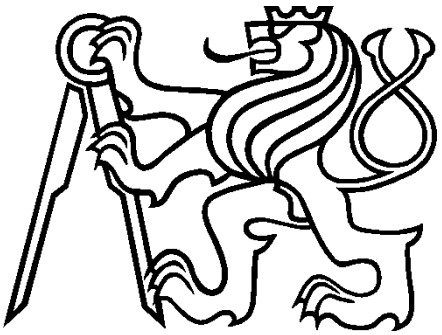
České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

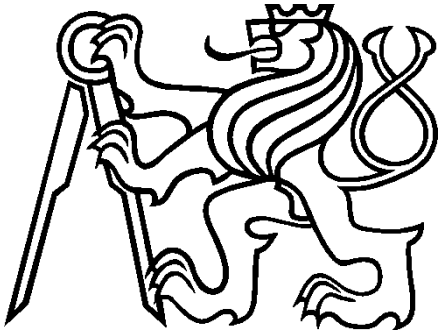
Bakalářská práce



2016 Hynek Řehořek

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební



Hynek ŘEHOŘEK

ZESILOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ TAŽENÝMI PRVKY

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Mikeš, Ph.D.

Praha 2016

Jméno a příjmení autora:	Hynek Řehořek
Studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce pozemních staveb
Akademický rok:	2015/2016
Zadávací katedra:	Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Název bakalářské práce:	Zesilování dřevěných konstrukcí taženými prvky
Název v angličtině:	Strenghtening of timber structures by tensiselement

Anotace v češtině

Tato práce se zabývá historií, vhodností využití a optimalizací vzpínadlových nosných konstrukcí. Dále postupně staticky analyzuje střešní konstrukci nad zadaným půdorysem. Nejprve s využitím prostě uloženého lepeného nosníku, který bude poté postupně zesilován jednoduchým a dvojitým vzpínadlem. Na této aplikaci bude analyzována míra výhodnosti vzpínadlové konstrukce z hlediska využití materiálu. Jako závěr bakalářské práce je aplikace tzv. optimalizace nejvhodnějšího návrhu k získání nejvyšší míry využití všech prvků konstrukce. Veškeré výpočty jsou provedeny dle platných evropských norem zavedených do seznamu českých norem ČSN EN.

Klíčová slova v češtině

jednoduché vzpínadlo, dvojité vzpínadlo, optimalizce, ocelová táhla, excentricita, dřevěná konstrukce zastřešení

English annotation

This work is dealing with history, suitability of use and optimization of raising supporting constructions. Then it statistically analyses roof construction over the top view assigned. Firstly with the use of simply laid glued beam, then it will be becoming stronger by the simple and double raising construction. On this application will be analysed measure of advantageousness of the raising construction from the point of view of using materials. As the end of the bachelor´s thesis is using of optimization of the most suitable plan to gain the highest measure of using the construction elements. All the calculations are executed according to valid European standards established into the list of Czech standards ČSN EN.

keywords

Simple reinforced girder, double girder reinforced, optimization, steel rods, eccentricity, wooden roof structure

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci zaměřenou na téma *Zesilování dřevěných konstrukcí taženými prvky,* jsem vypracoval samostatně pod dohledem vedoucího bakalářské práce a s využitím odborné literatury a jiných informačních zdrojů, které jsou citovány a uvedeny v závěrečné části této bakalářské práce.

V Praze dne: 22.5.2016

…….

(Podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Mikešovi, Ph.D. za jeho cenné rady, odborný přístup a značnou trpělivost při zpracování této bakalářské práce.

…….

(Podpis autora)

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

studijní program: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ
studijní obor: KONSTRUKCE POZEMNÍCH STAVEB
akademický rok: 2015/2016

Jméno a příjmení studenta: HYNEK ŘEHOŘEK
Zadávající katedra: KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ
Vedoucí bakalářské práce: Ing. KAREL MIKEŠ, Ph.D.
Název bakalářské práce: STRENGHTENING OF TIMBER STRUCTURES BY TENSILE
Název bakalářské práce v anglickém jazyce: ZESILOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ TAŽENÝMI PRVKY

Rámcový obsah bakalářské práce: Úvodní analýza, návrh vzpěrného a momentového zesílení a jejich posouzení s různých hledisek

Datum zadání bakalářské práce: 23.2.2016 Termín odevzdání: 22.5.2016
(vyplňte poslední den výuky příslušného semestru)

Pokud student neodevzdal bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu bakalářskou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č. 111/1998. (SZŘ ČVUT čl. 21, odst. 4)

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

OBSAH

1. Seznam tabulek..... 8
2. Seznam grafů..... 8
3. Seznam obrázků..... 8
4. Úvod..... 9
5. Vzpínadla..... 9
   - 5.1. Druhy vzpínadel..... 10
   - 5.2. Historie vzpínadel..... 10
   - 5.3. Moderní pojetí vzpínadel..... 11
   - 5.4. Problematika vzpínadel..... 13
   - 5.5. Analýza použití vzpínadla..... 14
6. Výpočet zatížení..... 16
7. Analýza použití prostého nosníku..... 21
   - 7.1. Návrh hlavního nosného trámu..... 21
8. Aplikace jednoduchého vzpínadla..... 23
   - 8.1. Popis silové metody..... 23
   - 8.2. Vlastní výpočet vnitřních sil..... 27
   - 8.3. Návrh prvků vzpínadla..... 28
9. Aplikace dvojitého vzpínadla..... 33
   - 9.1. Výpočet vnitřních sil..... 35
   - 9.2. Návrh prvků vzpínadla..... 37
   - 9.3. Shrnutí..... 42
10. Optimalizace dvojitého vzpínadla..... 42
    - 10.1. Vzepětí dvojitého vzpínadla..... 42
      - 15.1.1. Vliv vzepětí na normálovou sílu..... 43
      - 15.1.2. Vliv vzepětí na průběh momentů..... 43
    - 10.2. Rozmístění podpor dvojitého vzpínadla..... 43
    - 10.3. Aplikace optimalizace..... 45
    - 10.4. Shrnutí..... 48
    - 10.5. Úprava roztečí vzpěr 48
    - 10.6. Návrh prvků optimalizovaného vzpínadla..... 49
11. Závěr..... 54
12. Seznam použité literatury..... 57
13. Seznam použitých norem..... 58

1. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Kombinace zatížení…… 20
Tabulka 2 Spotřeba materiálu – prostý nosník …… 54
Tabulka 3 Spotřeba materiálu – jednoduché vzpínadlo…….. 55
Tabulka 4 Spotřeba materiálu – dvojité vzpínadlo…….. 55
Tabulka 5 Spotřeba materiálu – optimalizace dvojitého vzpínadla…… 55

2. SEZNAM GRAFŮ

graf 1.: Vývoj momentu na prostém nosníku v závislosti na rozpětí…….. 22
graf 2.: Průběh normálové síly táhla se zvyšováním vzepětí…… 43
graf 3.: Vliv vzepětí na průběh momentů…… 43
graf 4.: Ohybový moment ve vztahu k umístění podpor…….. 44
graf 5.: Porovnání nákladů na realizaci jednotlivých konstrukcí…… 56
graf 6.: Porovnání hmotností jednotlivých konstrukcí…….. 56

3. SEZNAM OBRÁZKŮ

obr.1.: Geometrické tvary vzpínadel…… 10
obr.2.: Vzpínadlo z publikace *Lehrbuch der Eisenkonstruktionen…….. 11*
obr.3.: Budova ústředí ČSOB v Radlicích…… 12
obr.4.: Lávka pro pěší a cyklisty v Hradci Králové…… 12
obr.5.: Lávka u muzea Muziekgebouw aan v Amsterodamu…… 13
obr.6.: Stabilita konstrukce při rozdílném zatěžování…… 13
obr.7.: Schematický řez objektem…… 14
obr.8.: Schematický půdorys objektu…… 15
obr.9.: Skladba střešní konstrukce…… 16
obr.10.: Schéma prostého trámu…… 21
obr.11.: Schéma jednoduchého vzpínadla…… 25
obr.12.: Schéma řešení pro silovou metodu jednoduché vzpínadlo…… 26
obr.13.: Schematické vykreslení vnitřních sil – jednoduché vzpínadlo…… 28
obr.14.: Deformace jednoduchého vzpínadla…… 28
obr.15.: Schéma dvojitého vzpínadla…… 34
obr.16.: Schéma řešení pro silovou metodu jednoduché vzpínadlo…… 35
obr.17.: Schematické vykreslení vnitřních sil…… 37
obr.18.: Deformace jednoduchého vzpínadla…… 37
obr.19.: Průběh momentů se symetricky uspořádanými vzpěrami 4m…… 44
obr.20.: Vliv parametrů a umístění vzpěr na průběh momentů…… 44
obr.21.: Vliv tuhosti prvků na průběh momentů…… 45
obr.22.: Průběh vnitřních sil bez vlivu excentricity, tuhost táhla nízká…… 46
obr.23.: Průběh vnitřních sil malá tuhost táhla, excentricita 150mm…… 46
obr.24.: Průběh vnitřních sil bez vlivu excentricity tuhé táhlo…… 47
obr.25.: Průběh vnitřních sil tuhé táhlo excentricita 150mm…… 47
obr.26.: Průběh vnitřních sil tuhé táhlo excentricita 150mm, L_k=4,05m…… 48
obr.27.: Deformace jednoduchého vzpínadla…… 49

4. ÚVOD

Konstrukce vzpínadla se dnes často aplikuje v podobě oblíbené moderní a architektonické konstrukce, avšak jeho použití je známo a úspěšně se používá ve stavebnictví již staletí.

