšky

Použití: zvedáky aut

Zdvih do velkých výšek (kladkostroje, jeřáby)

Výhody: velké výšky, rychlejší zdvihy, velké zdvihací síly

Nevýhody: složitější, nutná kontrola a údržba, drahé

Použití: stavby, pracovní haly

Vrtulníky



Obr. 1. Věžový jeřáb [4]

- *Zařízení pro plynulou dopravu*

Dopravník (s tažným, nebo bez tažného členu)
Doprava v potrubí
Lanové dráhy



Obr. 2. Pásový dopravník

- *Zařízení pro přerušovanou dopravu*

Kolejová vozidla
Automobilová Doprava (s korbou, s přívěsem, s návěsem)



Obr. 3. Kolejová nákladní doprava [5]

Pásový hadicový dopravník, kterým se zabývám ve své práci, je zařízení určené pro přepravu sypkého materiálu a spadá pod zařízení pro plynulou dopravu materiálu.

1.1 Pásová doprava

Pásová doprava se využívá zejména k dopravě sypkých, a v omezené míře také kusových materiálů. Pásovou dopravu lze dále rozdělit:

- *Těžká (dálková pásová doprava - DPD)*

Využívá se pro velké objemy materiálu, převážně v dolech

- | | |
|-----------|---|
| Výhody: | Pro větší vzdálenosti (v řádech stovek metrů až kilometrů)
Větší šířka dopravníku, Větší dopravní rychlost (nad 3,0 m/s) |
| Nevýhoda: | Údržba
Komplikovaná změna dopravní trasy |



Obr. 4. Těžká pásová doprava [8]

- *Lehká (technologická pásová doprava - TPD)*

- | | |
|-----------|---|
| Výhody: | Různé kombinace tratě mezi jednotlivými (technologickými) pracovišti |
| Nevýhody: | Pro krátké vzdálenosti (v řádech desítek metrů)
Nízká dopravní rychlost (do 3,0 m/s) |



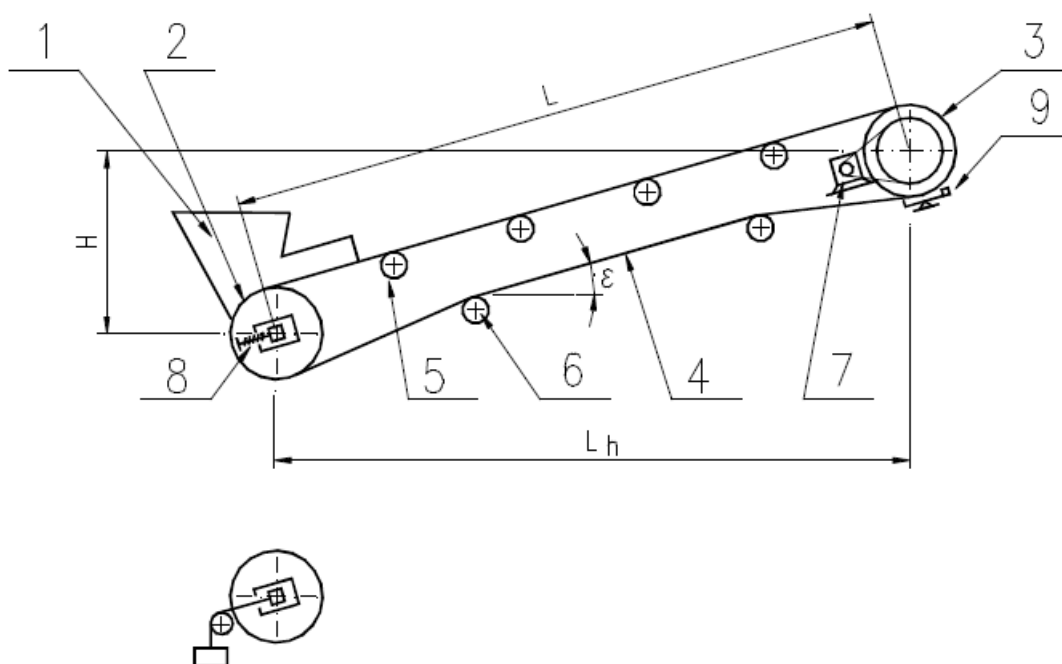
Obr. 5. Lehká pásová doprava [7]

Z globálního hlediska je pásová doprava jedna z nejrozšířenějších způsobů dopravy materiálů, pásové dopravníky jsou využívány k dopravě nerostného bohatství z místa těžby do zpracovatelských technologických celků, a dále uvnitř těchto celků mezi jednotlivými pracovišti. Provozní parametry pásových dopravníků, zejména pak provozní spolehlivost a energetická náročnost dopravy se přímo promítají do nákladů dopravy materiálů, a přímo tak ovlivňují ceny surovin, polotovarů, i konečných výrobků [6].

1.1.1 Pásový dopravník

Pásové dopravníky jsou mechanické dopravníky s tažným a nosným orgánem v podobě nekonečného pásu vedeného a poháněného bubny a podpíraného válečky nebo rovinnou plochou. Jsou vhodné zejména pro dopravu sypkých hmot, ale i kusových materiálů a to ve směru vodorovném, šikmém a ve zvláštních případech i ve směru strmém.

Dopravní vzdálenost, kterou lze překlenout jedním dopravníkem, může být podle tvaru terénu řádově několik km. Delší dopravníky se skládají ze sekcí. Rychlost dopravního pásu může být až 7m/s. Normalizované šířky pásů jsou v rozmezí 400 až 2500 mm [6].



Obr. 6. Schéma pásového dopravníku [6]

Na obr. 6. je schéma pásového dopravníku. Tažným i nosným orgánem je pás 4. Ten je ovinut kolem napínacího bubnu 2, hnacího bubnu 3 a přes sady válečků nosných 5 a spodních válečků 6, které podpírají pás tak, aby vznikl potřebný tvar. Hnací buben je poháněn pohonem 7, který je realizován nejčastěji převodovkou s elektromotorem. Buben 8 se napíná pomocí tlačného, tažného napínání, napínací smyčky nebo napínacího vozíku.

Materiál se nasypkou 1 přemísťuje po délce L , ve směru horizontálním v délce L_h a ve směru vertikálním do výšky H . K čištění pásu slouží stěrač (spodní, čelní) 9. Materiál po převýšení opouští pás. Nosné válečky mohou být k sobě různě orientovány, nejčastěji se používá tříválečkové nebo dvouválečkové stolice. Hlavními parametry dopravníku jsou dopravované množství specifikované dále jako objemový průtok Q_v s rozměrem $[m^3/s]$, nebo hmotnostní průtok Q_m s rozměrem $[kg/s]$. Rychlost pásu v bývá nejčastěji 0,25 až 5 m/s.

Dopravní pásy jsou nejčastěji:

- pryžové s textilní vložkou (pro technologickou pásovou dopravu)
- pryžové s ocelovým kordem (pro těžkou dálkovou pásovou dopravu)

Bubny jsou většinou svařované součásti. Hnací mohou být opatřeny na povrchu pryžovým nebo keramickým materiálem pro zvětšení součinitele tření. Podpěrné válečky musí mít dobře vyřešené těsnění hřídele proti vnikání nečistot. Ložiska v nich jsou většinou kuličková. Válečky bývají vsazeny do rámu (stolice) svými čepy, které jsou na těchto místech opatřeny frézovanými plochami. Čepy jsou pouze nasazeny do drážek, jejich polohu jistí tíha neseného válečku a pásu. Vzdálenost stolic od sebe bývá 0,5 až 1,5 m a pro nezatíženou větev může být dvojnásobná.

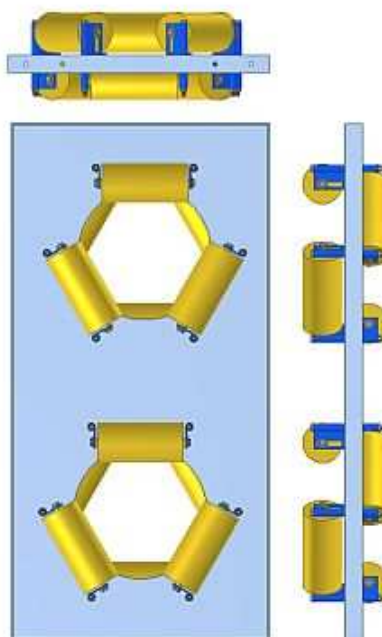
Součásti dopravníku jsou uloženy na nosné konstrukci. Ta zachycuje statické síly od tíhy dopravovaného materiálu, pásu i vlastní konstrukce, dále dynamické síly vyvolané podélným i příčným kmitáním pásu, přiváděním materiálu na pás a nevyváženými hmotami bubnů a válečků apod. Výsledné síly od tahů v pásu na hnacích a vratných bubnech se u větších dopravníků zpravidla zachycují v ocelové konstrukci poháněcí a vratné stanice, které tvoří samostatné části [6].

Hadicový dopravník

Jedná se o pásový dopravník s konstrukční úpravou (Obr. 7). Jejich konstrukční vlastnosti zásadně ovlivňují celkovou efektivitu a bezpečnost provozu. Mezi společné prvky patří použití gumového dopravního pásu jako tažného a nosného elementu a použití dopravních válečků jako podpěrných prvků v celé délce dopravní cesty. Zásadním rozdílem je dopravní profil [9].

Uzavřením profilu získáváme několik výhod oproti klasickému pásovému dopravníku:

- Nedochozí k vysypání materiálu podél trasy a tím ke ztrátám samotného materiálu
- Nedochozí k nabalování materiálu na válečky
- Na dopravníku lze realizovat oblouky vertikální i horizontální (a to s poměrně malým poloměrem)
- Dopravník lze se sklonem téměř o 50% větším, než je běžně přístupný sklon klasického dopravníku
- Dpravovaný materiál je chráněn před vnějšími vlivy a prašnost spojená je omezena na minimum



Obr. 7. Průřez hadicovým dopravníkem [10]



Obr. 8. Hadicový dopravník [10]

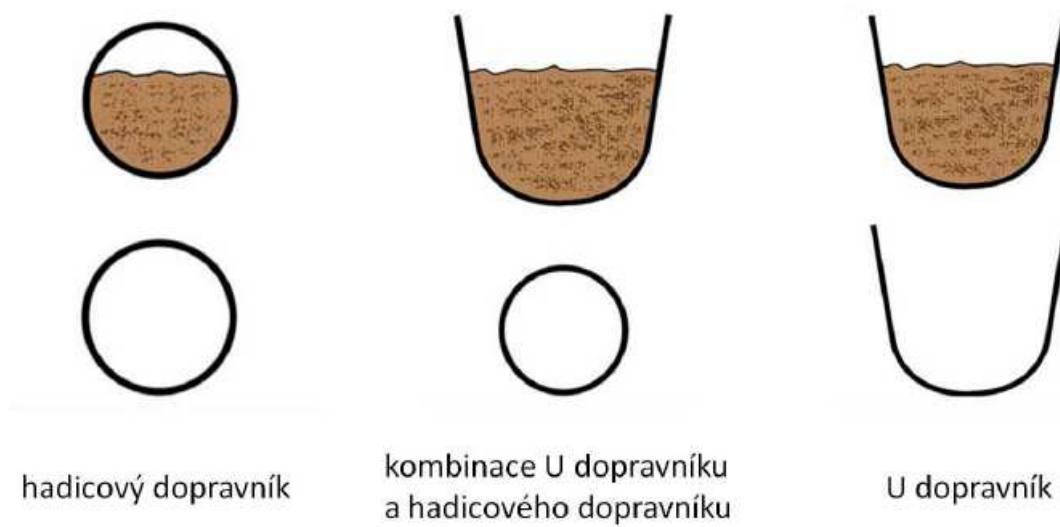
Mezi nevýhody lze zmínit např. vyšší energetickou náročnost, potřebu širšího pásu, citlivost na přetížení, složitost oprav, častější údržbu nebo problém přepravy horkého materiálu. Velmi komplikované je také nastavení válečkových stolic, kdy může docházet k přetáčení pásu.

U-dopravník

Tento dopravník je kombinací klasického pásové a hadicového dopravníku. Kombinuje výhody obou typů. Dopravník si ponechává výhody hadicového dopravníku, jimiž je možná realizace vertikální a horizontální zatáčky a tím redukuje počet přesypů na dopravní trase. Výhoda otevřeného profilu jako u klasického pásového dopravníku nám umožňuje větší dopravní výkon. Není potřeba tak širokého pásu.



Obr. 9. U-dopravník [12]



Obr. 10. Profily daných typů dopravníků [11]



1.2 Výrobci pásových dopravníků

VVV Most spol. s.r.o.

Firma VVV MOST spol. s r.o. byla založena v roce 1990. Počáteční aktivity byly zaměřeny převážně na expertizy týkající se problematiky dopravních pásů. Během následujících let byla činnost firmy postupně rozšiřována a v současné době nabízí komplexní služby v oblasti projekce, výroby a údržby pásových dopravníků a dodávky zařízení na třídění kameniva, šterků a písků.

Firma zajišťuje 24 hodinový servis, který umožňuje okamžitě reagovat na havarijní situace u zákazníků. V posledních pěti letech investuje firma VVV MOST ročně 2-3 miliony Kč do oblasti vývoje a výzkumu dopravníků, do vývoje speciálních měřících přístrojů a do nových technologií údržby.

Na českém trhu má společnost obchodní zastoupení 15-ti předních světových firem, které vyrábí náhradní díly a příslušenství pro pásové dopravníky. Společnost zaměstnává 100 zaměstnanců a průměrný roční obrat činí 160 až 180 miliónů Kč [11].

BLUETECH s.r.o.

Pásové dopravníky se ve firmě vyrábí nepřetržitě od roku 1967. Dopravníky byly určeny především pro zemědělské provozy, případně pro lehký průmysl. Strojní a traktorová stanice národní podnik byl privatizován v počátku devadesátých let 20. století. Název Bluetech si firma nese od roku 2006. Na 6ha pozemku zůstalo už jen málo z původních staveb. Dnes je zde moderní firma, která nabízí vysokou kvalitu výroby v tomto strojírenském oboru [13].

TEDO s.r.o.

Historie koncernu Schenck Process sahá až do roku 1881 kdy Carl Schenck otevřel v německém Darmstadtu továrnu na váhy. Společnost Schenck založila stálé zastoupení v Praze v roce 1990 a od té doby pobočka postupně rozšiřovala svou působnost na českém trhu i v rámci koncernu. V současné době pobočka vyvíjí a dodává na trh výrobky vlastní konstrukce a zastává pozici „Center of Competence“ pro alternativní paliva a mechanickou dopravu sypaných hmot v rámci celého koncernu Schenck Process.

Součástí rostoucího počtu aktivit byla i akvizice české společnosti TEDO v roce 2009. Společnost Schenck Process s.r.o. tak rozšířila portfolio svých produktů o speciální pásové dopravníky, jako jsou hadicové dopravníky či pásové elevátory typu Flexowell® [12].

JAKOS s.r.o.

Tesasing s.r.o.



2. Předrealizace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem horizontální, vertikální a kombinované zatáčky. Je to dáno prostředím (terénem), v němž bude daný dopravník nainstalován, které má různý profil a různé překážky.

Při prvním návrhu dopravníku je důležité určit trasu, kterou povede. Stanoví se jednoduchý model, abychom věděli, jaký bude mít tvar a délku. Z tohoto stanovení si lze určit, z kolika a z jakých dílů bude celková trasa sestavena.

Před vlastním detailním návrhem dopravníku je vhodné provést předrealizační etapu, která může být použita pro prezentování řešení zákazníkovi (objednavateli) např. při výběrovém řízení.

Hlavními prvky jsou:

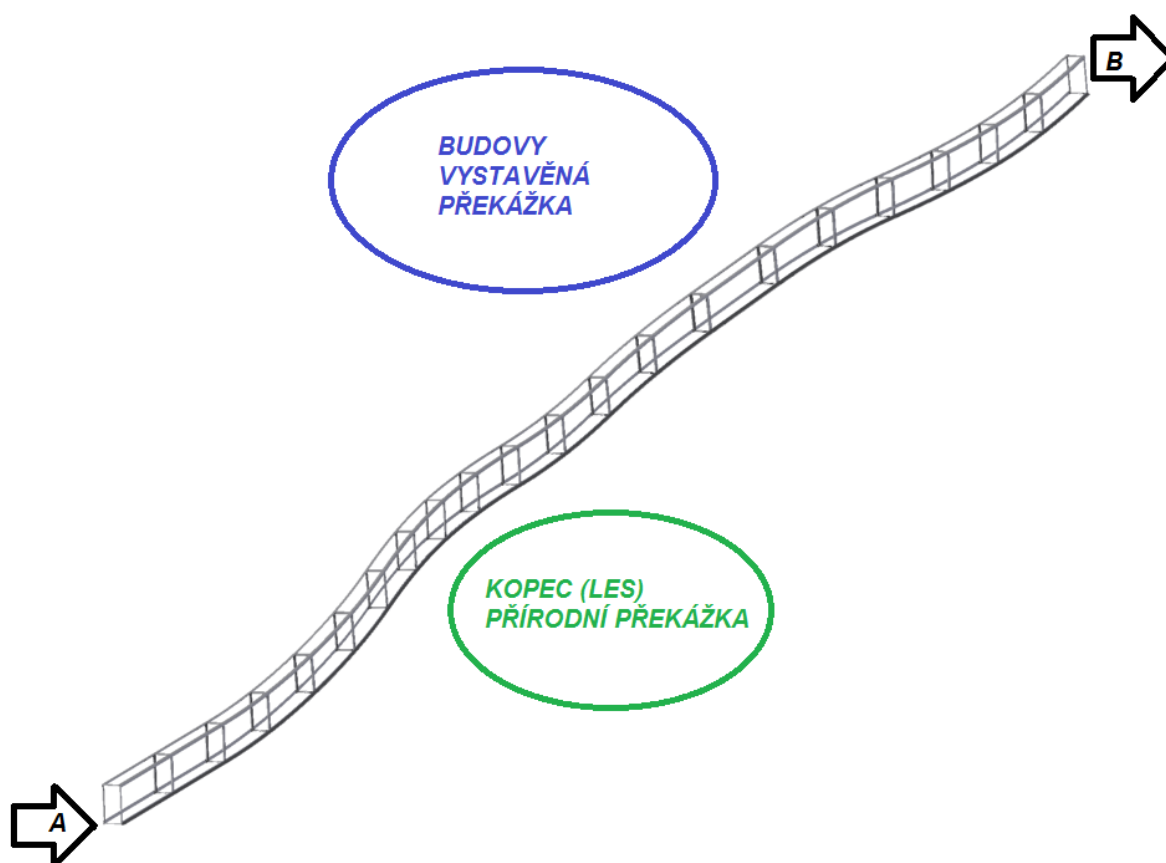
- přímý díl
- vertikální zatáčka (dolu, nahoru)
- horizontální zatáčka (vlevo, vpravo)
- kombinovaná zatáčka

Trasu dopravníku navrhujeme tak, abychom pokud možno došli z bodu A do bodu B co nejjednodušeji, nejrychleji a s co nejmenšími ztrátami (Obr. 11). Jelikož má krajina a terén jiné vlastnosti a profil, musíme dopravník sestavit z více konstrukčních částí. Další překážkou při návrhu je také infrastruktura podniku, či v místě kde už nějaká trať vede, musí tento fakt brát v potaz a naši trajektorii tomu upravit.

Tento návrh je uskutečněn, aby bylo při náhlé změně (změna krajiny, přání zákazníka, ...) co nejjednodušší úprava trati. Celkový návrh je parametrický a lze snadno měnit základní parametry dle potřeby.

- výška dopravníku
- šířka dopravníku
- délka přímého dílu
- poloměr zatáčky
- úhel zatáčky
- úhel sklonu zatáčky

Jakmile je prvotní zjednodušený návrh trajektorie navržen, lze přejít k detailnímu návrhu dílčích prvků dopravníku (viz. Kapitola 3.).



Obr. 11. Předběžný návrh tratě

3. Návrh konstrukce

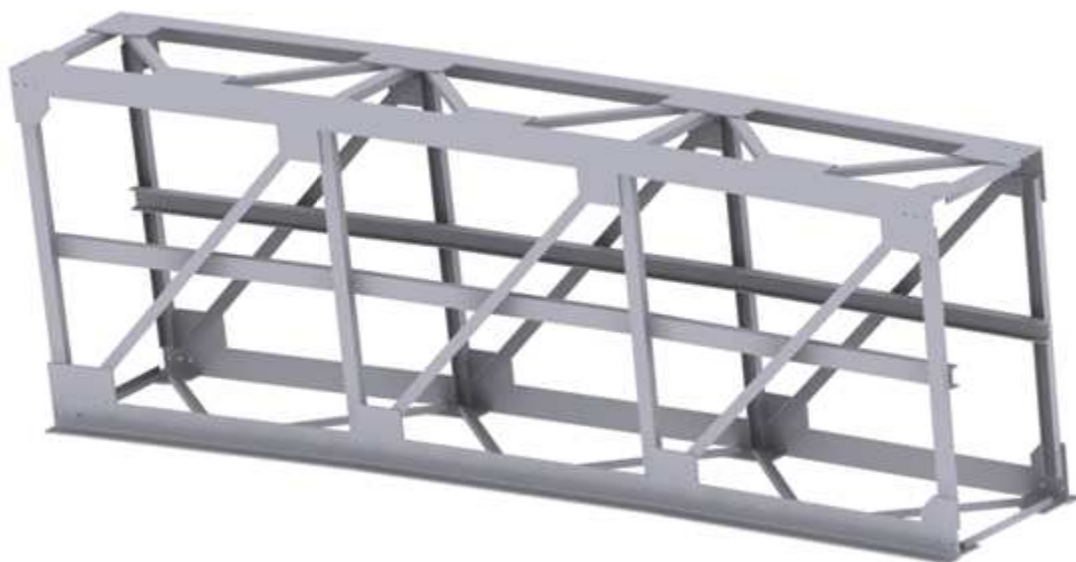
3.1 Vertikální zatáčka

Pro návrh vertikální zatáčky hadicového dopravníku vycházím z modelu horizontální zatáčky, který jsem měl od svého odborného konzultanta Lukáše Sábla. Celá sestava vertikální zatáčky je parametrická a lze měnit potřebné rozměry v Excel souboru parametry.xls. Jelikož jde o zatáčku, mým úkolem bylo vytvořit modely pro oba směry (nahoru a dolů). Modely vytvářím v programu AUTODESK INVENTOR 9.

Prvním krokem návrhu je vytvoření parametrické geometrie pro různé díly. Hlavními díly jsou konstrukce N a T, kde N a T konstrukce se liší pouze změnou smyslu příčných prutů. To je proto, aby při spojení jednotlivých konstrukcí a vytvoření dvojnásobného pole byla zvýšená tuhost celkové konstrukce (Obr. 15.). Jsou to dva díly celkové konstrukce zatáčky.

Jakmile je vytvořena parametrická geometrie, lze na ní vazbit profily prutů ve *Frame generator*. Tímto vytvořím základní rám (Frame) konstrukce. Aby se dala reálně konstrukce spojit, musí se pruty zkrátit a vazbit na styčnickové plechy. Celá konstrukce je svařenec. Pro dokončení rámu se do horních a dolních prutů vyvrtaří díry pro spojení N a T konstrukce lašnými.

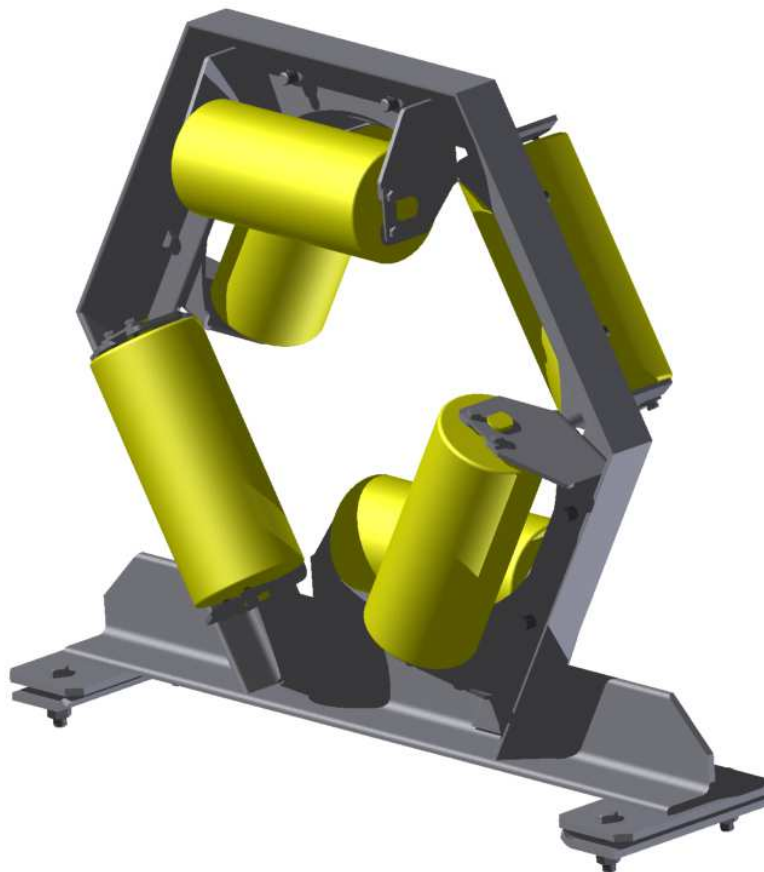
Konstrukce je sestavena z profilů. Horní podélné pruty jsou z L150x90x10, dolní podélné L120x120x10. Svislé a horní příčky, kromě krajních jsou U80. Všechny zbývající pruty jsou L60x40x6.



Obr. 12. Konstrukce hadicového dopravníku – vertikální zatáčka směrem dolů

Po vytvoření hlavních částí konstrukce a spojení šroubovými spoje je potřeba vytvořit lávku se zábradlím. Ty se k nosné konstrukci připevňují pomocí šroubových spojů. Lávka se zábradlím jsou též parametrické, aby docházelo ke změně rozměrů jako u konstrukce při úpravě parametrů.

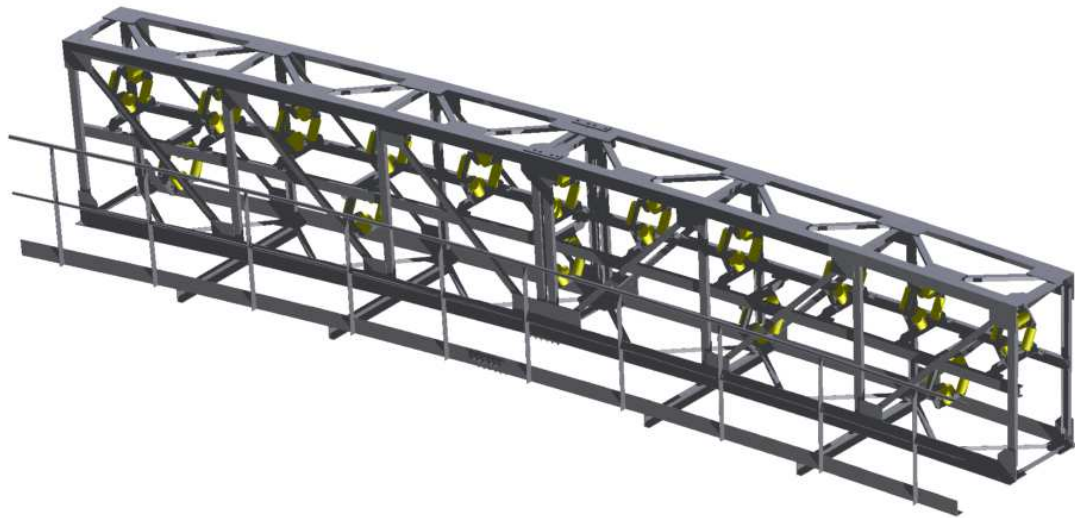
Nakonec se do sestavy konstrukce připevňují válečkové stolice. Pro horní větev jsou stolice od sebe vzdálené po 1 metru, jelikož je horní větev zatížená. Do dolní odlehčené větve se dávají stolice po 3 metrech.



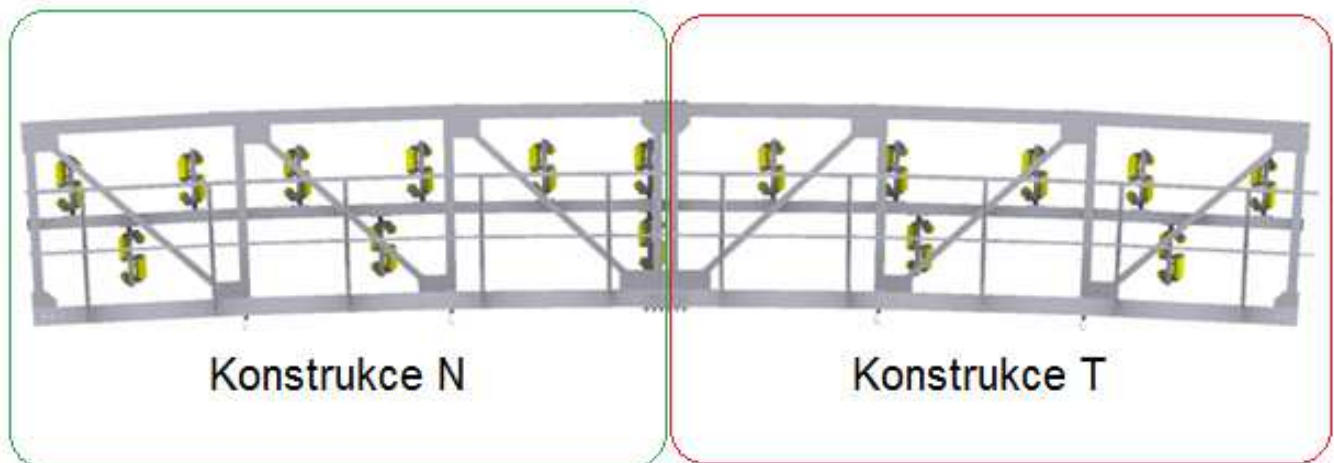
Obr. 13. Válečková stolice hadicového dopravníku

Výchozí parametry vertikální (horizontální) zatáčky:

Poloměr zaoblění:	80 metrů
Úhel zatáčky:	3,6°
Výška konstrukce:	1700 mm
Šířka konstrukce:	720 mm



Obr. 14. Vertikální zatáčka směrem dolů

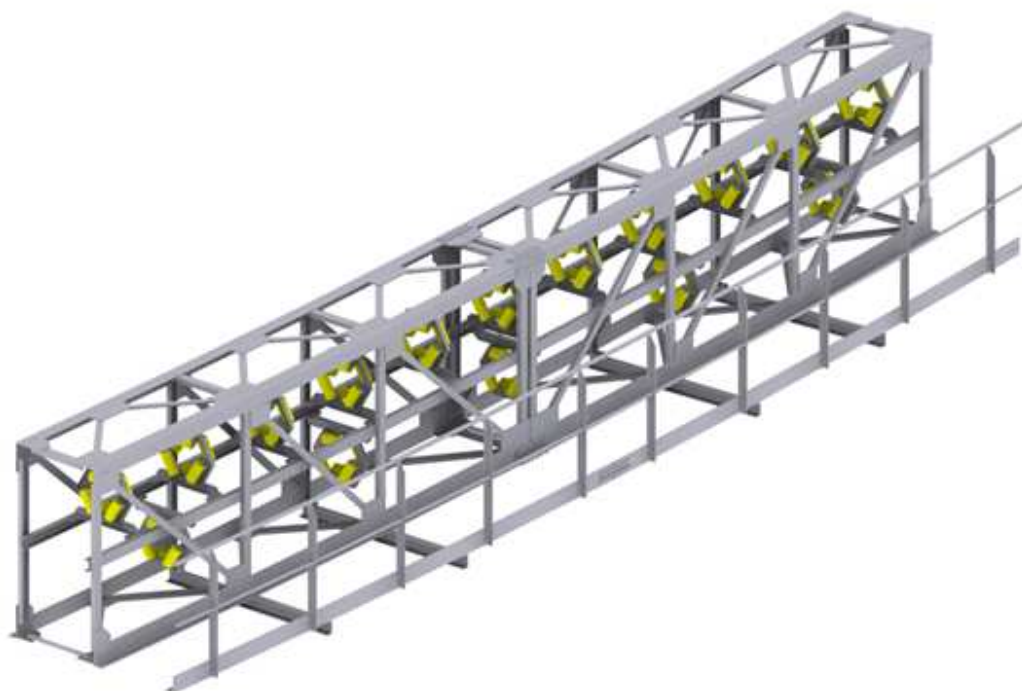


Obr. 15. Vertikální zatáčka směrem dolů – pohled ze strany

3.2 Horizontální zatáčka

Po návrhu vertikální zatáčky bylo mým dalším úkolem vytvořit horizontální zatáčku. Modifikoval jsem již vyrobený model horizontální zatáčky s obloukem doleva do opačného směru (doprava).