Vzpínadla se nejčastěji využívají v pozemním stavitelství jako nosné konstrukce zastřešení. Četné využití nalezneme i v dopravních konstrukcích, jako mosty a lávky pro pěší.

Největší výhodou této konstrukce je její efektivita využití jednotlivých nosných prvků, což může být zásadní při rozhodování a výběru typu nosné konstrukce. Vzhledem k současné ekonomické situaci na trhu a hledání stále nových a ekonomičtějších řešení konstrukcí, se vzpínadlo jeví jako vhodná alternativa k masivním plnostěnným nosníkům.

Všechny tyto předpoklady vedou k tzv. diverzifikaci neboli rozrůzňování nosných prvků na tlačené a tažené pruty. Tento proces vede k efektivnímu využití jednotlivých prvků konstrukce. Tedy zefektivňujeme průběh sil na konstrukci, minimalizuje vliv ohybového namáhání a vede k maximálnímu využití konstrukce.

Další proces, kterým se předložená práce zabývá, se nazývá optimalizace.
Optimalizace, je snaha o nalezení takových hodnot proměnných, pro které nabývá daná cílová či objektivní funkce minimální či maximální hodnoty [1].
Jinými slovy je optimalizace hledání řešení mezi několika případnými návrhy, které můžeme označit jako nejvhodnější, vhodné, ale i ty nevhodné a právě proces optimalizace má za cíl nalézt nejefektivnější řešení konstrukce a to jak z hlediska geometrického, estetického, tak i ekonomického. Právě ekonomické hledisko je v dnešní době to nejčastěji upřednostňované.

Konstrukcí vzpínadel se zabývá řada publikací, v rámci této bakalářské práce bude řešena aplikace vzpínadlové konstrukce nad konkrétním půdorysem a budou porovnávány návrhy z hlediska spotřeby materiálu i ceny.

V rámci návrhu zastřešení zadaného půdorysu, nejprve bude využit prostě uložený lepený lamelový nosník, který bude následně doplněn jednoduchým a dvojitým vzpínadlem.

Závěrem této práce bude řešena problematika výběru nejvhodnější konstrukce zastřešení pro již zmíněný konkrétní příklad. A dále optimalizace, během které bude empiricky navržená konstrukce upravena tak, aby za daných podmínek dosahovala maximálního využití materiálu.

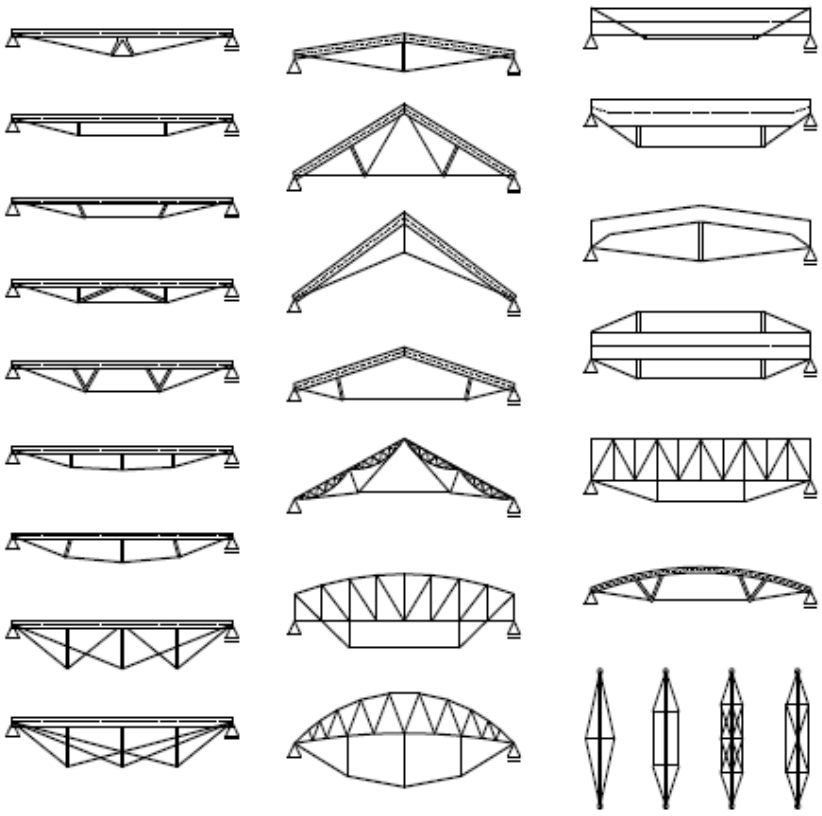
5. VZPÍNADLA

Pokud budeme chtít obecně charakterizovat konstrukci vzpínadla, můžeme říct,
že se jedná o úpravu nebo doplnění prostě ohýbaných prvků, kdy se část ohybových napětí převede pomocí doplněných táhel na napětí tahová a tlaková, čímž dojde k efektivnějšímu využití materiálu celé konstrukce.

Ohýbaný nosník je doplněn kloubově uloženými ocelovými táhly. Táhla mohou být uložena centricky, popřípadě excentricky, kdy excentricita snižuje momentové účinky vyvozené na hlavní nosný trám. Ocelové táhlo může být použito buď jednoduché, nebo dvojité. Při použití dvojitého táhla je využito vyšší tuhosti konstrukce. Střední pružné podpory mají větší tuhost a pozitivně ovlivňují průběh momentů na hlavním trámu. Poslední prvek v konstrukci vzpínadla je vzpěrný prut – sloupek, který zajišťuje vzepětí táhla a je namáhán na tlak a vzpěr.

Vzpínadla jsou v současnosti velmi oblíbenou konstrukcí, kterou je možno výhodně použít v takových případech, kdy je k dispozici dostatek konstrukční výšky, tj. pokud není omezená technologickými anebo jinými podmínkami [2].

5.1. DRUHY VZPÍNADEL

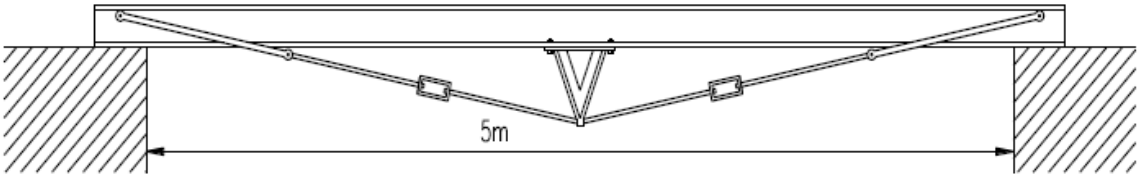


obr.1 Geometrické tvary vzpínadel

5.2. HISTORIE VZPÍNADEL

Jako první přišel s myšlenkou zkombinovat plnostěnné dřevěné nosníky s ocelovými táhly Friedrich August Stüler při zastřešení výstavní síně muzea Neues v Berlíně. Konstrukce předpjatého trojúhelníkového vzpínadla byla ale popsána až v roce 1876 v knize německého stavebního inženýra Eduarda Brandta *Lehrbuch der Eisenkonstruktionen* (obr. 2). Velkými průkopníky ocelových konstrukcí s táhly byli inženýři Wiegmann a Polonceau, kteří v roce 1836 respektive 1839 představili střešní nosný systém Polonceau, kompletně realizovaný z oceli. Tento systém byl v následné době použit u

mnoha důležitých staveb, například při rekonstrukci nádraží St. Lazare v Paříži mezi lety 1852-54, kdy architekt Alfred Armand a konstruktér Eugène Flachat překlenuli rozpon 40 metrů. V roce 1869 byla při stavbě nádraží d`Austerlitz v Paříži (obr. 2-3) překonána vzdálenost 52,55 metrů, stavba byla realizována inženýrem Louisem Sévènem a architektem Pierre-Louisem Renaudem. [3].



obr. 2: Vzpínadlo z publikace *Lehrbuch der Eisenkonstruktionen* [3]

5.3. MODERNÍ POJETÍ VZPÍNADEL

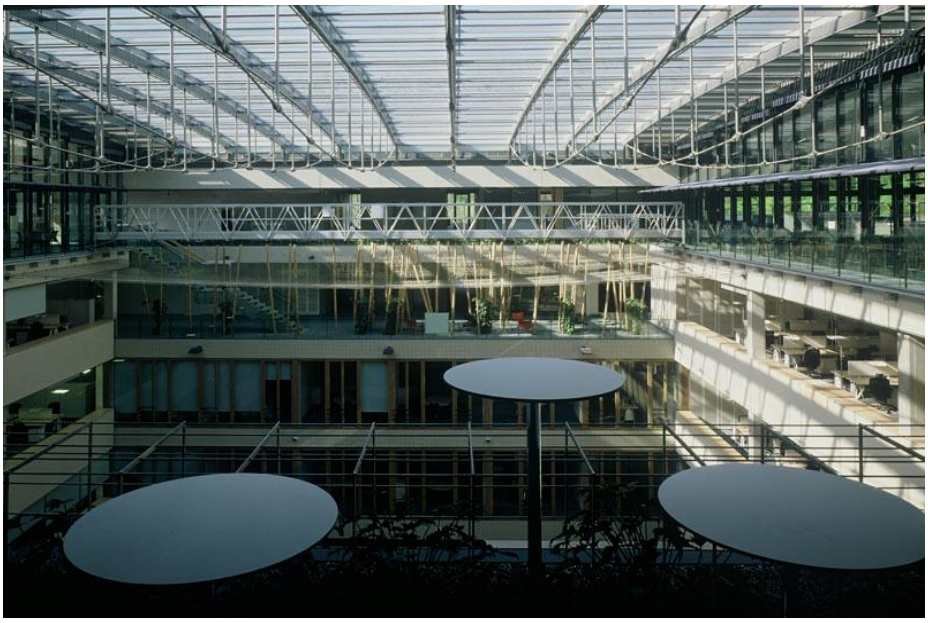
Od první aplikace vzpínadlové konstrukce uplynula značná doba, avšak princip této jedinečné konstrukce se téměř nezměnil. Vzpínadlové konstrukce se dnes používají pro zastřešení objektů, jako mostní konstrukce, ale i jako vyztužení sloupů. Dnes se s úspěchem využívají vzpínadla hlavně v případech, kdy potřebujeme překlenout velké vzdálenosti. Pro značná rozpětí je vždy rozhodující II.MS a zde můžeme použitím vzpínadla znamenat výraznou úsporu materiálu.

Vzpínadlo má ze všech konstrukcí nejefektivnější využití materiálu, velkou tuhost a variabilitu návrhu. Vzhledem k těmto všem předpokladům sestává velice oblíbenou konstrukcí u architektů, kdy i přes velké únosnosti konstrukce působí velice vzdušně.

Nevýhodou vzpínadla je jeho náchylnost na asymetrické zatížení. Je nutná kompenzace za použití těžkého zastřešení, jako například u budovy ČSOB (obr.3), kdy bylo vzpínadlo zatíženo skleněným zastřešením a poměr mezi asymetrickým a symetrickým zatížením byl snížen právě symetrickou složkou zatížení od střešního pláště. Jako další nevýhodu můžeme uvést požární odolnost konstrukce, kdy jsou konfrontovány jednotlivé obory stavebnictví. Zatímco z hlediska statiky je snaha hlavní nosný trám co nejvíce optimalizovat, redukovat jeho průřez a značnou část konstrukce převést do normálových sil v táhle, stojí naproti tomu požární bezpečnost konstrukce, kdy při požáru je nechráněné ocelové táhlo vystaveno extrémním teplotám. Při teplotách 500°C se snižuje únosnost ocelového táhla na 75%, při 620°C na 27% a při 640°C dokonce na 18%, přičemž teploty při požáru v úrovni střešní konstrukce můžou dosáhnout až 1200°C.

Z tohoto hlediska lze shledat tuto konstrukci jako značně nevýhodnou, kdy již při relativně nízkých teplotách dochází k protažení táhla, zvýšení momentů na hlavním nosném trámu a tím dochází ke kolapsu celé konstrukce. Avšak při požáru je možné prokázat, že konstrukce splní I.MS i bez táhla, zatímco průhyb se v takovém případě neřeší – samotný nosník splní požadavek pro I.MS při požáru a vzpínadlo splní požadavek II.MS v běžném stavu.

Příklady některých současných konstrukcí:



obr. 3.: Budova ústředí ČSOB v Radlicích [12]

obr. 4.: Lávka pro pěší a cyklisty v Hradci Králové [13]

obr. 5 Lávka u muzea Muziekgebouw aan v Amsterodamu [14]

5.4. PROBLEMATIKA VZPÍNADEL

Možnosti předpínání

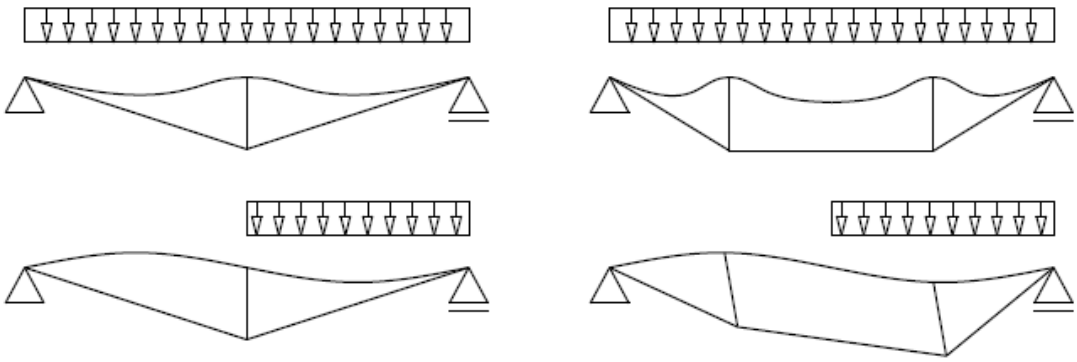
Vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání vzpínadel, je tato konstrukce velice vhodná k předpínání. Předepnutí můžeme provést několika způsoby. Nejběžnější je aplikace tzv. přerušeného táhla, kdy je táhlo osazeno rektifikační spojkou, která vnáší dodatečné napětí do konstrukce. Dalším způsobem je například uchycení předehřátého táhla, upevnění táhla na pružně předepnutý trám a nadvýšení trámu před osazením táhla.

Všechny tyto způsoby vnáší do konstrukce momenty a deformace opačné k těm vyvolaným silovým zatížením. Vhodným předepnutím mohou být minimalizovány momentové účinky působící na hlavní nosník. Je ale důležité pamatovat na maximální hranici předpětí, aby se návrh nestal neekonomickým z hlediska nadbytečného průměru táhla a v něm působících extrémních sil.

Zajištění stability

V hlavním nosníku vznikají, kromě momentových a smykových namáhání, také značné normálové síly, které mají tendenci vybočit nosník jak ze své roviny, tak i ve své rovině. Proto je nutný návrh ztužení konstrukce.

Nezanedbatelný je také vliv polohy a charakter zatížení na nosníku - vysvětleno na obr. 6. Tlačený nosník vykazuje rozdílnou tuhost ve vzpěru při rovnoměrném a nerovnoměrném zatížení. Tento jev souvisí s rozdílnou vzpěrnou délkou obou případů.



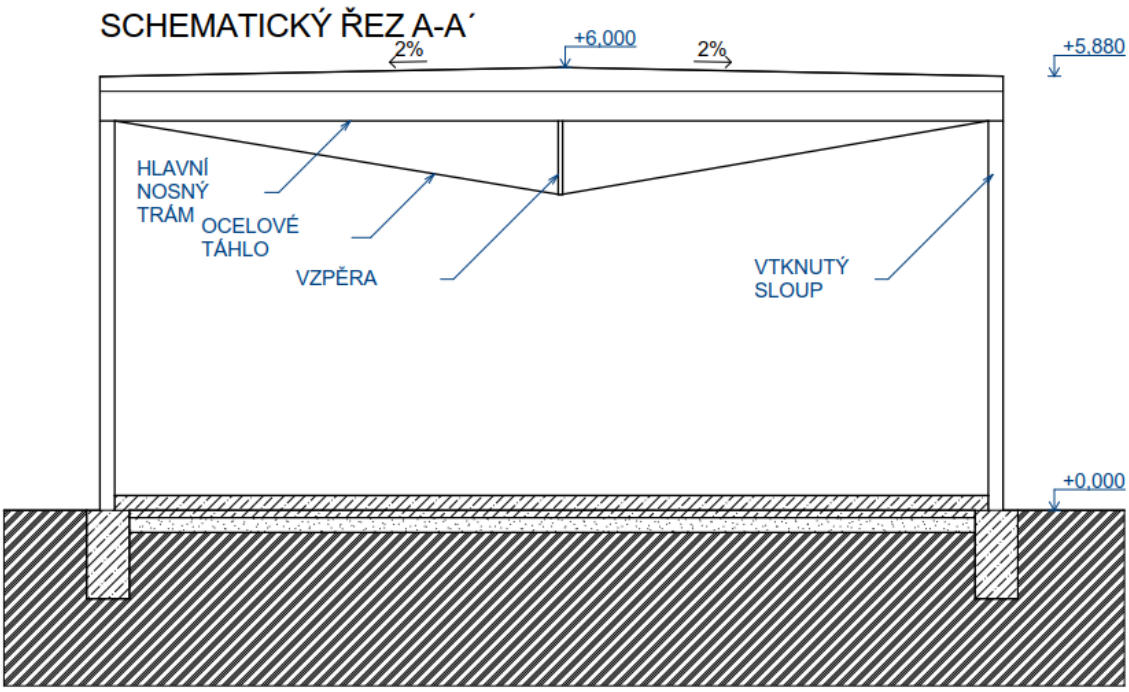
obr. 6: – Stabilita konstrukce při rozdílném zatěžování [3]