Návrh této zatáčky je obdobný jako u návrhu vertikální zatáčky, hlavním rozdílem je, že tato zatáčka je ve vodorovné rovině. Prvním krokem je opět vytvoření parametrické kostry (náčrtu), na kterou se přiřadí dané profily prutů v generátoru. Dále se upraví a do sestavy se přidají styčnickové plechy. Poté se obdobně navrhne i lávka se zábradlím. Profily prutů a výchozí parametry jsou stejné.



Obr. 16. Horizontální zatáčka směrem doprava



Obr. 17. Horizontální zatáčka směrem doprava – pohled ze shora

3.3 Kombinovaná zatáčka

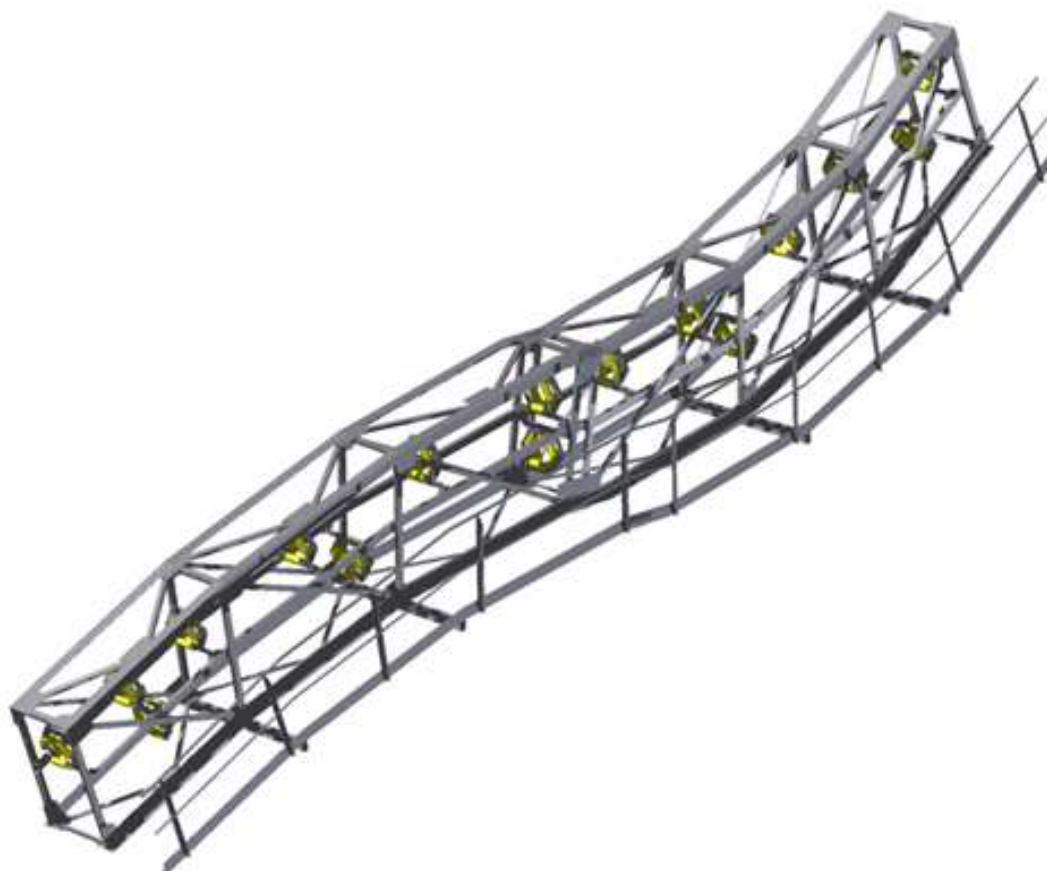
Vertikální a horizontální zatáčka jsou zatáčky pouze v jedné rovině. Horizontální pokud chceme dopravník, aby směřoval vlevo či vpravo a vertikální směrem dolů a nahoru. Oproti tomu kombinovaná zatáčka je kombinací např. nahoru (dolu) – doleva (doprava).

Při návrhu této zatáčky vznikal problém, že konstrukce se musí zakřivovat podle poloměru zatáčky a také stoupat o nový parametr (úhel zdvihu), který je zvolen s ohledem na okrajové podmínky cca 30° .

Při návrhu jsem proto musel brát v potaz, že se celá kostra se bude zakřivovat ve dvou směrech. Kostru jsem vytvořil pomocí rovin, které jsem natáčel jak o úhel zatáčky tak i úhel zdvihu. Po vytvoření kostry už následoval stejný postup jako u předchozích zatáček. Volil jsem stejné profily. Nevýhoda této konstrukce je, že se jedná o složitou geometrii, a proto je parametričnost konstrukce omezená. To znamená, že při velké změně parametrů, řádově u poloměru v desítkách metrů a úhlů o cca $2 - 3^\circ$ může dojít k chybám v geometrii, které musí být řešeny individuálně.

Výchozí parametry kombinované zatáčky:

Poloměr zaoblání:	80 metrů
Úhel zatáčky:	6°
Úhel zdvihu:	30°
Výška konstrukce:	1700 mm
Šířka konstrukce:	720 mm



Obr. 18. Kombinovaná zatáčka

4. Výpočet a analýza

Prutové soustavy představují speciální soustavy těles, které se uplatňují při navrhování velkorozměrových nosných konstrukcí. Prutová soustava je tvořena pruty (štíhlá tělesa), které jsou spojeny svými konci ve styčnicích. Podle počtu prutů spojených ve styčniku rozlišujeme styčnicky dvojné, trojné a vícenásobné. Teoreticky definovaná prutová soustava představující mechanický (výpočtový) model prutové soustavy, je složena z nehmotných nezátížených binárních členů se dvěma rotačními vazbami, navzájem spojených svými konci ve styčnicích, které považujeme za ideální klouby. Vnější zatížení (akční síly) působí na soustavu ve styčnicích. Tyto vlastnosti mechanického modelu prutové soustavy zaručují, že jednotlivé pruty soustavy přenášejí pouze síly, jejichž nositelky leží na spojnicí středů čepů rotačních vazeb. Pokud jsou pruty přímé, přenášejí osově síly, které vyvozují v prutech tah nebo tlak [23].

Podle prostorového uspořádání prutů dělíme mechanické modely prutových soustav na rovinné a prostorové.

Pro výpočet konstrukce musí být soustava staticky určitá, abychom byli schopni stanovit neznámé veličiny. U prutové soustavy jsou neznámými veličinami síly v jednotlivých prutech a složky vnějších reakcí. Provádí se převážně statický výpočet u 2D soustavy.

4.1 Statické řešení prutových soustav

Cílem statického řešení rovinných prutových soustav je vyšetření vnějších reakcí v uložení prutové soustavy a stanovení velikosti a směru sil přenášených jednotlivými pruty při působení daných akčních sil. Prutové soustavy budeme řešit převážně analyticky. Obecnou metodou statického řešení rovinných prutových soustav je **styčnicková metoda** (metoda rovnováhy styčníků). Podstata metody spočívá v uvolnění jednotlivých styčníků mechanického modelu prutové soustavy a v analytickém nebo grafickém řešení rovnováhy sil, které působí na každý uvolněný styčník. Při analytickém řešení předpokládáme, že všechny pruty mechanického modelu prutové soustavy jsou namáhány na tah a podle toho volíme směry všech neznámých sil přenášených pruty (směrem ze styčniku). V každém uvolněném styčniku prutové soustavy působí rovinná soustava sil o společném působišti, a proto pro každý uvolněný styčník napíšeme dvě složkové silové podmínky rovnováhy, tzv. styčnickové rovnovážné rovnice [23].

Postupným řešením této soustavy rovnic bychom dostali hledané složky vnějších reakcí a osově síly v prutech. V našem případě je toto řešení velmi pracné a proto s ohledem na výpočetní techniku použijeme s výhodou maticový počet $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, kde matice \mathbf{A} popisuje geometrické uspořádání dané prutové soustavy, \mathbf{x} je vektor neznámých vnějších reakcí a osových sil v prutech a \mathbf{b} je vektor pravé strany (vnějších sil). Vnější síly jsou statické (neměnné v čase).



4.2 Dynamické řešení prutových soustav

U těchto vlivů je to mnohem složitější na výpočet. Proto se dynamické analýzy provádějí pomocí softwaru. Je to pro vnější silové účinky, které se mění v čase. Převážně u konstrukcí se jedná o působení větru, ale například u dopravníků, nebo u strojů které mají pohon, je to působení kmitů od motoru, vibrací pohyblivých částí.

Jednou z dynamických analýz je **modální analýza**. Pomocí modální analýzy se určují dynamické charakteristiky (vlastní frekvence, vlastní tvary kmitání) konstrukcí nebo jednotlivých prvků. Obecně jsou tyto charakteristiky důležitými parametry v oblasti dynamického zatěžování.

Dalšími analýzami jsou například:

- Akustické a vibrační analýzy pro eliminaci hluku a vibrací
- Nelineární dynamické simulace reálných konstrukcí (geometrické a materiálové nelinearity, kontaktní úlohy, kombinace s tepelnými úlohami) - MARC
- Analýza šíření vibrací v konstrukci
- Simulace nárazových zkoušek (crash testy)
- Vyhodnocení únavové pevnosti částí

4.3 Kontrola konstrukce pomocí EC3

Při kontrole konstrukcí se používají už softwary s generátory zatížení, dle norem. Ve své práci jsem provedl kontrolu 3D konstrukce v softwaru RFEM 5 pomocí přídatného modulu EC3 (dle eurokódu 3).

Eurokód 3 stanoví pravidla pro navrhování, posuzování i stavbu ocelových konstrukcí ve všech členských státech Evropské unie. S přídatným modulem STEEL EC3 od firmy Ing. Software Dlubal s.r.o. se uživatelům dostává do ruky vysoce výkonný a univerzální nástroj. Předpisy specifické pro jednotlivé země jsou stanoveny v národních přílohách.

EN 1993-1-1:2005 + AC:2009

EN 1993-1-2:2006 + AC:2005 (posouzení požární odolnosti)

EN 1993-1-4:2006 (nerozová ocel)

EN 1993-1-5:2006

V modulu STEEL EC3 máme k dispozici již předem zadané národní přílohy, uživatel může však také sám definovat mezní hodnoty a vytvářet v modulu nové národní přílohy. V modulu STEEL EC3 se provádí všechna typická posouzení únosnosti, stability a deformace. Při posouzení únosnosti se zohledňují různá namáhání a uživatel má u dané normy na výběr z několika interakčních posouzení. Důležitou součástí posouzení podle Eurokódu 3 je rozdělení posuzovaných průřezů do tříd 1-4. Cílem klasifikace průřezů je určit, v jakém rozsahu lokální boulení v částech průřezu omezuje únosnost a rotační kapacitu průřezů.

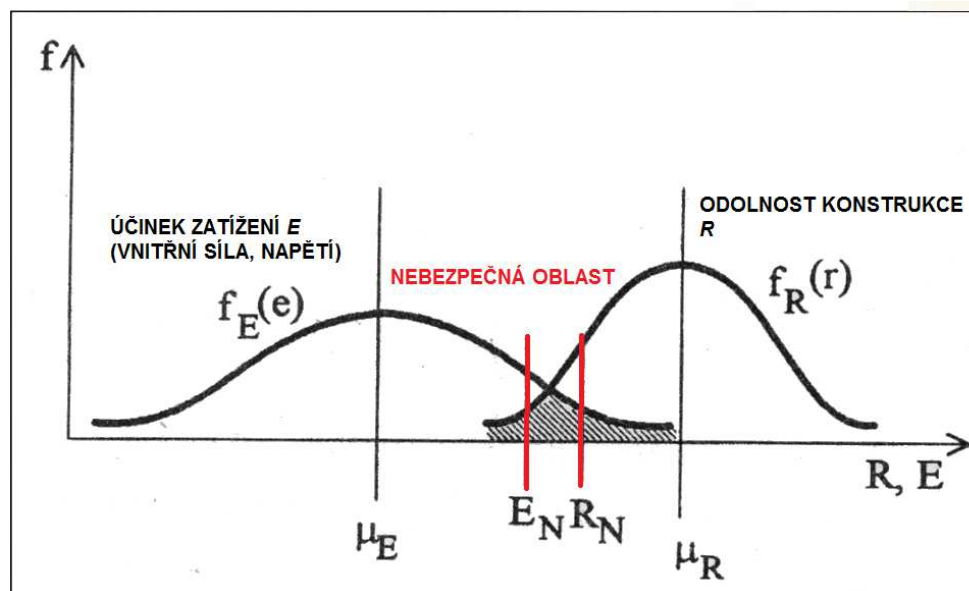
Modul STEEL EC3 dále automaticky spočítá poměr c/t tlačných částí a provede klasifikaci zcela automaticky. V případě posouzení stability lze u každého jednotlivého prutu nebo sady prutů rozhodnout, zda je vybočení možné ve směru osy y a/nebo z . Definovat lze také přídatné příčné podpory. Poměrná štíhlost a kritické zatížení se stanoví v modulu STEEL EC3 automaticky na základě okrajových podmínek. Pro posouzení klopení si může uživatel nechat automaticky v programu vypočítat pružný kritický moment při klopení, který je pro posouzení nezbytný, nebo ho může také zadat ručně. Rovněž místo působení příčných zatížení, které má vliv na namáhání kroucením, lze určit v detailním nastavení. Mezní stav použitelnosti je v moderním stavebnictví, kdy se používají stále štíhlejší průřezy, důležitým faktorem ve statickém výpočtu.

V modulu STEEL EC3 může uživatel zařazovat zatěžovací stavy a skupiny a kombinace zatěžovacích stavů jednotlivě do různých návrhových situací. Příslušné mezní hodnoty jsou stanoveny v národní příloze, lze je ovšem také změnit. Samostatné návrhové případy umožňují flexibilně posoudit jednotlivé části rozsáhlých konstrukcí [15].

Při ověření 3D konstrukce použijí už zmíněný přídatný modul RF Steel EC3. Ten nám zkontroluje konstrukci dle eurkódu 3 ČSN. Konstrukce se posuzuje podle dvou mezních stavů (mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti)

Mezní stav únosnosti

Překročení mezního stavu únosnosti má za následek porušení konstrukce a většinou vyvolá potřebu významné opravy nebo odstranění konstrukce. Snížení pravděpodobnosti překročení mezního stavu únosnosti se provádí úpravou charakteristických hodnot zatížení a vlastností materiálu [18].



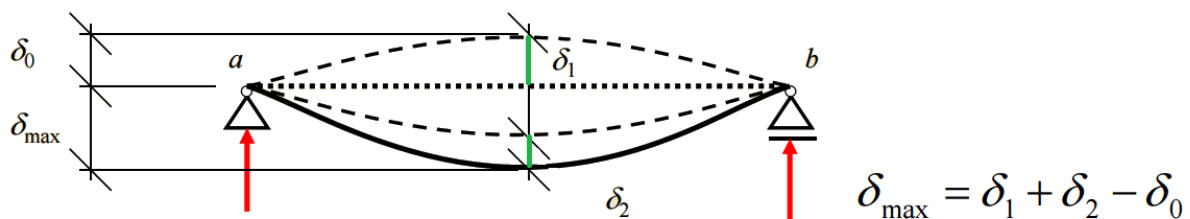
Obr. 19. Mezní stav únosnosti

Na Obr. 19. je průběh účinky vnější síly působící na konstrukci (křivka f_E) a průběh odolnosti konstrukce na vnější účinky (křivka f_R). Součinitel μ (maxima křivek) je stanoven s nejistoty stanovení účinku zatížení a odolnosti konstrukce. Má nám zajistit

spolehlivost celé konstrukce. Oblast E_N a E_R je nebezpečná oblast, jelikož v tomto místě působí velké zatížení a odolnost konstrukce je minimální. V návrhu je důležité se této oblasti vyhnout.