5.5. Analýza použití vzpínadla

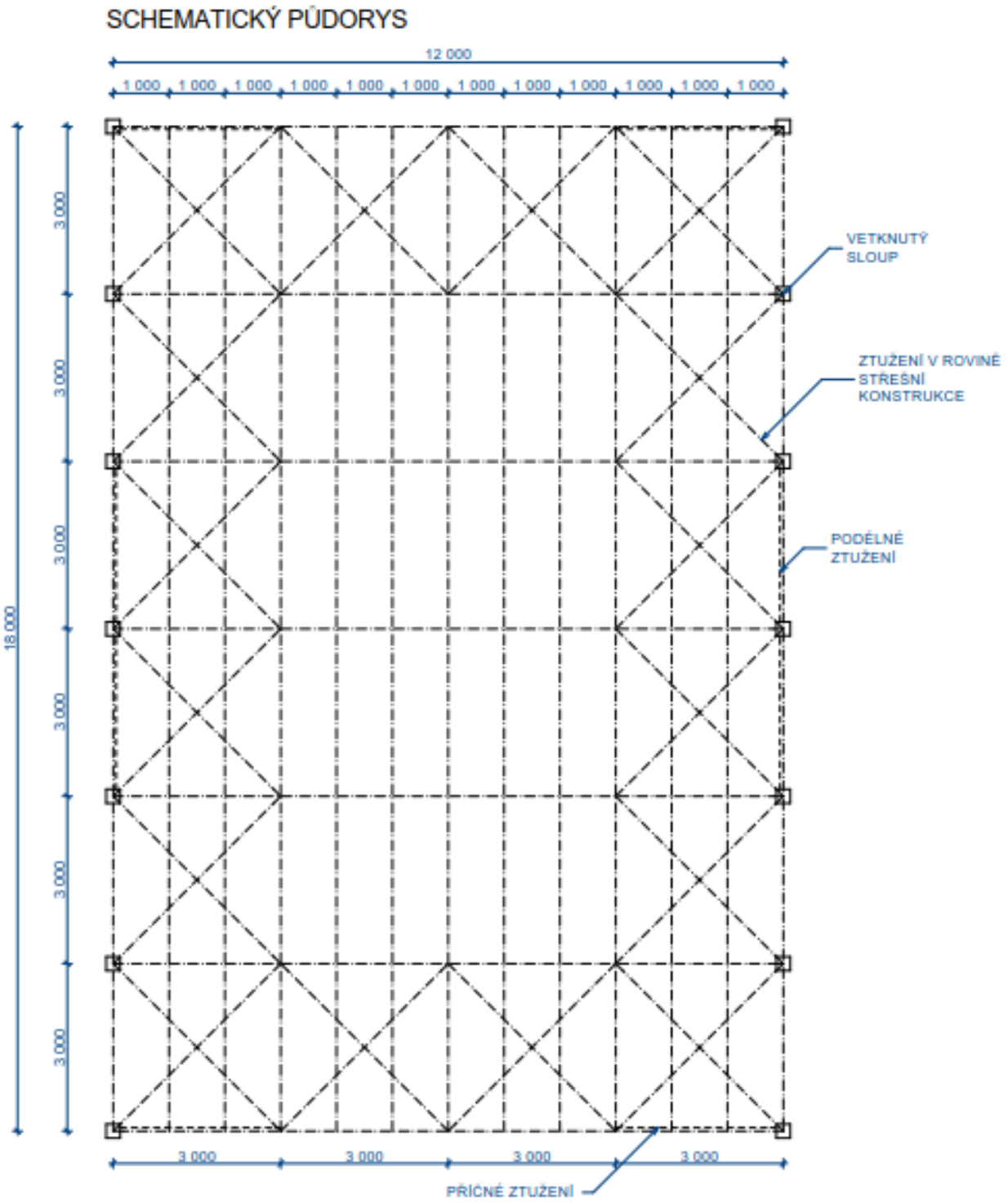
Nad zadaným půdorysem budou postupně navrženy tři různé způsoby zastřešení. Jedná se o halový objekt s rozpětím 12m, délka objektu je 18m, nosná konstrukce střechy bude prostě uložena na vetknutých ocelových sloupech o rozteči 3m. Ztužení objektu bude zajištěno ocelovými táhly dle schématu na str. 15.

Nejprve bude navržen jednoduchý trám bez vzpínadla, bude zanalyzována jeho náročnost na provádění, množství použitého řeziva a efektivita využití. Dále bude prostý ohýbaný nosník doplněn jednoduchým a nakonec ve třetí variantě dvojitým vzpínadlem.

Závěrem bude shrnuto použití všech metod zastřešení a stanovení té nejvhodnější pro daný případ.



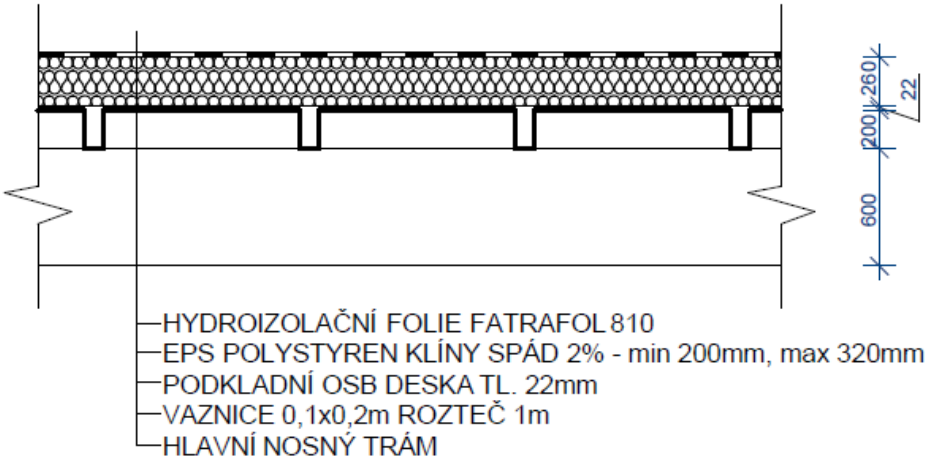
obr.7. Schematický řez objektem (varianta s jednoduchým vzpínadlem)



obr.8.: Schematický půdorys konstrukce střechy objektu

Nejprve bude navržena skladba konstrukce, stanoveno zatížení na hlavní nosný trám a poté budou postupně analyzována jednotlivá řešení.

skladba střešní konstrukce



obr.9.: skladba střešní konstrukce

6. Výpočet zatížení

Stálé plošné zatížení:

Stanovení plošného zatížení od vrchních částí konstrukce.

Vlastní tíha vaznice:

$F_{vaz.k}$ =V x ρ=1.0,1.0,2.4,7=0,1kN/m

Vlastní tíha nosného trámu:

(zatěžovací plocha 3m^2) $F_{tr.k}$ =V x ρ=(1*0,5*0,22*4,7)/3
=0,172 kN/m^2

Skladba konstrukce střechy	*charakteristické*	λ_f	*návrhové*
hydroizolace Fatrafol 810 mPVC 1,5mm	0,020 kN/m^2	1,35	0,027 kN/m^2
OSB deska 22mm	0,143 kN/m^2	1,35	0,193 kN/m^2
Vlastní tíha vaznic	0,100 kN/m^2	1,35	0,135kN/m^2
Vlastní tíha trámu (odhad)	0,173 kN/m^2	1,35	0,233kN/m^2
∑	0,436 kN/m^2	∑	0,589 kN/m^2

Užitné plošné zatížení:

montážník (střecha kategorie H)	0,750 kN/m^2	1,5	1,125 kN/m^2

Pozn. 1: Lze předpokládat, že qk působí na ploše A, která může být stanovena v národní příloze. Doporučená hodnota A = 10 m^2 , v rozmezí od nuly až do celkové plochy střechy.

Pozn. 2: Na střechách kategorie H se nemá uvažovat současné působení užitných zatížení a zatížení sněhem nebo větrem.

Zatížení sněhem

sněhová oblast 1

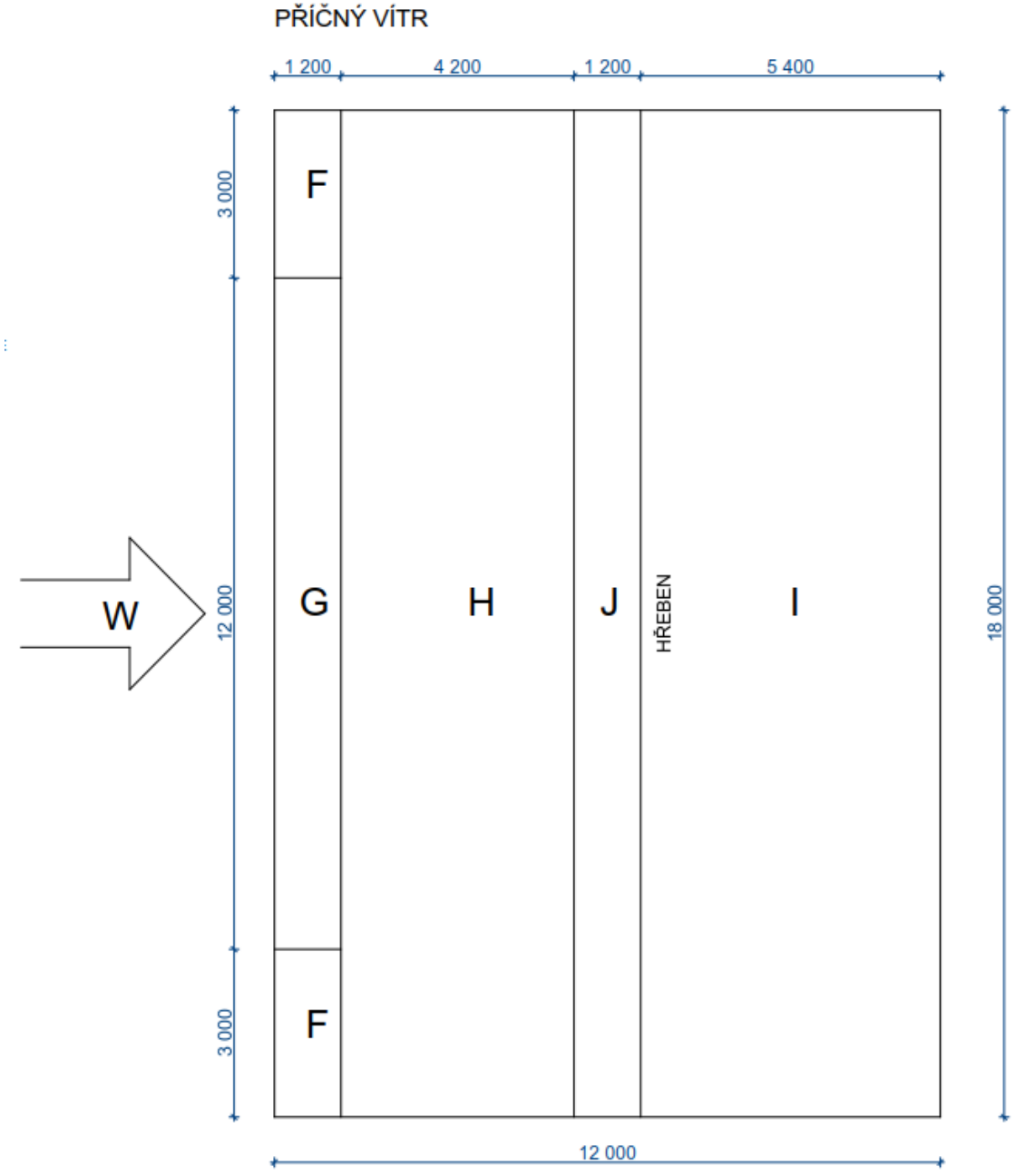
$s_k = \mu_i . c_e . c_t . s_k = 0,8 . 1,0 . 1,0 . 0,70 = 0,56 \text{ kN/m}^2$

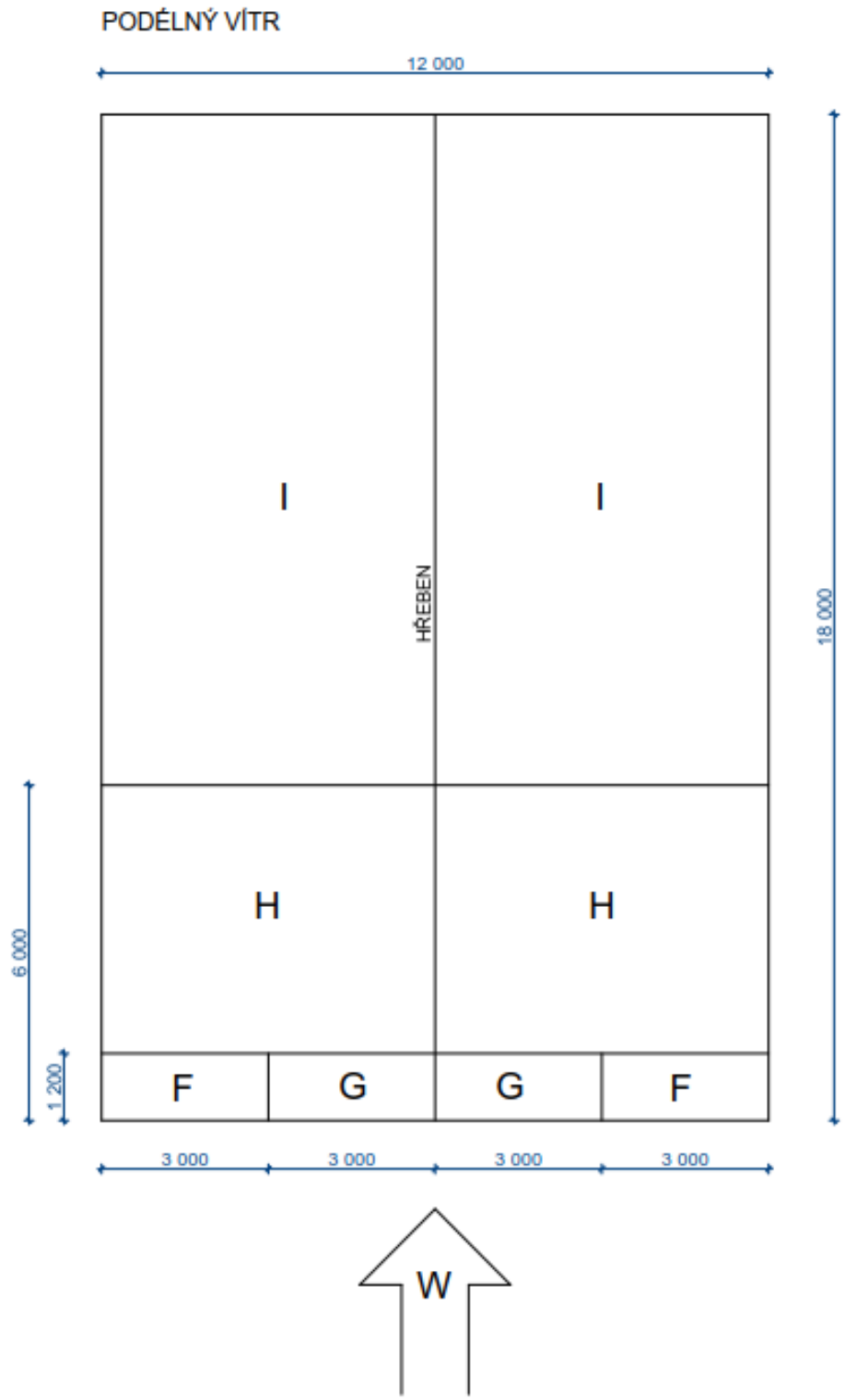
$s_d = \lambda_{f*} s_k = 0,56 . 1,5 = 0,84 \text{ kN/m}^2$

μ_i Pro střechy se sklonem $\alpha = 0° \div 30°$ $\mu_i = 0,8$

Ce ,Ct Dle NAD ČR Ce = 1,0 ; Ct = 1,0 [4]

Zatížení větrem





Výpočet základního středního tlaku větru:

$q_b = \frac{1}{2} \varrho \, v_{b(0)}^2$

$v_{b(0)} = 27{,}5 \text{ m/s}$ (oblast III)

$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1{,}25 \cdot 27{,}5^2 = 472{,}65 \text{ N / m}^2$

$C_{e(z)} = 1{,}3$ (h=6,0m)

Základní tlak větru na vnější konstrukce:

$$W_{ei} = q_{b.}\ C_{e(z).}C_{pe}$$
$$W_{ei} = 0{,}472.1{,}3.C_{pe} = 0{,}613.\ C_{pe}$$

Součinitele vnějších tlaků pro ploché střechy – doporučené hodnoty:

$C_{pe,10}$ (F)	=-1,7
$C_{pe,10}$ (G)	=-1,2
$C_{pe,10}$ (H)	=-0,6
$C_{pe,10}$ (I)	=-0,6
$C_{pe,10}$ (I-)	=+0,6
$C_{pe,10}$ (J)	=+0,2

$W_{e(F)}$	=-1,7.0,613	=-1,0421 kN/m^2
$W_{e(G)}$	=-1,2.0,613	=-0,7356 kN/m^2
$W_{e(H)}$	=-0,6.0,613	=-0,3678 kN/m^2
$W_{e(I+)}$	=-0,6.0,613	=+0,3678 kN/m^2
$W_{e(I-)}$	=-0,6.0,613	=-0,3678 kN/m^2
$W_{e(J)}$	=+0,2.0,613	=+0,1226 kN/m^2

[10]

Nyní stanovíme výslednou hodnotu plošného zatížení pomocí kombinace zatížení

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

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

[5]

Dosazení do kombinačních stavů –

G	=-0,436	kN/m^2
Q	=-0,750	kN/m^2
SN	=-0,560	kN/m^2
$W_{e(F)}$	=-1,042	kN/m^2
$W_{e(G)}$	=-0,735	kN/m^2
$W_{e(H)}$	=-0,367	kN/m^2
$W_{e(I+)}$	=+0,367	kN/m^2
$W_{e(I-)}$	=-0,367	kN/m^2
$W_{e(J)}$	=+0,122	kN/m^2

Výpočet kombinací zatížení		
OZN.	VÝPOČET	HODNOTA ZATÍŽENÍ [kg/m^2]
K 1 :	0,463*1,35+0,75*1,5	1,833
K 2 :	0,463*1,35+0,28*0,9	0,653
K 3 :	0,463*1,35+0,11*0,9	0,636
K 4 :	0,463*1,35+0,8*0,9	0,705
K 5 :	0,436*1,35+0,56*1,5	1,485
K 6 :	0,436*1,35+0,56*1,5+0,28*0,9	1,457
K 7 :	0,436*1,35+0,56*1,5+0,11*0,9	1,440
K 8 :	0,436*1,35+0,56*1,5+0,8*0,9	1,509
K 9 :	0,436*1+0,56*1,5	1,332
K 10 :	0,436*1+0,56*1,5+0,28*0,9	1,304
K 11 :	0,436*1,35+0,56*0,75	1,014
K 12 :	0,436*1,35+0,35*1,5	1,149
K 13 :	0,436*1,35+0,56*0,75+0,35*1,5	1,569
K 14 :	0,436*1,35+0,56*0,75+0,0,11*1,5	1,026
K 15 :	0,436*1+0,0,8*1,5	0,564
K 16 :	0,436*1+0,0,11*1,5	0,454
K 17 :	0,436*1-0,26*1,5	0,020
K 18 :	0,436*1+0,56*0,75+0,28*1,5	1,304
K 19 :	0,436*1+0,56*0,75+0,11*1,5	1,032

Tabulka 1

---

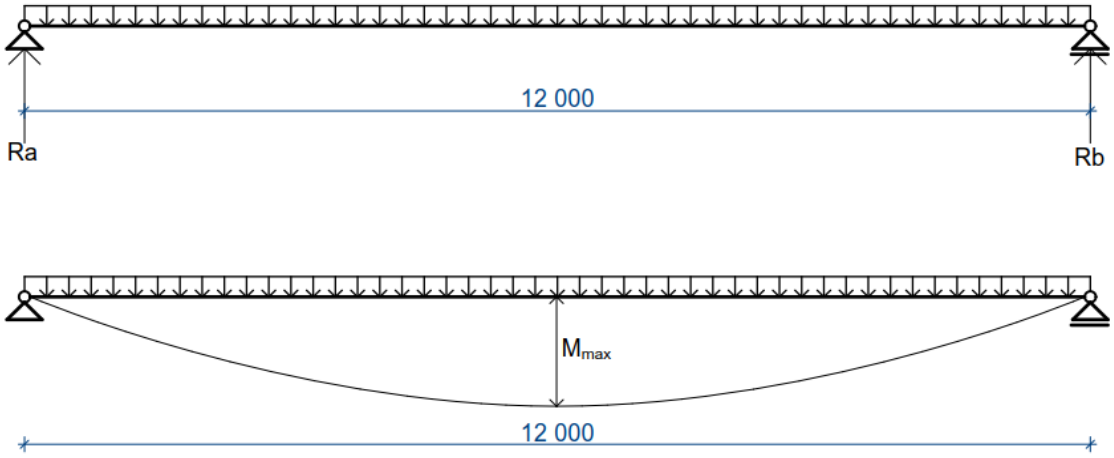
pozn. Z důvodu potřeb výpočtu je nutná redukce nerovnoměrného zatížení větrem, kdy toto zatížení bylo transformováno na rovnoměrné spojité zatížení vyvolávající stejnou hodnotu momentu, jako zatížení původní.