Mezní stav použitelnosti

Posudek vzniku nadměrných deformací (průhyb, protažení) nebo nepříjemných vibrací a jiných dynamických stavů konstrukce.



- δ_0 ... nadvýšení nosníku v nezátženém stavu
- δ_1 ... průhyb nosníku od stálých zatížení bezprostředně po zatížení
- δ_2 ... součet průhybů nosníku od proměnných zatížení a časový nárůst průhybu od stálých zatížení (beton – dotvarování a smršťování, dřevo)
- δ_{\max} ... výsledný průhyb vztažený k přímce spojující podpory

Obr. 20. Mezní stav použitelnosti



5. Výpočet 2D nosné konstrukce

5.1 Statický výpočet styčnickovou metodou 2D konstrukce

Statickým výpočtem nosné konstrukce (vertikální zatáčka) určí síly a napětí v daných prutech. Výsledná napětí (síly) mi dávají informace o vlastním návrhu z hlediska pevnosti (únosnosti) konstrukce. Z těchto informací se dá následně vycházet při dalším návrhu a určování průřezů, materiálu a atd. Konstrukce je brána jako staticky určitá úloha, to znamená, že odebíráme 3 stupně volnosti v rovině. Výpočet provádím pro rozteč mezi podporami 12 metrů. Styčnick A je považován za kloubové pevné uložení, styčnick L jako kloubové posuvné. Část zatáčky je natočena o úhel $3,6^\circ$ (parametrický úhel zatáčky) pro vzdálenost od podpor 12 metrů. Uvažuji pouze zatížení ve spodních styčnicích. (Obr. 21). Síla G je vnější statické zatížení působící na konstrukci.

$$G = g \cdot (m_K + m_M + 2 \cdot m_P + m_S)/2 \quad [N] \quad (5.10)$$

Kde: G = zatížení [N]

g = je tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

m_K = celková hmotnost 1 m konstrukce včetně lávky s rošty, zábradlím a zakrytovaním [kg]

m_M = hmotnost přepravovaného materiálu na 1 m dopravníku [kg]

m_P = hmotnost 1 m dopravního pásu [kg]

m_S = hmotnost sněhu na délce 1 m dopravníku [kg]

Pro výpočet daných sil a napětí jsem použil Excel. V něm jsem vytvořil program *Síla v prutech – vertikální 12.xls*, ve kterém je možnost měnit parametry zatížení a rozměry konstrukce. Tento soubor přikládám ke své práci na CD.

Zvolil jsem zatěžovací parametry:

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$m_K = 290 \text{ kg}$$

$$m_M = 28,5 \text{ kg}$$

$$m_P = 10 \text{ kg}$$

$$m_S = 80 \text{ kg}$$

$$G = 9,81 \cdot (290 + 28,5 + 2 \cdot 10 + 80)/2$$

$$G = 2053 \text{ N}$$

Stanovení statické určitosti:

$$2. \quad s = p + m \quad (5.11)$$

$$2. \quad 14 = 25 + 3$$

$$28 = 28$$

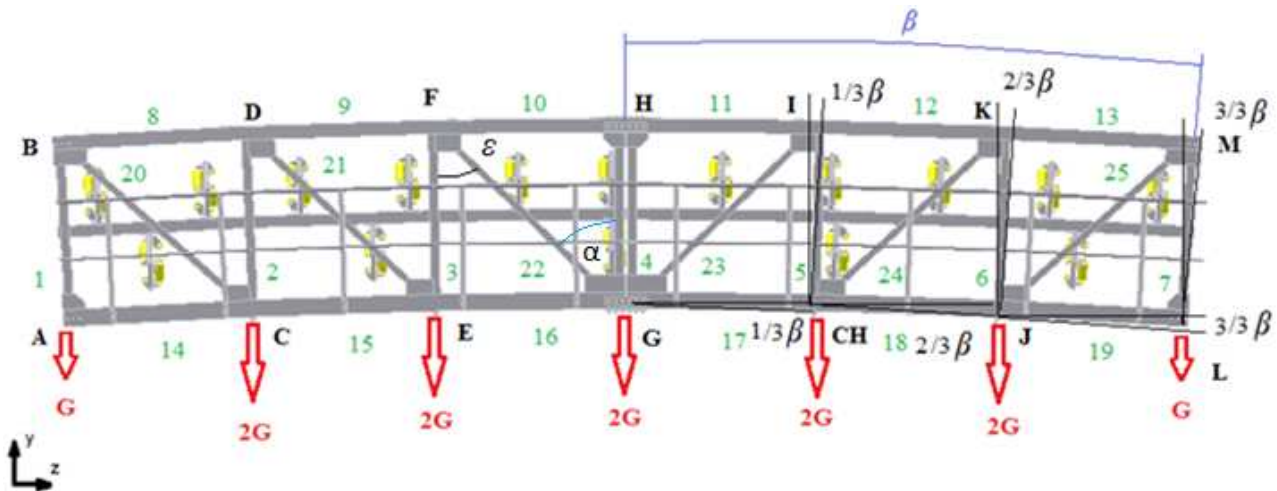
Staticky určitá soustava

Kde: s = počet styčnicků [1]

p = počet prutů [1]

m = počet reakcí [1]

Pro stanovení sil (napětí) v prutech jsem stanovil rovnice do os z , y pro jednotlivé styčníky. Pro počáteční návrh orientace sil uvažuji, že síly ze styčníku vycházejí (tahová síla). Pokud po výpočtu má síla znaménko kladné je síla tahová, pokud je záporná, tak je pak síla tlaková.



Obr. 21. Vertikální zatáčka s označením pro styčníkovou metodu

Kde: $\beta = \text{úhel zatáčky } [^\circ]$
 $\alpha, \varepsilon = \text{pomocné úhly pro výpočet } [^\circ]$

Rovnice rovnováhy sil pro jednotlivé styčníky

A:

$$z: S_{14} \cdot \cos\beta - S_1 \cdot \sin\beta - R_{AZ} = 0 \quad (5.12)$$

$$y: S_{14} \cdot \sin\beta + S_1 \cdot \cos\beta + R_{AY} - G = 0 \quad (5.13)$$

B:

$$z: S_8 \cdot \cos\beta + S_{20} \cdot \sin(\varepsilon + \beta) + S_1 \cdot \sin\beta = 0 \quad (5.14)$$

$$y: S_8 \cdot \sin\beta - S_1 \cdot \cos\beta - S_{20} \cdot \cos(\varepsilon + \beta) = 0 \quad (5.15)$$

Ostatní rovnice jsou v příloze č. 1.

	SÍLA V PRUTU [N]	PRŮŘEZ [mm ²]	NAPĚTÍ [MPa]
S1	-10243	1102	-9,29
S2	-5900	1102	-5,35
S3	-1878	1102	-1,70
S4	936	1102	0,85
S5	-1878	1102	-1,70
S6	-5900	1102	-5,35
S7	-10243	1102	-9,29
S8	-12075	2318	-5,21
S9	-19606	2318	-8,46
S10	-22341	2318	-9,64
S11	-22341	2318	-9,64
S12	-19606	2318	-8,46
S13	-12075	2318	-5,21
S14	-644	2315	-0,28
S15	11814	2315	5,10
S16	19553	2315	8,44
S17	19553	2315	8,44
S18	11814	2315	5,10
S19	-644	2315	-0,28
S20	15835	568	27,88
S21	9870	568	17,38
S22	3594	568	6,33
S23	3594	568	6,33
S24	9870	568	17,38
S25	15835	568	27,88

Tab. 1. Síly v prutech - styčnicková metoda

V tab. 1. se nachází výsledné síly v daných prutech (Obr. 21.) a napětí pro zadané průřezy profilů. Výsledky sil ze styčnickové metody je informace pro další návrh konstrukce (stanovení průřezů profilů).

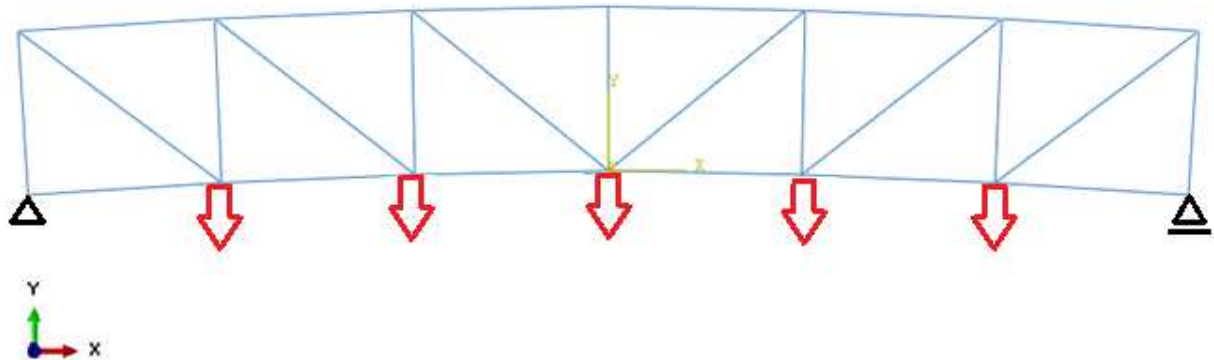
S1 až S7 (svislé pruty): U80
S8 až S13 (horní pruty): L120x120x10
S14 až S19 (dolní pruty): L150x90x10
S20 až S25 (příčné pruty): L60x40x6

5.2 Statický výpočet MKP 2D konstrukce

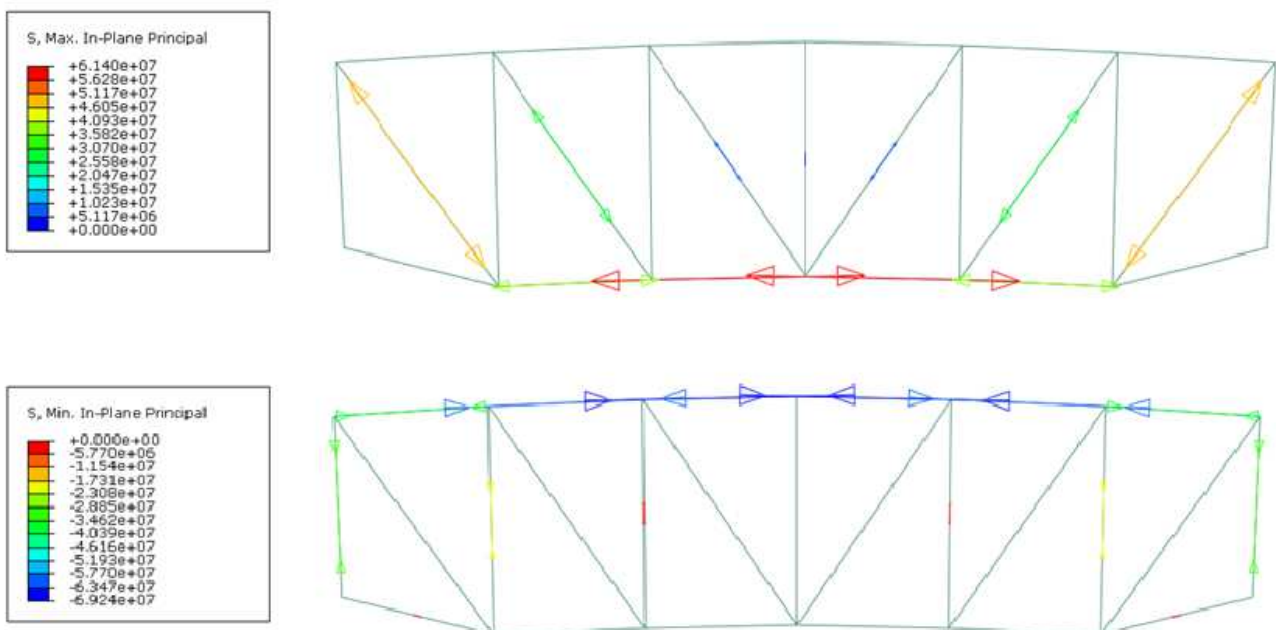
Po určení výsledných sil v prutech pomocí analytickou styčnickovou metodou provedu výpočet MKP v programu Abaqus.

Program abaqus je typický výpočtový MKP SW, který se používá pro komplexní analýzy různých součástí i sestav. Pro prutové konstrukce není však příliš vhodný, např. protože nenabízí rozsáhlé knihovny, kontrolu dle norem, složitá tvorba modelů atd. Je vhodný pouze pro jednoduché prutové konstrukce. Ty se mohou vypočítat pomocí dvou metod. A to buď metodou TRUSS nebo metodou BEAM. Tyto metody jsou si hodně podobné, ale hlavním rozdílem je, že metoda BEAM do svého výpočtu uvažuje i ohybové momenty. Já jsem zvolil metodu TRUSS. Ta uvažuje pouze osová napětí, jako je tah a tlak.

Konstrukci jsem vytvořil pomocí bodů a linií, tak aby geometrie odpovídala geometrii pro styčnickovou metodu. Celá konstrukce poté byla zatížena samostatnými silami v dolních prutech (viz. Obr. 19.)



Obr. 22. Zatížení konstrukce v abaqusu



Obr. 23. Výsledky v abaqusu

Na Obr. 23. Jsou vidět výsledky po provedení výpočtu, kde na horním obrázku jsou výsledky dolních a svislých prutů a dole jsou horní a svislé pruty.

	SÍLA V PRUTU [N]	PRŮŘEZ [mm ²]	NAPĚTÍ [MPa]
S1	-10175	1102	-9,23
S2	-5865	1102	-5,32
S3	-1643	1102	-1,49
S4	904	1102	0,82
S5	-1643	1102	-1,49
S6	-5865	1102	-5,32
S7	-10175	1102	-9,23
S8	-12610	2318	-5,44
S9	-20166	2318	-8,70
S10	-22693	2318	-9,79
S11	-22693	2318	-9,79
S12	-20166	2318	-8,70
S13	-12610	2318	-5,44
S14	-671	2315	-0,29
S15	12315	2315	5,32
S16	20002	2315	8,64
S17	20002	2315	8,64
S18	12315	2315	5,32
S19	-671	2315	-0,29
S20	16194	568	28,51
S21	9730	568	17,13
S22	3266	568	5,75
S23	3266	568	5,75
S24	9730	568	17,13
S25	16194	568	27,51

Tab. 2. Síly v prutech - MKP

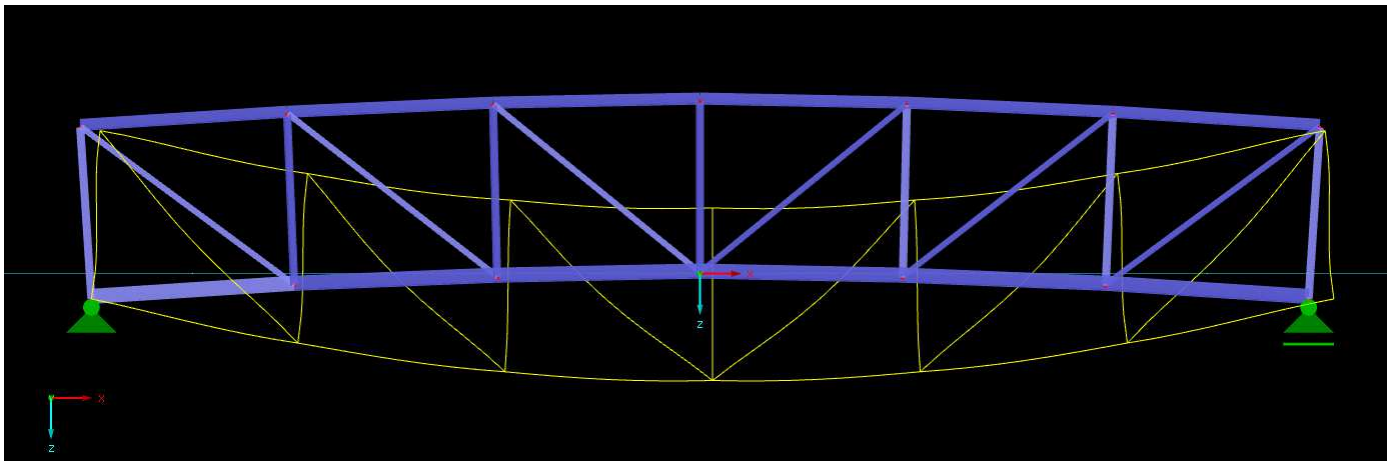
V tab. 2. Jsou hodnoty sil a napětí získané metodou MKP (SW Abaqus). V porovnání s výsledky získané analytickou metodou dochází k malým odchýlkám, které vznikly tvorbou parametrických rovnic v programu MS Excel a zaokrouhlením. Víceméně jsou hodnoty podobné a orientace sil stejné.