Jako nejnepříznivější kombinaci uvažujeme tedy K1 – dominantní užitné zatížení. Dále bude stanovena zatěžovací síla na hlavní nosný trám. Ze schématu je patrné, že nosné trámy jsou uvažovány s roztečí 3m, tedy i zatěžovací šířka nosníku bude rovna 3m. Výsledná hodnota spojitého zatížení je tedy:

$$fd = f_{dK2} \,.\, ZŠ =$$
$$fd = 1,833 \,.\, 3 = 5,5 \text{ kN/m´}$$

Hodnota stálého zatížení fd bude proměnná v závislosti na druhu použité konstrukce a jejich průřezových charakteristikách. Avšak pro potřeby výpočtu bude uvažováno s orientační hodnotou vlastní tíhy. Toto zjednodušení je možné vzhledem k zatěžovacím stavům, kdy rozhodující zatížení je dominantní užitné a dále pak že při zavádění ocelových táhel se bude úměrně snižovat hmotnost vlastního trámu a zvyšovat hmotnost pomocných konstrukcí.

7. Analýza použití prostého nosníku



obr. 10. – Schéma prostého trámu

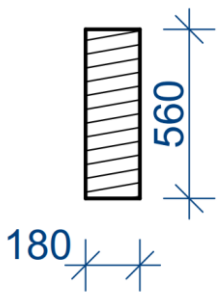
Ra = Rb= $\frac{(fd*L)}{2} = \frac{12.5,5}{2}$ = 33 kN

Mmax = $\frac{1}{8} fd.L^2 = \frac{1}{8} 5,5.12^2$ = 99 kNm

7.1. Návrh hlavního nosného trámu:

rozpětí	12m
průřez (návrh)	0,18x0,56m
maximální moment	M_{max} = 99,00kNm
posouvající síla	V_{max} = 33 kN
provozní třída 1	bez vlivu vlhkosti
	kmod = 0,6 [-]
	kdef = 0,8 [-]
pevnostní třída C24	fmk=24MPa
	fv,k=2,7MPa
redukce pevnosti	γ_m =1,3
moduly pružnosti	E = 11600MPa
	$E_{0,05}$ = 9400MPa

Vlastní výpočet:



A = b.h = 0,18.0,56 = 0,101m^2

$W_y = \frac{1}{6}.b.h^3 = \frac{1}{6}0,18.0,56^2 = 9,41.10^{-3}m^3$

$W_z = \frac{1}{6}.h.b^3 = \frac{1}{6}0,56.0,18^2 = 3,02.10^{-3}m^3$

Modifikační součinitel pro dřevo dle Eurokódu 5, tab.2.3, 3.1

třída trvání zatížení	Dlouhodobé zatížení
modifikační součinitel	k_{mod} = 0,8 (tab. 3.1)
třída provozu	Třída provozu 1
Materiál	Lepené lamelové dřevo

Výpočet napětí

Návrhové napětí v ohybu:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,Ed}}{Wy} = \frac{99000}{9{,}41.10^{-3}} = 10{,}5\ MPa$$

Návrhová pevnost v ohybu:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}.k_h.f_{m,y,k}}{Y_m} = \frac{0{,}7.1.24}{1{,}3} = 0{,}929\ MPa$$

Součinitel používaný pro příčnou a torzní stabilitu

Kritické napětí v ohybu: $\sigma_{m,crit} = \frac{E_{0,05}.0{,}78.b^2}{h.L_{ef}} = \frac{9{,}4.10^9.0{,}78.0{,}18^2}{0{,}56.12}$ = 27,8 MPa

Poměrná štíhlos v ohybu: $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,y,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24.10^6}{27{,}8.10^6}} = 0{,}483$

Součinitel pro redukci pevnosti v ohybu:

k_{crit}=1,56-0,75. $\lambda_{rel,m}$ = 1,56-0,75.0,929=0,864

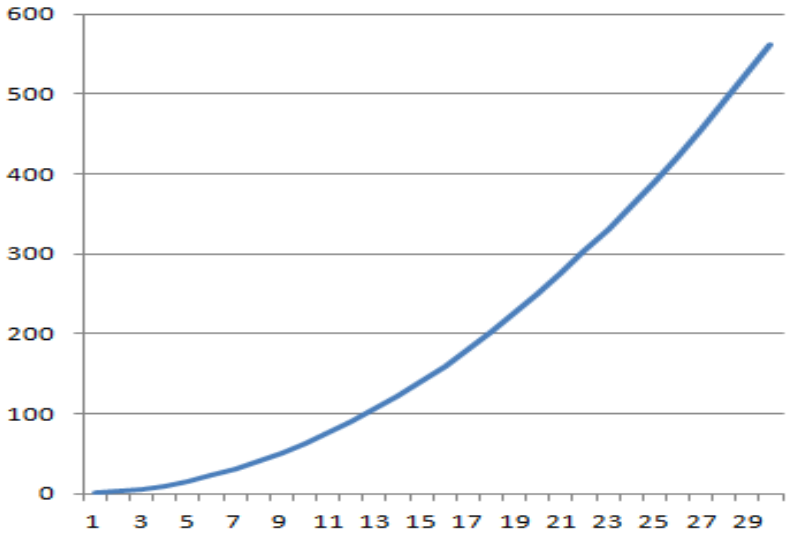
Posouzení

$$s1 = \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit}.f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{10{,}5}{0{,}864.13{,}4} = 0{,}907$$

$$s2 = k_m.\frac{\sigma_{myd}}{k_{crit}.f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = 0{,}7.\frac{10{,}5}{0{,}864.13{,}4} = 0{,}635$$

s = max(s1;s2)=max (0,907;0,635) = 0,954 ≤ 1 → průřez vyhovuje

Moment [kNm]



graf 1 – Vývoj momentu na prostém nosníku v závislosti na rozpětí

Z výše uvedeného grafu je patrný vývoj momentu na prostě uloženém nosníku v závislosti na rozpětí.

Linie grafu má exponenciální charakter a při určitém rozpění, přestane být výhodné aplikovat prostý nosník a je nutné hledat alternativu v podobě jiných konstrukcí.

V této bakalářské práci bude použito podepření prostého nosníku pomocí jednoduchého a dvojitého vzpínadla a dále bude podroben zkoumání pokles momentů v závislosti na rozpětí a následně bude porovnána výhodnost použitých alternativ.

Konstrukce bude navržena dle empirických vztahů a v další části bude snaha tyto konstrukce optimalizovat a maximálně využít prvky vzpínadla.

8. Aplikace jednoduchého vzpínadla nad zadaným půdorysem

Jelikož vzpínadlová konstrukce je staticky neurčitá, výpočet vnitřních sil se značně liší od výpočtu vnitřních sil na staticky určité konstrukci, kde využíváme k určení neznámých silových veličin pouze podmínek rovnováhy. Oproti tomu staticky neurčité konstrukce mají více neznámých veličin, než nezávislých podmínek rovnováhy.

Zjednodušeně můžeme říci, že na stabilizaci konstrukce používáme více deformačních podmínek, než je nezbytně nutné. Takové konstrukce poté nazýváme staticky neurčitými nebo tvarově přeurčitými.

Tyto konstrukce však nemůžeme řešit pouze pomocí podmínek rovnováhy, ale musíme využít dalších metod a nástrojů. Mezi tyto metody patří například silová či deformační.

8.1. Silová metoda

Pro zadanou konstrukci bude nejvýhodnější využití silové metody, kdy bude do výpočtu zavedena tzv. základní soustava konstrukce, která bude staticky určitá a na místo odebraných (nadbytečných) podpor, budou zavedeny jednotkové síly, které vyvozují virtuální vnitřní síly na konstrukci.

Dále budou stanoveny účinky vnějšího zatížení na základní soustavě a vyjádřeny podmínky kompatibility pro silové zatížení. Pro zadaný případ budou zanedbány účinky teploty, pootočení a poklesy podpor.