5.3 Statický výpočet RFEM 5 2D konstrukce

Po styčnickové metodě a MKP v programu abaqus jsem další výpočet provedl v programu RFEM 5.

RFEM 5 je určen pro 2D/3D analýzu různých konstrukcí metodou MKP a pomáhá výpočtářům a konstruktérům k hodnocení stavebních a nosných ocelových konstrukcí. Tento program vyvíjí a dodává firma Dlubal software s.r.o..

Hlavní program RFEM slouží k zadávání konstrukcí, materiálů a zatížení pro rovinné a prostorové konstrukční systémy, které se skládají z desek, stěn, skořepin a prutů. Zároveň umožňuje vytváření smíšených konstrukcí a modelování těles a kontaktních prvků. RFEM určuje deformace, vnitřní síly, napětí, podporové síly a napětí v základové spáře. Přídavné moduly umožňují automatické vytváření konstrukcí a přípojů, čímž usnadňují zadávání vstupních dat, a provádějí další analýzy a posouzení podle nejrůznějších norem [14].



Obr. 24. Konstrukce + deformace – RFEM 5

Vytvořil jsem opět konstrukci ve stejné geometrii jako v předchozích výpočtech (Obr. 24.). V tomto programu, který je vhodný výpočet prutové konstrukce, porovnávám výsledky z analytického a MKP výpočtu.

	SÍLA V PRUTU [N]	PRŮŘEZ [mm ²]	NAPĚTÍ [MPa]
S1	-12904	1102	-11,71
S2	-7657	1102	-6,94
S3	-2456	1102	-2,22
S4	717	1102	0,65
S5	-2456	1102	-2,22
S6	-7657	1102	-6,94
S7	-12904	1102	-11,71
S8	-14913	2318	-6,43
S9	-23900	2318	-10,31
S10	-26935	2318	-15,93
S11	-26935	2318	-15,93
S12	-23900	2318	-10,31
S13	-14913	2318	-6,43
S14	-606	2315	-0,26
S15	14815	2315	6,39
S16	23920	2315	10,33
S17	23920	2315	10,33
S18	14815	2315	6,39
S19	-606	2315	-0,26
S20	19253	568	33,89
S21	11518	568	20,27
S22	3922	568	6,90
S23	3922	568	6,90
S24	11518	568	20,27
S25	19253	568	33,89

Tab. 3. Síly v prutech – RFEM 5

Jako v předchozích kapitolách jsou výsledky (síly, napětí) v tabulce (tab. 3.). V porovnání s výsledky analytickou metodou a MKP (Abaqus) jsou rozdíly hodnot sil (napětí) větší. Je to dáno hlavně typem výpočtu. U analytiky a MKP (Abaqus) se počítalo pouze s osovými silami. V RFEM 5 se do výpočtu zahrnuly i ohybové momenty a účinky spojené se štíhlostí prutů. Proto výsledky z RFEM 5 se dají považovat za nejpřesnější přiblížení reálu.



5.4 Porovnání výsledků jednotlivých výpočtů

Výpočet sil byl proveden třemi způsoby:

- Analyticky – styčnicková metoda
- MKP – abaqus
- MKP – RFEM 5

Všechny hodnoty sil jsou uvedeny v tabulkách jednotlivých předchozích kapitol. Analytickou metodou jsem získal hodnoty sil (napětí) v jednotlivých prutech, následný výpočet byl proveden MKP metodou v programu Abaqus, kdy byly použity truss elementy. Hodnoty porovnané styčnickovou metodou a MKP se nepatrně liší. Je to dáno tvarem konstrukce, které je natočena o daný úhel, a tím pádem se celá geometrie natáčí o úhly α a ε . Pro možnost vypočtení sil jsem si musel určit tyto pomocné úhly α a ε . Určení těchto úhlů je zavedeno v excelovském programu. Je to jeden z možných důvodů, proč výsledky nejsou zcela totožné. Jinak řádově výsledky odpovídají.

Největší rozdíl v porovnání výsledků analytiky a MKP (Abaqus) je v prutech S15 a S18. Rozdíl je 501 N (4%).

Analytika: S15 = S18 = 11814 N

MKP: S15 = S18 = 12315 N

V porovnání výsledků s výpočtem v RFEM 5 je rozdíl už mnohem větší. Řádové síly odpovídají, ale velikosti už se liší. Je to dáno hlavně tím, že v RFEM 5 se bere v úvahu i ohybová napětí, štíhlost a vzpěr prutů. Proto jsou síly z výpočtu RFEM 5 větší. Pro úvahu jsou tyto výsledky bližší realitě, jelikož výpočet obsahuje více parametrů. Proto tyto síly neberu jako porovnávací, ale jako ukazatel rozdílu analytického výpočtu a výpočtu blížící se reálu.

Největší rozdíl porovnání MKP a RFEM 5 výsledků je v prutech S10 a S11, kde je rozdíl 4242 N (15%).

MKP (Abaqus): S10 = S11 = -22693 N

RFEM 5: S10 = S11 = -26935 N



6. 3D nosná konstrukce

V předchozí kapitole jsem se zabýval statickým výpočtem konstrukce ve 2D, na níž působilo pouze vnější zatížení. V reálu na konstrukci působí více faktorů, především se jedná o konstrukci, která je vedena ve výšce, a tím je ovlivněna působením větru.

V této kapitole se budu věnovat působením větru a vyhodnocení konstrukce pomocí modul EC3 v programu RFEM 5.

6.1 Zatížení větrem

Jelikož dopravník může být na stojnách v dané výšce, obvykle v otevřeném terénu, je konstrukce zatížena i silovou složkou větru. Ta je velice proměnlivá, jelikož je mnoho faktorů, které ovlivňují její velikost. Výpočet síly je normalizován dle československé normy ČSN 73 0035 zabývající se působením větru na konstrukce, stavby, stožáry, atd. Výpočtem určíme velikost síly působící kolmo na konstrukci dopravníku, kterou pak zavedeme do software a následně ověříme danou konstrukci dle norem (eurokódů), jestli je únosná a použitelná (viz. Kapitola 4.3.).

6.1.1 Určení síly větru na konstrukci dopravníku

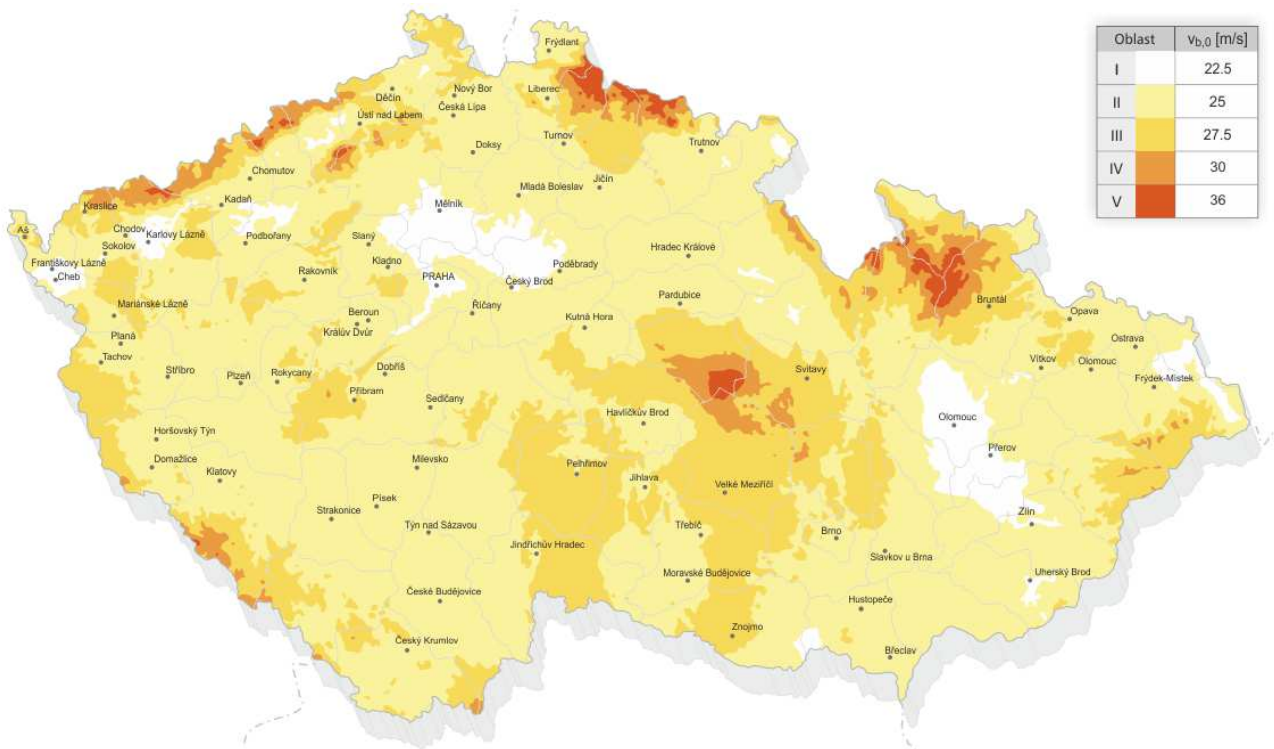
Rychlost a tlak větru

Střední rychlost větru v_m se má stanovit ze základní rychlosti větru v_b , která závisí na větrných podmínkách a na změně větru s výškou, stanovené z drsnosti terénu a orografie. Flukтуаční složka větru je vyjádřena intenzitou turbulence. Výchozí základní rychlost větru $v_{b,0}$ je charakteristická desetiminutová střední rychlost větru, nezávislá na směru větru a ročním období, ve výšce 10 m nad zemí v terénu bez překážek s nízkou vegetací jako je tráva a izolovanými překážkami, vzdálenými od sebe nejméně 20násobek výšky překážek [16].

Volím oblast II

oblast	I	II	III	IV	V
$v_{b,0}$	22,5	25	27,5	30	36 m/s (char. Hodnotu určí ČHMÚ)

Tab. 4. Oblasti větrných podmínek [16]



Obr. 25. Mapa oblastí větru [14]

1. Základní rychlost větru v_b [m/s]

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (6.10)$$

$$v_b = v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$$

Kde: c_{dir} = součinitel směru větru (obecně $c_{dir}=1$) [-]
 c_{season} = součinitel ročního období (obecně $c_{season}=1$) [-]

2. Charakteristická střední rychlost větru $v_m(z)$ [m/s]

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (6.11)$$

Kde: z = výška nad terénem [m]

$c_0(z)$ = součinitel orografie – horopisu (vliv osamělých kopců, hřebenů, útesů a příkrých stěn), pro většinu návrhových situací $c_0(z) = 1$
 (rychlost větru není zvětšena o více jak 5% vlivem orografie) [-]

$c_r(z)$ = součinitel drsnosti terénu

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pro} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (6.12)$$



$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{pro} \quad z \leq z_{min}$$

z_0 = parametr drsnosti terénu (tabulka kategorie terénu) [-]

z_{min} = minimální výška (tabulka kategorie terénu) [m]

z_{max} = uvažuje se 200m [m]

k_r = součinitel terénu [-]

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad z_{0,II} = 0,05 \text{ m} \quad (6.13)$$

Kategorie terénu	z_0 [-]	z_{min} [m]
0 Moře nebo pobřežní oblasti vystavené otevřenému moři	0,003	1
I Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek	0,01	1
II Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek výšky překážek	0,05	2
III Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně 20násobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les)	0,3	5
IV Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m	1,0	10

Tab. 5. Kategorie terénu [16]

Volím pro výpočet oblast IV

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{1}{0,05} \right)^{0,07} = 0,2343$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,2343 \cdot \ln\left(\frac{15}{1}\right) = 0,6345$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,6345 \cdot 1 \cdot 25 = 15,8625 \text{ m/s}$$

3. Maximální dynamický tlak $q_p(z)$ [$N \cdot m^{-2}$]

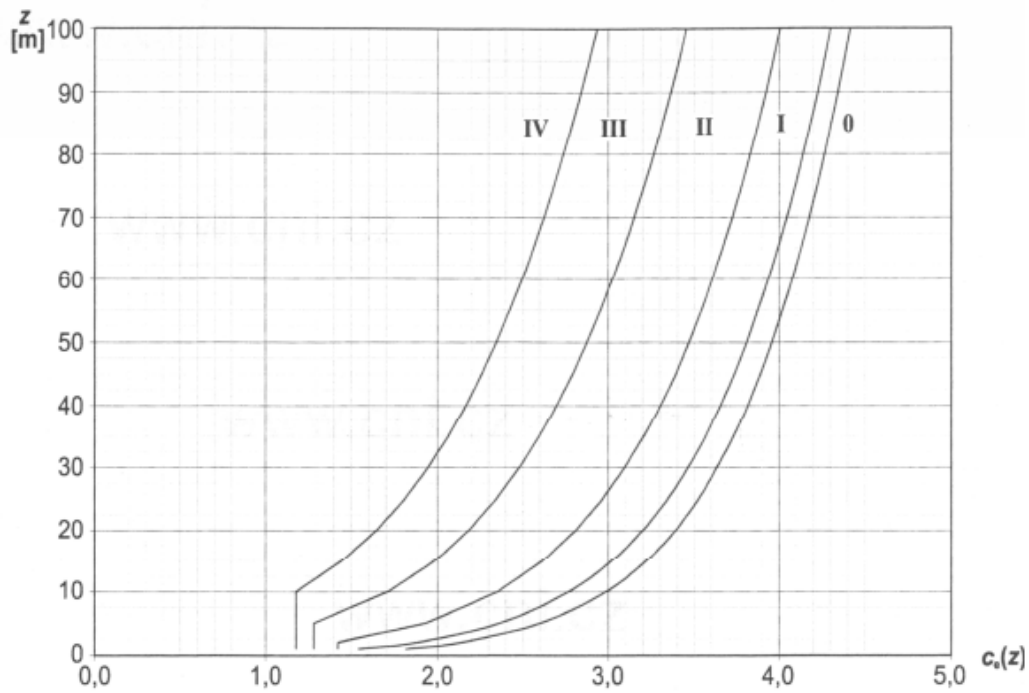
$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 = c_e(z) \cdot q_b \quad (6.14)$$

Kde: $[1 + 7 \cdot I_v(z)]$ = vliv turbulencí

ρ = měrná hmotnost vzduchu, závisí na nadmořské výšce, teplotě a barometrickém tlaku, který je v oblasti očekáván při silné vichřici ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$) [$kg \cdot m^{-3}$]

q_b = základní dynamický tlak větru - $q_b = 0,5 \rho v_b(z)^2$ [$N \cdot m^{-2}$]

$c_e(z)$ = součinitel expozice [-]



Obr. 26. Závislost součinitele expozice na výšce [16]

Pro IV. Oblast

$$c_e(z) > c_e(10) = 1,2$$

$$q_b = 0,5 \rho v_b(z)^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 390,625 \text{ N.m}^{-2} \quad (6.15)$$

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b = 1,2 \cdot 390,625 = 468,75 \text{ N.m}^{-2}$$

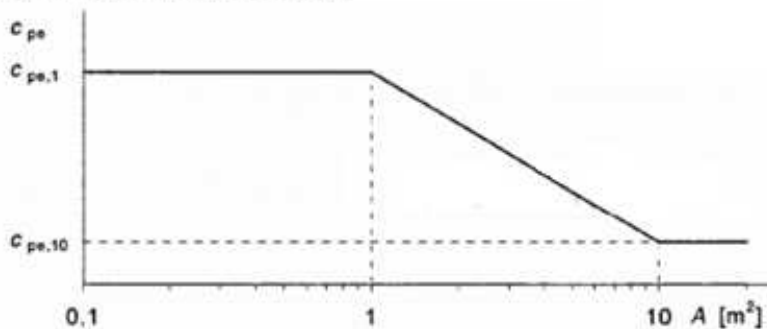
4. Součinitelé tlaků a sil

- $C_{pe,1}$ pro malé zatěžovací plochy ($< 1 \text{ m}^2$) – povrchy přímo zatížené větrem (obvodový plášť, upevňovací prvky)
- $C_{pe,10}$ pro velké zatěžovací plochy ($> 10 \text{ m}^2$) – pro hlavní konstrukce a velké konstrukční prvky (rámy, průvlaky, sloupy)

Oblast	I		II		III		IV		V	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
1	-1,2	-1,4	-1,4	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0		-0,3

Tab. 6. Součinitelé tlaků a sil [16]

Součinitele vnějšího tlaku



V obrázku platí:

Pro $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$

$$C_{pe} = C_{pe,1} + (C_{pe,10} - C_{pe,1}) \cdot \log_{10} A^{NP}$$

Pro zatáčku - $A = 4,8662 \text{ m}^2$

$$c_{pe} = -0,8 + (-1,1 + 0,8) \cdot \log_{10} 4,8662 = -1,0062$$



5. Tlak větru

Jedná se o tlak způsobený prouděním větru působící na kolmé povrchy konstrukce.