Silovou metodu můžeme nazvat metodou přímou, neboť výsledkem jsou síly, které neznáme. Pro výpočet je nutné sestavení deformační podmínky tzv. kanonické rovnice ve tvaru:

$$\sum_{k=1}^{n_s} \delta_{i,k} X_k + \delta_{i,0} = 0 \qquad (i = 1, 2, 3 \equiv n_s)$$

kde δi,k je deformační součinitel vyjadřující pootočení nebo posunutí průřezu i základní soustavy ve směru veličiny X_i od k–tého jednotkového stavu X_k = 1, $\delta_{i,0}$ je deformační součinitel vyjadřující pootočení nebo posunutí průřezu i základní soustavy ve směru veličiny X_i od nultého zatěžovacího stavu. Index „i“ představuje číslo deformace (místo sledované deformace) a je totožné s číslem neznámé veličiny X_i. Index „k“, resp. 0 určuje

číslo zatěžovacího stavu, v němž deformace vznikla. Součinitele $\delta_{i,i}$ se nazývají hlavní deformační součinitele a součinitele $\delta_{i,k}$ jsou vedlejší deformační součinitele (leží na vedlejších diagonálách). Podle Maxwellovy věty platí:

$$\delta_{i,k} = \delta_{k,i} \quad (\text{pro } i \neq k)$$

V maticové formě mohou být kanonické rovnice zapsány:

$$\delta X + \delta_f = 0 \qquad [6]$$

Kde tato rovnost vyjadřuje soustavu lineárních rovnic n_s o n_s neznámých,
n_s v tomto případě vyjadřuje stupeň deformační neurčitosti konstrukce.
Pro výpočet jednotkových deformací na zvolené základní soustavě využíváme rovnice:

$$\delta_{if} = \int_s^0 Ni \frac{Nf}{EA} + My, i \frac{My,f}{EIy} dx$$
$$\delta_{1j} = \int_s^0 Ni \frac{Nj}{EA} + My, j \frac{My,j}{EIy} dx$$

δ_{if} vyjadřuje deformaci na základní soustavě ve směru nadbytečné vazby X_i od vnějšího zatížení.
δ_{1j} vyjadřuje deformaci na základní soustavě ve směru nadbytečné vazby X_i od jednotkové síly X_j.

[7]

Návrh vlastní konstrukce

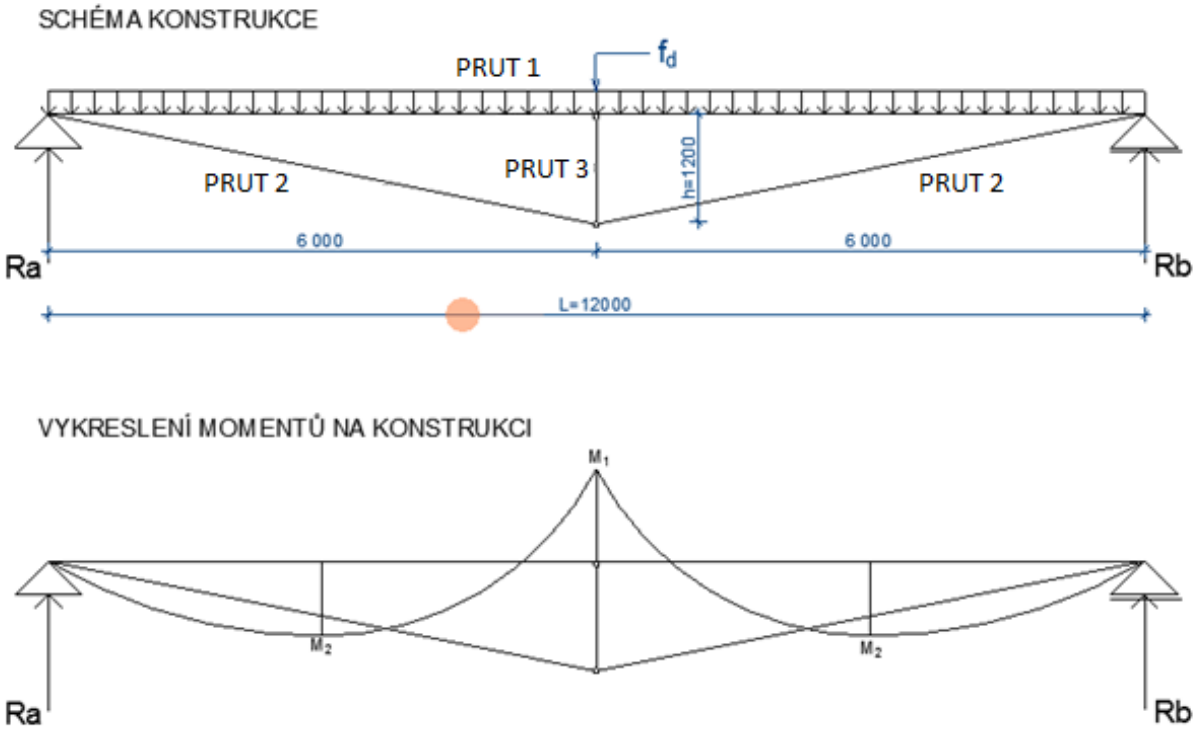
V předchozí kapitole byl stanoven rozměr lepeného prostě uloženého nosníku na 180x560mm. Tento nosník bude podepřen jednoduchým vzpínadlem a bude analyzována změna průřezu a případná úspora materiálu.

Jako pevné hodnoty stále zůstávají zatížení, rozpětí a způsob podepření samotné konstrukce.

Stanovení základní geometrie vzpínadla – uvažován empirický vztah

$$h = \frac{1}{10} L$$

tzn. že hodnota vzepětí bude 1,2m, samozřejmě čím vyšší hodnota vzepětí je, tím efektivnější je konstrukce vzpínadla, ale nesmí být opomenuto vnitřní prostorové řešení objektu, kdy dochází ke snižování světlé výšky objektu.



obr. 11.: Schéma jednoduchého vzpínadla

Specifikace konstrukce

fd=5,5kN/m´

Ra=Rb=33kN

prut 1 – GL24h:	prut 2 – S355:	prut 3 - C24:
180x360mm	d=22mm	50x200mm
E1=11600Mpa	E2=210000Mpa	E3=11000Mpa
A1=72000mm^2	A2=452mm^2	A3=10000mm^2
L1=12000mm	L2=6118mm	L3=1200mm
I_y1=699,84*10^{6}mm^4	I_y2=15945mm^4	I_y3=33333333mm^4

Před vlastním výpočtem průběhu vnitřních sil na konstrukci je nutné stanovení statické určitosti či neurčitosti, to povede k získání počtu neznámých, které budou ve výpočtu vystupovat.

Statická neurčitost se posuzuje dle vzorce:

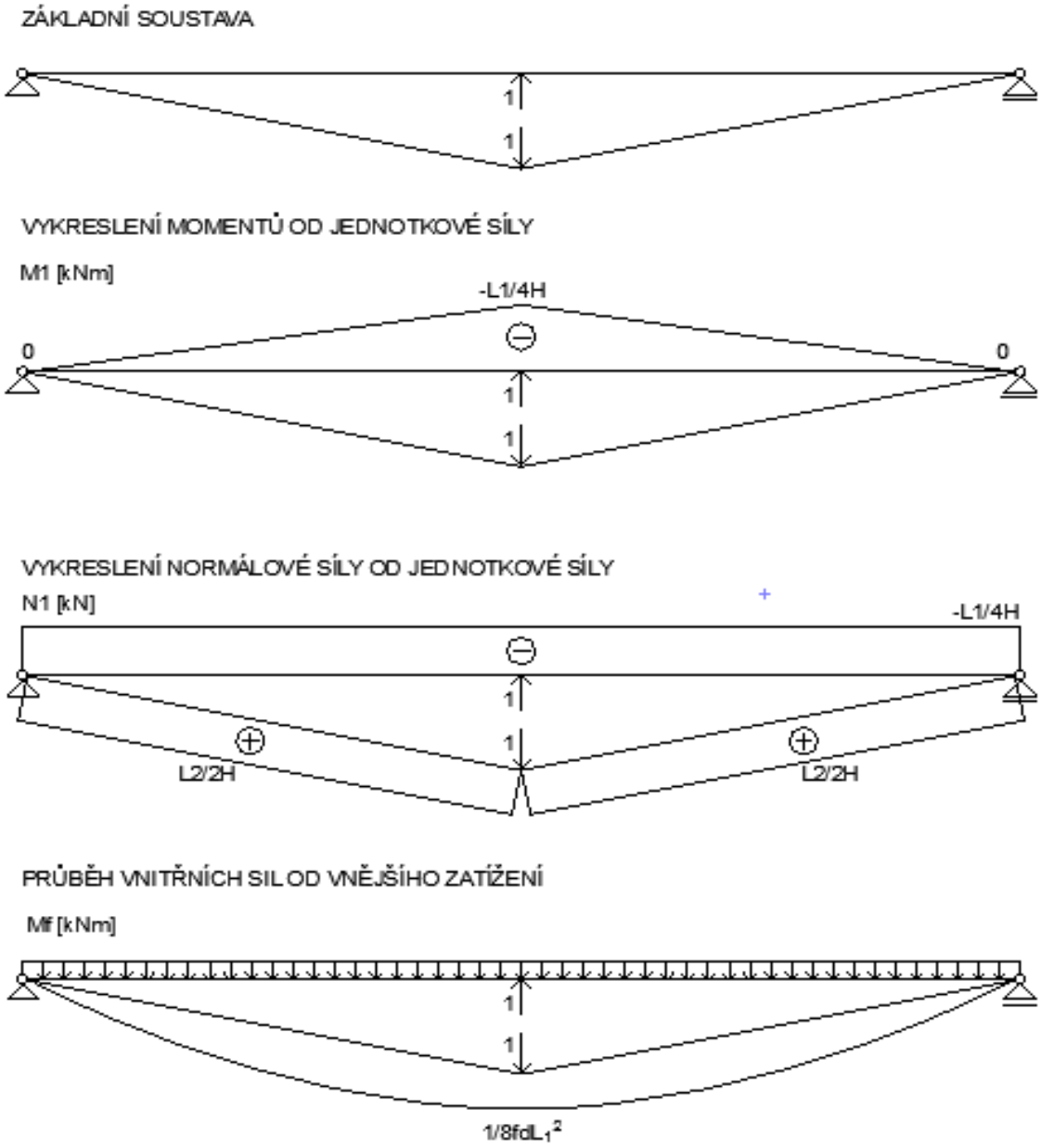
$$n = 2\beta + 3\delta - (\alpha 1 + 2\alpha 2 + 3\alpha 3) - 3p$$

kde: β je počet hmotných bodů
δ je počet desek
α_i je počet i-násobných vazeb
p je počet uzavřených rámů.