Kde: $w_e = \text{tlak větru působící na vnější povrchy}$
 $w_e = q_p(z) \cdot c_{pe} [N \cdot m^{-2}]$

$c_{pe} = \text{součinitel vnějšího tlaku (závisí na velikosti plochy vystavené větru a zejména na tvaru konstrukce) [-]}$

$w_i = \text{tlak větru působící na vnitřní povrchy}$
 $w_i = q_p(z) \cdot c_{pi} [N \cdot m^{-2}]$

$c_{pi} = \text{součinitel vnitřního tlaku [-]}$

Hodnoty součinitelů tlaků se stanovují z tabulek.

6. Síly od větru

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(z) A [N] \quad (6.16)$$

Kde: $c_s = \text{součinitel velikosti konstrukce – bere v úvahu účinek redukce zatížení v důsledku nesoučasného výskytu maximálních tlaků větru na povrchu [-]}$

$c_d = \text{dynamický součinitel (lze uvažovat jako součin } c_s \text{ a } c_d = 1,0) [-]$

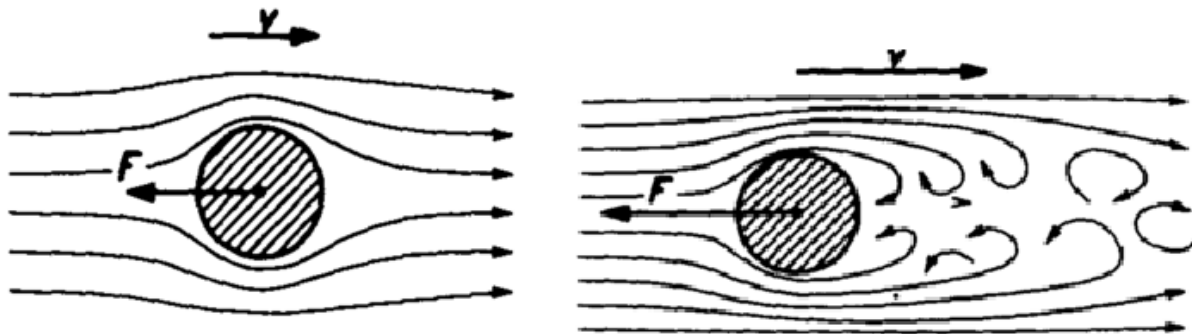
$c_f = \text{součinitel síly, můžeme uvažovat roven } c_{pe} [-]$

$A = \text{plocha povrchu [m}^2\text{]}$

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(z) A = 1 \cdot -1,0062 \cdot 468,75 \cdot 4,8662 = \underline{\underline{-2295,1736 \text{ N}}}$$

6.1.2 Síla větru na pás

Při působení větru na dopravník dochází k obtékání tělesa (kruhového profilu). Při nízkých rychlostech větru je proud laminární a síla je malá, se zvyšující silou se proudění mění na turbulentní.



Obr. 27. Obtékání tělesa [17]

$$F = \frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad [N] \quad (6.17)$$

Kde: C = součinitel odporu (pro kruhový průřez = 0,48) [-]
 ρ = hustota vzduchu ($1,25 \text{ kg/m}^3$) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 S = obsah průřezu kolmého ke směru proudění [m^2]
 v = rychlost větru (25 m/s) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Šíře pásu je 800 mm, při zabalení do uzavřeného profilu (s ohledem na přeplátování) má kruhový profil průměr přibližně 248 mm.

Pro horní větev, kde jsou válečkové stolice po 1 metru vzdálené od sebe, je obsah průřezu $0,248 \text{ m}^2$. Pro dolní větev jsou válečkové stolice vzdálené od sebe 3 metry. Obsah průřezu kolmý ke směru proudění je $0,744 \text{ m}^2$. Výpočtem určí síly působící pouze na pás mezi danými stolicemi.

a) Síla na horní pás (délka pásu = 1 m)

$$F = \frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,48 \cdot 1,25 \cdot 0,248 \cdot 25^2 = 46,5 \text{ N}$$

b) Síla na dolní pás (délka pásu = 3 m)

$$F = \frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,48 \cdot 1,25 \cdot 0,744 \cdot 25^2 = 139,5 \text{ N}$$

6.2 Kontrola 3D konstrukce

Kontrolu provádím opět v programu RFEM 5. Výhodou tohoto programu je, že danou konstrukci si můžeme ověřit dle norem a eurokódů. V našem případě se jedná o eurokód 3 (viz. 5.1). Kontrolu dle eurokódu dělám na konstrukci vertikální zatáčky směrem dolů.

Konstrukci tvořím z geometrie složené z jednotlivých bodů o daných souřadnicích, které jsou spojeny liniemi. K daným liniím přiřazuji z knihovny normovaných dílů pruty o stejných průřezech jako u 3D v programu Inventor. Konstrukce je vytvořena z oceli S235 (11375).

Průřezy:

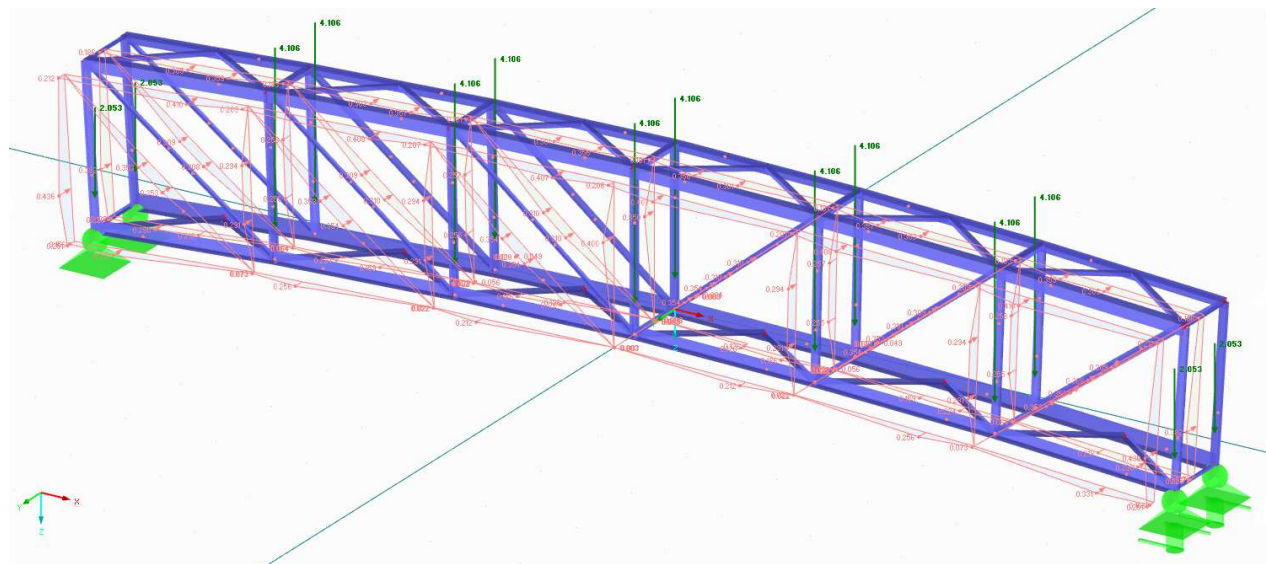
L150x90x10

L120x120x10

U80

L60x40x6

Konstrukci zatěžuji třemi hlavními zatíženími. První zatížení je vlastní tíha konstrukce. Ta působí svisle ve směru dolů (osa z). Dalším zatížením je síla od větru. Ta byla vložena do výpočtového modelu pomocí generátoru zatížení. Síla, která byla vypočtena v kapitole 6. 1. Je stejná jako síla v generátoru (kontrola). Do tabulky zatížení započtena jako síla na konstrukci, tak i síla působící na pás (Obr. 23.). Posledním zatížením je vnější síla použita ve výpočtem 2D konstrukce. Je to zatížení od hmotnosti pásu, hmotnosti přepravovaného materiálu a tíhy sněhu.



Obr. 28. 3D konstrukce se zatížením

Zatížení:

Vygenerované zatížení větrem – červená barva

Vnější zatížení – zelená barva

Po provedení prvního ověření konstrukce splnila mezní stav použitelnosti, ale bohužel posouzení mezního stavu únosnosti neproběhlo. Mezní stav únosnosti nelze posoudit. Z výsledků vyplývá, že průřezy nejsou schopny přenést ohybový moment. Program je také schopen při tomto problému navrhnout optimalizaci průřezů tak, že vybere z dané řady větší průřez, jenž odpovídá meznímu stavu. Provedl jsem optimalizaci průřezů.

Původní průřezy:

L150x90x10
L120x120x10
U80
L60x40x6

Optimalizované průřezy:

L200x150x15
L200x200x16
U320
L200x150x15

Po této úpravě jsem provedl znova posouzení konstrukce a s novými průřezy splnila oba mezní stavy.

Zatížení	A	B	C	D	E	F	G
	Označení	Prut č.	Místo x [m]	Návrhové využití		Posouzení podle vzorce	NS
Posouzení mezního stavu únosnosti							
ZS1	Vnější zatížení	98	2.000	0.02	≤ 1	185) Posouzení průřezu - ohyb, smyk a osová síla podle 6.2.10 a 6.2.9 - třída 3 - t	TD
ZS2	Vítr ve směru osy -Y	78	0.000	0.05	≤ 1	327) Posouzení stability - prostorový vzpěr podle 6.3.1.4 a 6.3.1.2(4) - třída 4	TD
ZS3	Vlastní tíha	97	0.000	0.00	≤ 1	101) Posouzení průřezu - tah podle 6.2.3	TD
Posouzení mezního stavu použitelnosti							
ZS1	Vnější zatížení	77	0.511	0.01	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
ZS2	Vítr ve směru osy -Y	22	1.156	0.69	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
ZS3	Vlastní tíha	27	1.312	0.03	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
KZ1	1.35*ZS1 + 1.35*ZS3	23	1.315	0.04	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
KZ2	1.35*ZS1 + 1.5*ZS2 + 1.35*ZS3	18	1.465	0.99	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
KZ3	ZS1 + ZS3	23	1.315	0.03	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
KZ4	ZS1 + ZS2 + ZS3	24	1.465	0.67	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
KV1	MSÚ (STR/GEO) - stálá / pře	18	1.465	0.99	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC
KV2	MSP - charakteristická	24	1.465	0.67	≤ 1	406) Použitelnost - kombinace zatížení 'charakteristická' - směr u	PC

Obr. 29. Vyhodnocení 3D konstrukce v RFEM 5



7. Výpočet pohonu dopravníku

Při výpočtech základních parametrů dopravních pásů a pásových dopravníků se vychází z normy ČSN ISO 5048 [24], která stanovuje základní zásady výpočtů pásových dopravníků.

Při návrhu pásových dopravníků je dobré vycházet především z výpočtu potřebné obvodové síly na poháněcím bubnu a z toho plynoucího tahového namáhání pásu, jelikož tyto hodnoty podstatně ovlivňují volbu pohonu a také konstrukce pásu [24].

Výkon pohonu se stanoví z obvodové síly na poháněcím bubnu a z rychlosti pásu [24]. Potřebná šířka pásu se určuje na základě největšího objemového dopravovaného množství a případně podle kusovitosti dopravované hmoty [24]. Je nutné věnovat pozornost řadě různých činitelů, které ovlivňují obvodovou sílu na poháněcím bubnu a ztěžují přesnost stanovení výkonu. Je zde uveden jednoduchý způsob výpočtu při návrhu pásového dopravníku. Kvůli tomu je přesnost výpočtu omezena, ale i tak vyhovuje ve většině případů.

7.1 Vstupní parametry

- šíře dopravního pásu:

$$b' = 650 \text{ mm}$$

- hmotnostní dopravní výkon:

$$Q' = 200 \text{ th}^{-1}$$

- objemový dopravní výkon:

$$Q'_v = \frac{Q'}{\rho \cdot 3600} = \frac{200}{1,45 \cdot 3600} = 0,0038 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

dopravní rychlost:

$$v' = 2 \text{ ms}^{-1}$$

- plocha průřezu dopravovaným materiálem:

$$S' = \frac{Q'_m}{v'} = \frac{0,0038}{2} = 0,0019 \text{ m}^2$$

- přepravovaný materiál:

Štěrk (materiál), sypná hmotnost $\rho = 1,45 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

	Statický sypný úhel α [°]	Sypná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]
Štěrk	20	1900
Suchý písek se štěrkem	30	1450
Vlhký písek	35	2000

Tab. 7. Přepravované materiály [19]



V praxi je častěji využíváno hnacích bubnů s větším průměrem než u U-dopravníku. Pro hadicový dopravník volím průměr hnacího bubnu $d = 550$ mm. Změna průměru bubnu ovlivní otáčky:

$$n = \frac{v'}{\pi d} = \frac{2}{3,14 \cdot 0,55} = 1,15 \text{ s}^{-1} \rightarrow n = 69 \text{ min}^{-1} \quad (\text{volím } 72 \text{ min}^{-1} \Rightarrow 1,2 \text{ s}^{-1})$$

Pro zachování výkonu a pro uvažování překrytí pásu se musí šíře dopravního pásu zvětšit. Vnitřní průměr při zabalení pásu s uvažování překrytí pásu je $D = 220$ mm.

• šíře dopravního pásu:

$$b = 800 \text{ mm}$$

• α_p = součinitel plnění hadicového dopravníku ($\alpha_p = 0,75$)

$$v = \pi d n = \pi \cdot 0,55 \cdot 1,2 = 2,07 \text{ m s}^{-1}$$

$$Q_m = \alpha_p \frac{\pi D^2}{4} v \cdot 3600 = 0,75 \frac{\pi \cdot 220^2}{4} 2,07 \cdot 3600 = 212,46 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Skutečný hmotnostní dopravní výkon se zvýšil u hadicového dopravníku z $200 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ o $12,46 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ (6,23 %).

7.2 Hnací síla, potřebný výkon

Celkový pohybový odpor F_U se určí ze součtu hlavních + vedlejších + přídatných odporů

$$F_U = F_H + F_V + F_{S1} + F_{S2} + F_{St} \quad [N] \quad (7.20)$$

Kde: F_H – hlavní odpory [N]

F_V – vedlejší odpory [N]

F_{S1} – přídatné hlavní odpory [N]

F_{S2} – přídatné vedlejší odpory [N]

F_{St} – odpor k překonání dopravní výšky [N]

Tyto všechny skupiny zahrnují všechny odpory překonávané hnacím pohonem pásového dopravníku při uvažování tření sklonu trasy, urychlení dopravované hmoty na rychlost pásu v nakládacím místě.

Velikost dílčích složek pohybových odporů je ovlivňována různými faktory \Rightarrow vnějších pracovních podmínky (např. okolní teplota, prašnost prostředí, konstrukční a výrobní provedení funkčních částí a stupni jejich opotřebení, atd.).



Hlavní a vedlejší odpory (F_H, F_N) působí u všech druhů pásových dopravníků, přídavné odpory (F_{S1}, F_{S2}) jsou pouze při určitém provedení. Hlavní odpory F_H a přídavné hlavní odpory F_{S1} působí spojitě po celé délce dopravníku. Vedlejší odpory F_N a přídavné vedlejší odpory F_{S2} působí pouze v daném místě.

7.2.1 Hlavní a vedlejší odpory

Hlavní odpory F_H a vedlejší odpory F_V :

$$F_H + F_V = C \cdot f \cdot L \cdot g [q_{RH} + q_{RD} + (2q_B + q_G) \cos \delta] \quad [N] \quad (7.21)$$

Hlavní odpory zahrnují

- rotační odpory válečků, vznikají třením v ložiskách a v těsnění válečků
- odpory způsobené zatlačováním válečků do pásu a opakovaným ohybem pásu s dopravovanou hmotou

Vedlejší odpory zahrnují

- odpory tření a setrvačné síly při urychlování dopravované hmoty v místě nakládání
- odpor tření o boční stěny násypky v místě nakládání
- odpor ložisek bubnu s výjimkou ložisek poháněcího bubnu
- odpor ohybu pásu na bubnech

Kde: f – globální součinitel tření [-]

L – délka dopravníku [m]

g – gravitační zrychlení [ms^{-2}]

q_{RH} – hmotnost rotujících částí válečků na 1m délky horní větve dopravníku [$kg \cdot m^{-1}$]

q_{RD} – hmotnost rotujících částí válečků na 1m délky dolní větve dopravníku [$kg \cdot m^{-1}$]

q_B – hmotnost 1 m dopravního pásu [$kg \cdot m^{-1}$]

q_G – hmotnost nákladu na 1m délky pásu [$kg \cdot m^{-1}$]

δ – úhel sklonu dopravníku [$^\circ$]

Pro velké vzdálenosti os bubnů dopravníků (přes 80 m) jsou vedlejší odpory podstatně nižší než hlavní odpory a lze je vypočítat zjednodušeným způsobem. Proto se zavádí do výpočtu součinitel C jako násobitel hlavního odporu (závislý na délce pásového dopravníku).

Součinitel C

Lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$C = \frac{F_H + F_N}{F_H} \quad [-] \quad (7.22)$$

Součinitel C je funkcí délky dopravníku, protože většina vedlejších odporů F_N dopravníku nezávisí na délce dopravníku L (působí v určitém místě). Pokud je délka dopravníku větší než 80 m, tak lze součinitel C vypočítat podle vztahu:

$$C = \frac{L+L_0}{L} \quad [-] \quad (7.23)$$

Kde: L_0 – přídatná délka (v rozmezí 70 až 100 m) [m]

Musí zde platit: $C \geq 1,02$

Pro výpočet volím délku dopravníku 200 metrů a přídatnou délku 90 metrů.

$$C = \frac{L + L_0}{L} = \frac{200 + 90}{200} = 1,45$$

$$C = 1,45 \geq 1,02$$

Pro vzdálenost os bubnů L menší než 80 m se součinitele C stává nespolehlivý. Nespolehlivost součinitele C pro malé vzdálenosti os bubnů dopravníku lze vysvětlit převahou vedlejších odporů u dopravníků.

Globální součinitel tření f

Globální součinitel tření f platí společně pro (horní, dolní) větev dopravníku. Zahrnuje valivý odpor válečkových stolic a pohybové odpory pásu.

Pokud je sklon dopravníku $\delta \leq 10^\circ \Rightarrow \cos \delta = 1$

Globální součinitel tření = 20°C

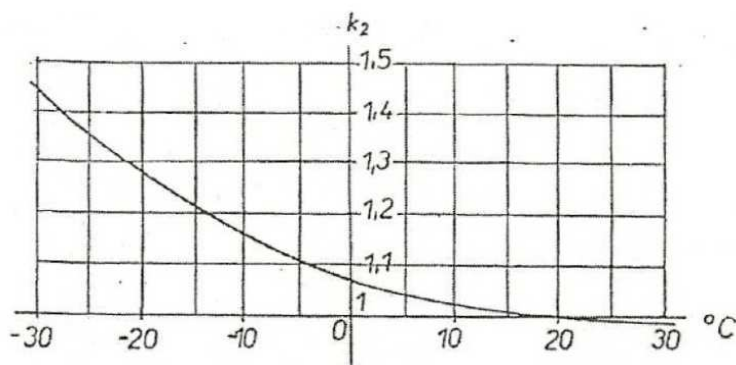
$$f_1 = 0,06$$

Teplotní součinitel = - 20°C

$$k_2 = 1,28$$

Globální součinitel tření:

$$f = f_1 \cdot k_2 = 0,06 \cdot 1,28 = 0,0768$$



Obr. 30. Teplotní součinitel [20]



Při stanovení hlavních odporů se vychází ze zatížení způsobeného hmotností (dopravovaného materiálu, dopravního pásu, rotujících částí válečků) na 1m délky dopravníku.

Volím globální součinitel $f = 0,0768$ (do provozu s nepříznivými podmínky).

Hmotnost rotujících částí válečků připadajících na 1 m délky horní větve dopravníku

$$q_{RH} = \frac{q_1 p_1}{L} \quad [kg \cdot m^{-1}] \quad (7.24)$$

Kde: p_1 – udává počet řad horních válečků (volená hodnota) [-]
 q_1 – udává hmotnost válečku v horní větvi [kg]
 L – délka dopravníku [m]

$$q_{RH} = \frac{q_1 p_1}{L} = \frac{6,1,7 \cdot 200}{200} = 10,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$$

V jedné řadě je válečková stolice po 6 válečkách (1,7 kg/váleček, Ø 89 – 200, ložiska 6204).
V horní větvi volím rozestup mezi válečkovými stolicemi po 1 metru, v dolní po 3 metrech.

Hmotnost rotujících částí válečků připadajících na 1 m délky dolní větve dopravníku

$$q_{RD} = \frac{q_2 p_2}{L} \quad [kg \cdot m^{-1}] \quad (7.25)$$

Kde: p_2 – udává počet řad dolních válečků (volená hodnota) [-]
 q_2 – udává hmotnost válečku v dolní větvi [kg]

$$q_{RD} = \frac{q_2 p_2}{L} = \frac{6,1,7 \cdot 66}{200} = 3,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$$

Hmotnost nákladu na 1 m délky pásu

$$q_B = m_p \cdot B = \frac{B}{1000} (k_p \cdot t + G_p) \quad [kg \cdot m^{-1}] \quad (7.26)$$

Kde: m_p – hmotnost 1 m² dopravního pásu [kg.m⁻²]
 k_p – hmotnost 1 m² vrstvy pásu o tloušťce 1 mm [kg/m². mm]
 t – celková tloušťka krycích vrstev pásu [mm]
 G_p – hmotnost nosné kostry bez krycích vrstev [kg.m⁻²]
 B – šířka dopravního pásu [m]

Volím pás PAK 160/3



$$q_B = m_p \cdot B = \frac{B}{1000} (k_p \cdot t + G_p) = \frac{800}{1000} (1,3 \cdot 6 + 6,2) = \mathbf{11,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}}$$

Hmotnost dopravního materiálu připadajícího na 1 m délky pásu

$$q_G = \frac{Q_v \rho}{v} = \frac{Q_m}{v} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (7.27)$$

Kde: Q_v – objemový dopravní výkon [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q_m – hmotnostní dopravní výkon [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
 ρ – sypná hmotnost dopravované hmoty [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 v – rychlost pásu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$q_G = \frac{Q_v \rho}{v} = \frac{Q_m}{v} = \frac{212,46}{2,07 \cdot 3,6} = \mathbf{28,51 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}}$$

$$F_H + F_V = 1,45 \cdot 0,0768 \cdot 200 \cdot 9,81 [10,2 + 3,4 + (2 \cdot 11,2 + 28,51) \cdot 1] = \mathbf{14\ 094,7 \text{ N}}$$

Po určení všech dílčích odporů vše do vzorce (7.21). Výsledný odpor (součet hlavních a vedlejších odporů) je odpor základního přímého dopravníku bez žádného stoupání (klesání) a dalších přídatných odporů.

7.2.2 Přídavné odpory

Jelikož z hlediska čistoty, spolehlivosti provozu a údržby působí na dopravník další přídatné odpory:

$$F_S = F_{S1} + F_{S2} = F_\varepsilon + F_{\tilde{\varepsilon}} + F_a \quad [\text{N}] \quad (7.28)$$

Kde: F_ε – odpor vychýlených bočních válečků [N]
 $F_{\tilde{\varepsilon}}$ – odpor čističů pásu [N]
 F_a – odpor shrnovače materiálu [N]



Odpor vychýlených bočních válečků

Pro válečkové stolice se třemi válečky stejné délky

$$F_{\varepsilon} = C_{\varepsilon} \cdot \mu_0 \cdot L_{\varepsilon} (q_B + q_G) g \cdot \cos \delta \cdot \sin \varepsilon \quad [N] \quad (7.29)$$

Kde: C_{ε} – součinitel korýtkovosti [-]

μ_0 – součinitel tření mezi nosnými válečky a pásem (volí se) [-]

L_{ε} – délka dopravníku s vychýlenými válečky [m] ~ 10 m

q_B – hmotnost 1 m dopravního pásu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$]

q_G – hmotnost nákladu na 1 m délky pásu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$]

δ – úhel sklonu dopravníku [$^{\circ}$]

ε – úhel vychýlení osy válečku vzhledem k rovině kolmé k podélné ose pásu [$^{\circ}$] ~ 2 $^{\circ}$

Součinitel korýtkovosti $C_{\varepsilon} = \mathbf{0,4}$ pro sklon bočních válečků 30 $^{\circ}$ a 0,5 u sklonu 45 $^{\circ}$. Součinitel tření mezi nosnými válečky a pásem $\mu_0 = 0,3$ až 0,4 (volím **0,35**)

$$F_{\varepsilon} = 0,4 \cdot 0,35 \cdot 10 (11,2 + 28,51) 9,81 \cdot 1 \cdot \sin 2 = \mathbf{19,03 N}$$

Odpor čističů pásu

Bez ohledu na typ čističů

$$F_{\zeta} = z_c \cdot (0,02 - 0,04) \cdot B \quad [N] \quad (7.30)$$

Kde: z_c – počet čističů pásu [1]

B – šířka pásu [mm]

Volím 5 čističů

$$F_{\zeta} = z_c \cdot 0,03 \cdot B = 5 \cdot 0,03 \cdot 800 = \mathbf{120 N}$$

Odpor shrnovače materiálu

$$F_a = (0,12 - 0,15) \cdot B \quad [N] \quad (7.31)$$

$$F_a = 0,135 \cdot 800 = \mathbf{108 N}$$

$$F_S = F_{S1} + F_{S2} = F_{\varepsilon} + F_{\zeta} + F_a$$

$$F_S = 19,03 + 120 + 108 = \mathbf{247,03 N}$$



7.2.3 Odpor k překonání dopravní výšky

Odpor k překonání dopravní výšky je odpor způsobený zdvihem dopravované hmoty u nakloněného dopravníku. Na rozdíl od ostatních odporů, se dá tento odpor přesně určit.

$$F_{St} = q_G \cdot H \cdot g \quad [N] \quad (7.32)$$

Kde: H – dopravní výška [m]
Volím výšku 5 metrů.

$$F_{St} = q_G \cdot H \cdot g = 28,51 \cdot 5 \cdot 9,81 = \mathbf{1398,41 N}$$

7.2.4 Potřebný provozní výkon dopravníku

Potřebný provozní výkon pohonu na poháněcím bubnu pásového dopravníku vychází z obvodové hnací síly:

$$P_A = F_U \cdot v \quad [W] \quad (7.33)$$

• Celkový dopravní odpor:

$$F_U = F_H + F_V + F_S + F_{St}$$
$$F_U = 14094,7 + 247,03 + 1398,41 = \mathbf{15\ 740,2 N}$$

$$P_A = F_U \cdot v$$
$$P_A = 15740,2 \cdot 2,07 = \mathbf{32\ 582,2 W}$$

Potřebný provozní výkon poháněcího motoru vychází ze vztahu (uvažuje se s účinností převodů):

- pro pásové dopravníky s kladným výkonem pohonu

$$P_M = \frac{P_A}{\eta_1} \quad [W] \quad (7.34)$$

Kde: η_1 – účinnost (0,85 až 0,95) [-]

$$P_M = \frac{P_A}{\eta_1} = \frac{32582,2}{0,9} = \mathbf{36\ 202,4 W}$$

- pro brzděné dopravníky

$$P_M = P_A \cdot \eta_2 \quad [W] \quad (7.35)$$

Kde: η_2 – účinnost (0,95 až 1) [-]

$$P_M = P_A \cdot \eta_2 = 32582,2 \cdot 0,98 = 31\,930,6 \text{ W}$$

HNACÍ MOTOR

ASM DRE 225 M4

SEW KA 107B (kuželočelní převodovka)

- Moment motoru: 292 Nm
- Otáčky motoru: 1470 min⁻¹
- Výstupní otáčky: 72 min⁻¹
- Celkový převodový poměr: 20,41
- Výkon motoru: 45 kW / 50 Hz
- Účinnost (75/100% P_n): 93,8 / 93 %
- Hmotnost motoru: 325 kg



Obr. 31. Hnací motor DRE 225 M4 [21]

7.2.5 Přenos obvodové síly na poháněcím bubnu

V jednotlivých větvích dopravníku jsou různé tahové síly (Obr. 33a.). Pokud jsou úseky (1-2) a (3-4) v porovnání s délkou L mnohonásobně kratší nemusíme s nimi při výpočtech počítat (Obr. 33b.) Tím tedy jsou pro nás pohybové odpory jednotlivých větví rozdíly výšek (F_{OH} , F_{OD}). Na Obr. 32. a rovnici (7.36) je vidět, že síla F_2 je síla F_{Umax} snížena o opásání kolem bubnu:

$$F_{2min} \geq F_{Umax} \frac{1}{e^{\mu\varphi} - 1} \quad [N] \quad (7.36)$$

Kde: F_{Umax} – maximální obvodová hnací síla (při rozběhu nebo brždění) plně zatíženého dopravníku [N]

μ – součinitel tření mezi poháněcím bubnem a pásem (viz Tab.8) [-]

φ – úhel opásání poháněcího bubnu [rad]

$$F_{2min} \geq F_{Umax} \frac{1}{e^{\mu\varphi} - 1}$$

$$F_{2min} \geq 23610,3 \frac{1}{e^{0,42\pi} - 1} = \frac{23610,3}{2,7389} = 8620,4 \text{ N}$$

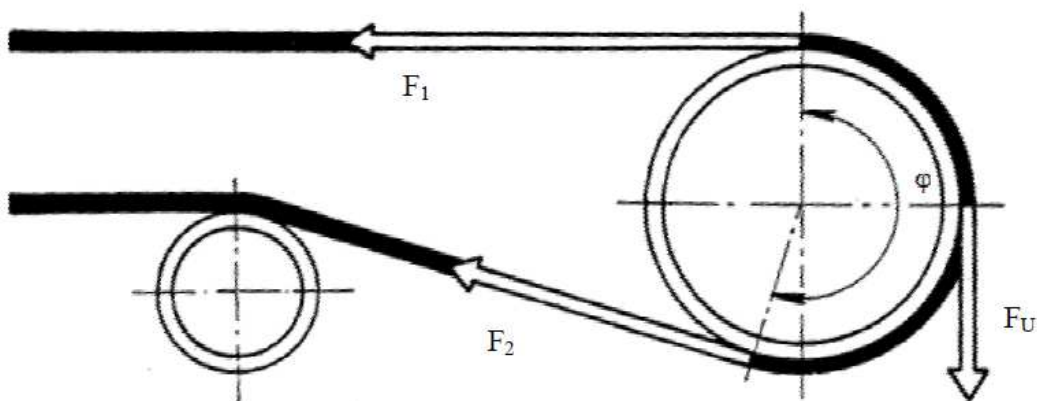
Hodnota úhlu opásání poháněného bubnu se pohybuje podle geometrického uspořádání

➤ 2,8 a 4,2 (160° a 240°)

$$F_{Umax} = \xi \cdot F_U \quad [N] \quad (7.37)$$

$$F_{Umax} = 1,5 \cdot 15740,2 = 23\ 610,3 \text{ N}$$

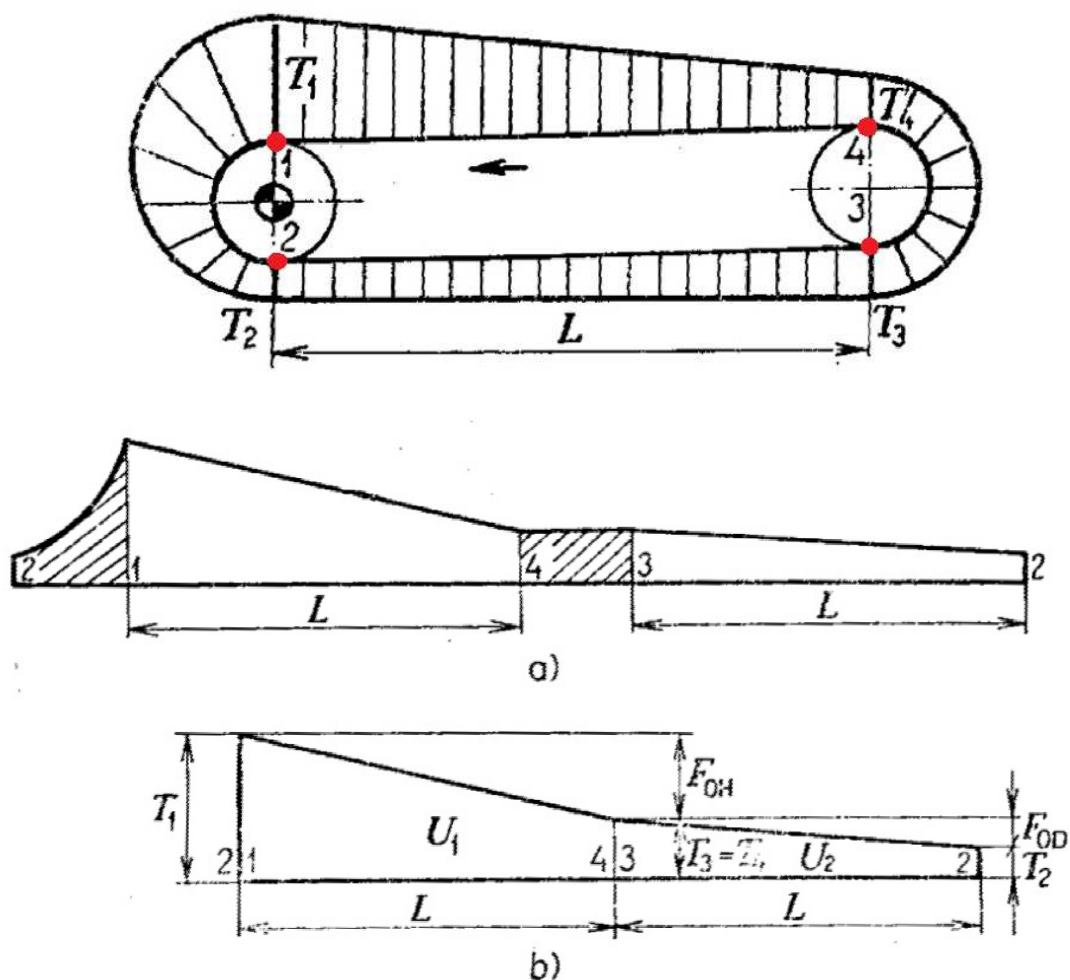
Kde: ξ – součinitel rozběhu (obvodová síla je při rozběhu zařízení větší než při ustáleném chodu (1,3 až 2))



Obr. 32. Obvodová síla v pásu [6]

Stav stykových ploch	Součinitel tření μ , jako funkce bubny			
	Hladký ocelový bubny	Přyzžové obložení, šípové drážky	Polyuretanové obložení, šípové drážky	Keramické obložení, šípové drážky
Suché	0,35 až 0,4	0,4 až 0,45	0,35 až 0,4	0,4 až 0,45
Čisté a mokré (voda)	0,1	0,35	0,35	0,35 až 0,4
Mokré a znečištěné (jíl nebo hlína)	0,05 až 0,1	0,25 až 0,3	0,2	0,35

Tab. 8. Součinitel tření μ mezi poháněcími bubny a pryžovým pásem [22]



Obr. 33. Znázornění sil v pásu



$$T_2 = F_{U_{\max}} = \mathbf{23\ 610,3\ N}$$

$$\begin{aligned} T_3 &= T_2 + C \cdot f \cdot L \cdot g \cdot (q_{RD} + q_B) - q_B \cdot H \cdot g + F_{\xi} + F_a = \\ &= 23610,3 + 1,45 \cdot 0,0768 \cdot 200 \cdot 9,81 \cdot (5,1 + 11,2) - 11,2 \cdot (-5) \cdot 9,81 + 120 + 108 = \mathbf{26850,3\ N} \end{aligned}$$

$$T_4 = T_3 = \mathbf{26850,3\ N}$$

$$\begin{aligned} T_1 &= T_4 + C \cdot f \cdot L \cdot g \cdot (q_{RH} + q_B + q_G) + (q_B + q_G) \cdot H \cdot g = \\ &= 26850,3 + 1,45 \cdot 0,0768 \cdot 200 \cdot 9,81 \cdot (10,2 + 11,2 + 28,51) + (11,2 + 28,51) \cdot (-5) \cdot 9,81 = \\ &= \mathbf{36466,5\ N} \end{aligned}$$

8. Technologičnost výroby

Konstrukce, jak už bylo zmíněno v návrhu, je svařenec z prutů a styčnickových plechů. Aby bylo možné celou konstrukci svařit, hlavně konstrukci zatáček, je zapotřebí svařovacího přípravku. Jsou to v podstatě nastavitelné stojiny, u kterých můžeme nastavit výšku a úhel naklonění.

Postup výroby konstrukce dopravníku, je dán jednotlivým svařováním prutů. Pokud jde o přímý díl, jsou pruty svařovány v jedné rovině. Problém nastává u zatáčky, kde se pruty postupně natáčejí o úhel zatáčky. Ve výrobě horizontální zatáčky, která se natáčí ve vodorovné rovině, není problém s nastavením prutů. Ale u vertikální a kombinované zatáčky už musíme dávat pozor, protože se konstrukce natáčí ve svislé rovině, a abychom byli schopni konstrukci svařit, musíme už využít přípravek pro nastavení prutů. Přípravkem si nastavíme výšku stoupání. Tu si zajistíme šroubem (kolíkem).



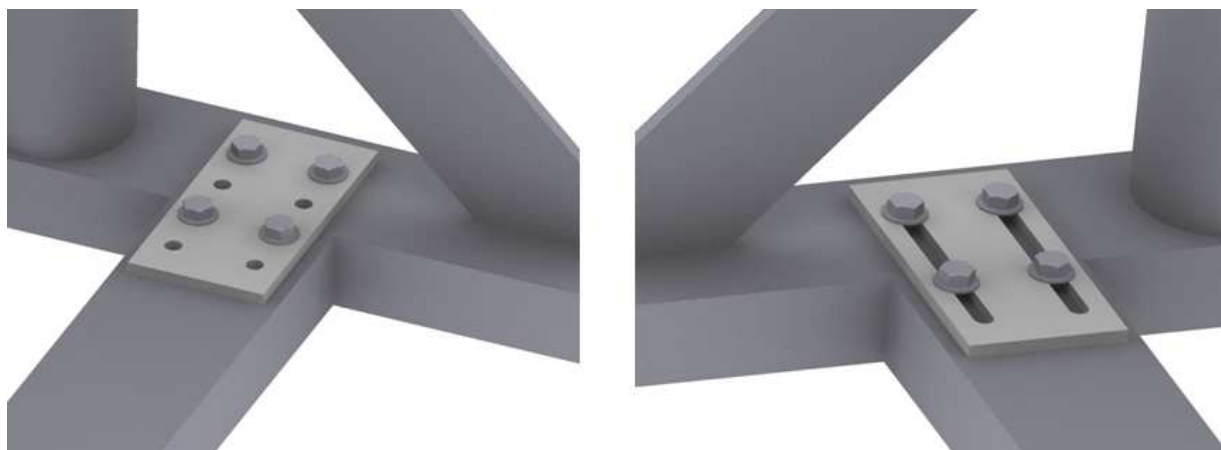
Obr. 34. Přípravek pro svařování

Úhel sklonu se nastavuje pomocí šroubových spojů. Ty se uvolní, nastaví se poloha a poté se opět utáhnout. Horní část je sestavena ze dvou spojů, abychom mohli nastavit sklon v obou směrech, který se využije při výrobě kombinované zatáčky.



Obr. 35. Přípravek – nastavení úhlu sklonu

Z obr. 34 vidíme, že konstrukce přípravku je svařena z jednotlivých profilů. Podstava je z profilů U. Svislé pruty pro nastavení výšky jsou z kruhových trubek. Pro zpevnění se využívá výztuž z plechů. Jelikož je konstrukce dopravníku parametrická, tak i šířka přípravku musí být měnitelná. Vytvořil jsem 2 varianty pro změnu šířky přípravku. 1. Varianta je z příruby, která má v sobě otvory pro šroubové spoje. 2. Varianta je téměř stejná, liší se pouze tím, že místo otvorů má drážky pro komplexnější změnu šířky.



Obr. 36. Přípravek – změna šířky (2 varianty)



9. Závěr

Ve své práci jsem proveden návrh zatáčky hadicového dopravníku. Byl vytvořen model zatáčky dopravníku (horizontální, vertikální a kombinované) v programu Inventor 2009. V programu je možné měnit rozměry dle tabulky parametrů v MS Excel. Následně jsem provedl statický výpočet 2D a kontrolu dle eurokódu 3D konstrukce. U statického výpočtu se určily síly a napětí v jednotlivých prutech a následně se porovnaly s výsledky jinou metodou (analytika, MKP). Kontrolou 3D konstrukce v softwaru RFEM 5 bylo ověřeno, zda odpovídá normám (eurokód 3) při zadaném zatížení (vnější síly, hmotnost a vítr). Dále jsem určil potřebný výkon pohonu při zadaných parametrech. Dopravník je poháněn asynchronním motorem ASM DRE 225 M4 s kuželočelní převodovkou o výkonu 45 kW. Nedílnou součástí mé práce bylo provedeno navržení pomocného přípravku pro svařování konstrukce vertikální a kombinované zatáčky. Poslední část mé práce bylo vytvoření výkresové dokumentace daných konstrukcí jednotlivých zatáček dopravníku. Celá diplomová práce byla ve spolupráci s firmou VVV Most spol. s.r.o.



10. Seznam obrázků

Obr. 1. Věžový jeřáb	11
Obr. 2. Pásový dopravník	12
Obr. 3. Kolejová nákladní doprava	12
Obr. 4. Těžká pásová doprava	13
Obr. 5. Lehká pásová doprava.....	14
Obr. 6. Schéma pásového dopravníku	15
Obr. 7. Průřez hadicovým dopravníkem.....	16
Obr. 8. Hadicový dopravník	17
Obr. 9. U-dopravník	18
Obr. 10. Profily daných typů dopravníku	18
Obr. 11. Předběžný návrh tratě.....	21
Obr. 12. Konstrukce hadicového dopravníku – vertikální zatáčka směrem dolu.....	22
Obr. 13. Válečková stolice hadicového dopravníku.....	23
Obr. 14. Vertikální zatáčka směrem dolu	24
Obr. 15. Vertikální zatáčka směrem dolu – pohled ze strany.....	24
Obr. 16. Horizontální zatáčka směrem doprava	25
Obr. 17. Horizontální zatáčka směrem doprava – pohled ze shora	25
Obr. 18. Kombinovaná zatáčka	26
Obr. 19. Mezní stav únosnosti.....	29
Obr. 20. Mezní stav použitelnosti	30
Obr. 21. Vertikální zatáčka s označením pro styčnickovou metodu.....	32
Obr. 22. Zatížení konstrukce v abaqusu	34
Obr. 23. Výsledky v abaqusu	34
Obr. 24. Konstrukce + deformace – RFEM 5	36
Obr. 25. Mapa oblastní větru	40
Obr. 26. Závislost součinitele expozice na výšce.....	42
Obr. 27. Obtékání tělesa	45
Obr. 28. 3D konstrukce se zatížením	46
Obr. 29. Vyhodnocení 3D konstrukce v RFEM 5	47
Obr. 30. Teplotní součinitel.....	51
Obr. 31. Hnací motor DRE 225 M4	56
Obr. 32. Obvodová síla v pásu	57
Obr. 33. Znázornění sil v pásu	58
Obr. 34. Přípravek pro svařování	60
Obr. 35. Přípravek – nastavení úhlu sklonu	61
Obr. 36. Přípravek – změna šířky (2 varianty)	61



11. Seznam tabulek

Tab. 1. Síly v prutech - styčnicková metoda	33
Tab. 2. Síly v prutech - MKP.....	35
Tab. 3. Síly v prutech – RFEM 5.....	37
Tab. 4. Oblasti větrných podmínek	39
Tab. 5. Kategorie terénu	41
Tab. 6. Součinitelé tlaků a sil	43
Tab. 7. Přepřavované materiály	48
Tab. 8. Součinitel tření μ mezi poháněcími bubny a pryžovým pásem	58

12. Seznam příloh

Příloha č. 1: Výpočet sil v prutech - rovnice styčnickové metody

Příloha č. 2: Výpočet sil v prutech - MS Excel

Příloha č. 3: Výkres - Rám vertikální zatáčky dolů (A3)

Příloha č. 4: Model 3D - RFEM 5



13. Literatura a zdroje

- [1] Polák, Pavliška, Slíva - *Dopravní a manipulační zařízení I.*
Vysoká škola báňská Ostrava
http://www.342.vsb.cz/pol25/Polak_DaMZ_1_NP.pdf
- [2] Československá státní norma - ČSN 73 0035 - *Zatížení stavebních konstrukcí*
Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření Praha; 1976
- [3] Prof. Ing. Jiří Studnička - *Navrhování nosných konstrukcí*
- [4] <http://cbmontservis.cz/nase-technika/vezovy-jezab-mb-1030.1/>
Věžové jeřáby
- [5] http://spz.logout.cz/album/cz/cz_sdkd1845_a.html
Kolejová doprava
- [6] Ing. Jiří Mrázek, Ph.D, prof. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph.D. - *Pásové dopravníky*
České vysoké učení technické v Praze, 2012
- [7] <http://stavebni-technika.cz/clanky/jakos-spol-sro-vyrobce-pasove-dopravy>
Stavební technika JAKOS, spol. s.r.o.
- [8] <http://www.alta.cz/vyroba-a-obchod/tezebni-prumysl/povrchova-tezba/dalkova-pasova-doprava/>
ALTA, a.s.
- [9] PELC, David. *Návrh koncepce pásového dopravníku s uzavřeným dopravním profilem a ocelovým lanem jako nosným elementem*
http://stc.fs.cvut.cz/History/2005/Papers/D1/PELC_DAVID_U12120_5.pdf
- [10] CAD.cz
<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2244-hadicovy-dopravnik-bez-pevneho-zakladu-.html>
- [11] VVV Most spol. s.r.o.
<http://www.vvvmost.cz/hadicove-dopravniky-a-u-dopravniky/>
- [12] Schenck Process
<http://www.schenckprocess.cz/tedo-hadicovy-dopravnik/>
- [13] BLUETECH
<http://www.bluetech.cz/pasove-dopravniky>
- [14] Dlubal software s.r.o.
<https://www.dlubal.com/en/>
- [15] Dlubal software s.r.o. – *Přídavný modul EC3*
https://www.dlubal.com/de/download/manual/cz/steel_ec3_cz.pdf



- [16] Působení větru
<http://www.fce.vutbr.cz/BZK/svarickova.i/pdf/BL05/zat%C3%AD%C5%BEen%C3%AD%20v%C4%9Btrem.pdf>
- [17] Obtékání tělesa
http://kvintahtml.wz.cz/fyzika/mechanika/tekutiny/obtekani_teles_realnou_tekutinou.htm
- [18] Mezní stavy EC3
http://fast10.vsb.cz/krejsa/studium/pp_tema03.pdf
- [19] HANÁČEK, Zdeněk DP – *Pásový dopravník*
Brno, 2006 – VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [20] ČSN 26 3102 – *Pásové transportéry*
Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, Praha 1970
- [21] SEW Eurodrive
<http://www.sew-eurodrive.cz/>
- [22] ČSN ISO 5048 – *Zařízení pro plynulou dopravu nákladů. Pásové dopravníky s nosnými válečky. Výpočet výkonu a tahových sil*
Český normalizační institut, Praha 1994
- [23] Prutová konstrukce – výpočet soustavy
http://www.kme.zcu.cz/kmet/mechb/download/MECHB_p12_Prutove_soustavy_stycnikova_metoda.pdf
- [24] ČSN ISO 5048. *Zařízení pro plynulou dopravu nákladů. Pásové dopravníky s nosnými válečky. Výpočet výkonu a tahových sil.* Praha: Český normalizační institut, 1994, 15 s.