dosazení do vzorce:

$$2 \cdot 1 + 3 \cdot 1 - (1 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 1) = -1$$

V tomto případě pro jednoduché vzpínadlo vychází stupeň statické neurčitosti 1. Jedná se tedy o konstrukci jedenkrát staticky neurčitou a do výpočtu bude zavedena jedna neznámá jednotková síla.



obr.12. : Schéma řešení pro silovou metodu jednoduché vzpínadlo

8.2. Vlastní výpočet vnitřních sil

Jako neznámá veličina je zvolena normálová síla ve vzpěře - pro přehlednost výpočtu označena jako X_1

Základní rovnice:

$\delta_{11}X_1+\delta_{1f}=0$

$\delta_{11} = \int_s^0 N1\frac{N1}{E1A1}+N1\frac{N1}{E2A2}+N1\frac{N1}{E3A3}+M1\frac{M1}{E1Iy1}dx$

$\delta_{1f} = \int_s^0 M1\frac{Mf}{E1Iy1}dx$

$\delta_{11} = \frac{L^3}{16H^2}\frac{1}{E1A1}+\frac{L_2^3}{2H^2}\frac{1}{E2A2}+\frac{H}{E3A3}+\frac{L^3}{48}\frac{1}{E1Iy1}$

$\delta_{1f} = \frac{5\,f_{ed}\,L^4}{384\,E1Iy1}$

$X_1 = \frac{\delta 1f}{\delta 11}$

$$X_1=\frac{\frac{5\,f_{ed}\,L^4}{384\,E1Iy1}}{\frac{L^3}{16H^2E1A1}+\frac{L_2^3}{2H^2E2A2}+\frac{H}{E3A3}+\frac{L^3}{48E1Iy1}}=$$

$$\frac{\frac{5\,.5,5\,.12^4}{384\,.11,6.10^6.0,000776}}{\frac{12^3}{16\,.1,2^2.11,6.10^6.0,0007776}+\frac{6,118^3}{2.1,2^2.210.10^6.0,000452}+\frac{1,2}{11.10^6.0,01}+\frac{12^3}{48.11,6.10^6.0,000776}}$$

$X_1 = 41,5\text{kN}$

Vyjádření skutečných vnitřních sil na nosníku.

Normálová síla na hlavním nosníku: $N_{\text{nosník}} = -\frac{X1.L}{4.H} = -\frac{41,5.12}{4.1,2} = -103,75kN$

Normálová síla táhla: $N_{\text{táhlo}} = \frac{X1.L_2}{2H} = \frac{41,5.6,118}{2.1,2} = 105,8kN$

Normálová síla vzpěry: $N_{\text{vzpěra}}$ = -X = -41,5kN

Podporový moment: $M_2 = \frac{fed.L^2}{8} - \frac{1}{4}X1.L = \frac{5,5.12^2}{8} - \frac{1}{4}.41,5.12 = -25,5kNm$

Mezipodporový moment: $M_1 = \frac{1}{2}fed.x^2 + \frac{1}{2}X_1.x - \frac{1}{2}fed.L.x$

Ve výše uvedené rovnici vystupuje neznámá veličina *x*, která charakterizuje polohu maximálního momentu na hlavním nosníku. Tuto neznámou lze vyjádřit pomocí svislé podmínky rovnováhy:

$\downarrow: 0 = -\frac{fed.L}{2}+\frac{X1}{2}+fed.x$

$x = \frac{0,5.(fed.L-R)}{fed} \rightarrow$

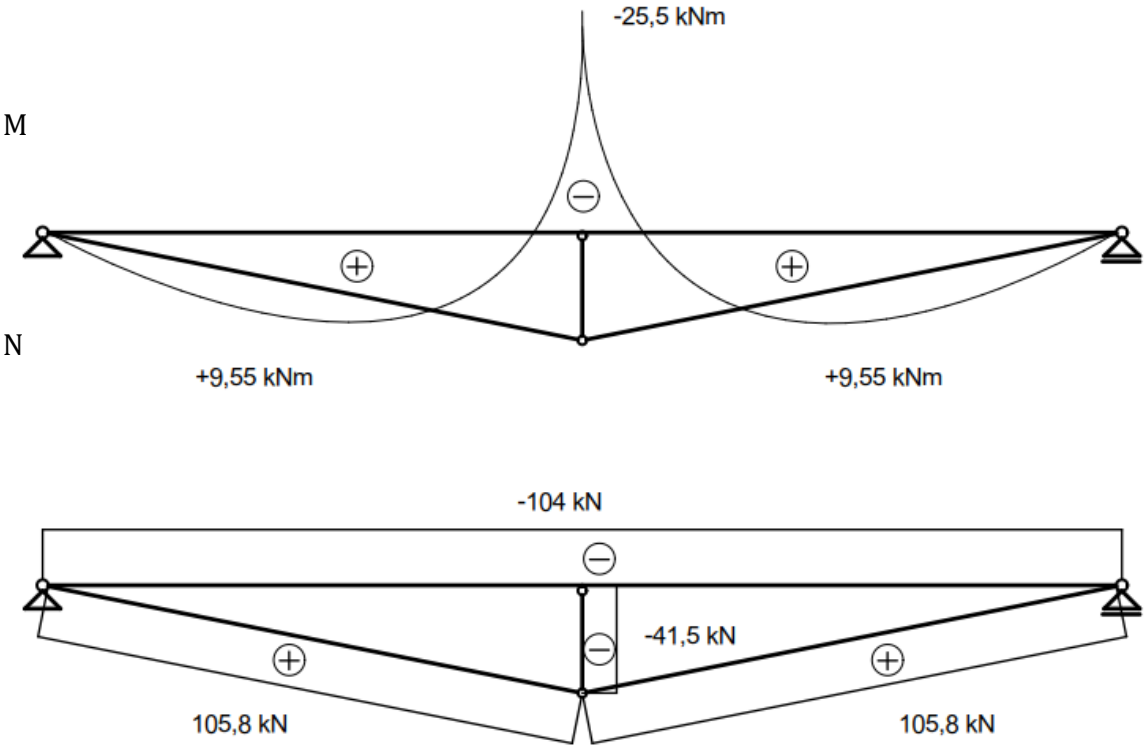
$M_1 = \frac{1}{2} fed.(\frac{0,5.(fed.L-R)}{fed})^2 + \frac{1}{2} X_1.(\frac{0,5.(fed.L-R)}{fed}) - \frac{1}{2} fed.L.\frac{0,5.(fed.L-R)}{fed} =$

$= \frac{(fed.L-X1)^2}{8.fed} =$

$M_1 = \frac{(5,5.12-45,5)^2}{8.5,5} = 9,55$ kNm

[9]

Schematické vykreslení vnitřních sil:



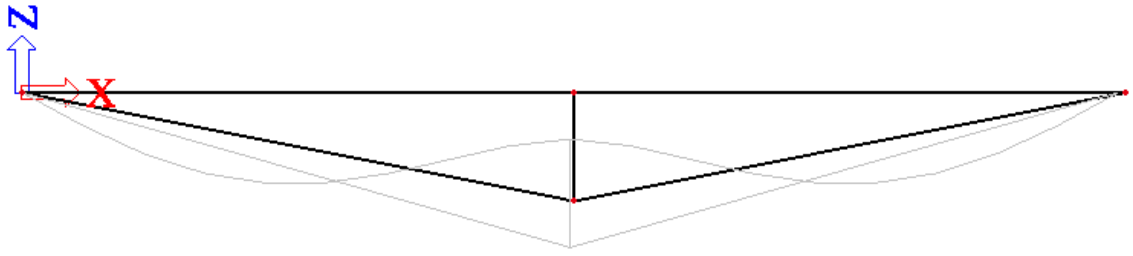
obr.13.: schematické vykreslení vnitřních sil – jednoduché vzpínadlo

8.3.Návrh prvků vzpínadla:

Hlavní nosný trám

Před vlastním návrhem hlavního nosného trámu je nutné stanovit vzpěrné délky nosníku.

Vzpěrná délka kolmo na rovinu vzpínadla je díku fixaci pomocí vaznic 1m, ve směru roviny vzpínadla se využívá ke stanovení vzpěrné délky lineární stabilitní výpočet v programu SCIA, který stanoví součinitel kritického zatížení k. Následně je nutné provést stabilitní výpočet pro určení vzpěrné délky.



obr.14. : Deformace jednoduchého vzpínadla

Určení vzpěrné délky pomocí stabilitního výpočtu – lineární bifurkační analýza LBA:

Koeficient *k* je poměr mezi kritickým a návrhovým zatížením.

Po vymodelování konstrukce a nedefinování zatěžovacích stavů je určena nejnižší hodnota koeficientu *k* pro daný typ vybočení.

V tomto případě je k=1,71[-]

Jako první dojde k vybočení hlavního nosného trámu, jak je patrné z obr.9.

Stanovení kritické síly, při které dojde k vybočení prutu:

$N_{CR} = k.N_{SD}$

$N_{CR} = 1,71.104 = 177,84kN$

N_{CR} – je kritická síla v prutu, při které dojde k vybočení ideální konstrukce

N_{SD} – je návrhová osová síla v daném prutu

Dále pro prvky ze dřeva platí:

$$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{A.f_{c,0,k}}{N_{CR}}} = \sqrt{\frac{64,8.10^3.24}{177,4.10^3}} = 2,957$$

parametr $\lambda_{rel,c}$ se nazývá poměrná štíhlost a v ČSN EN 1995-1-1 je vyjádřena vztahem:

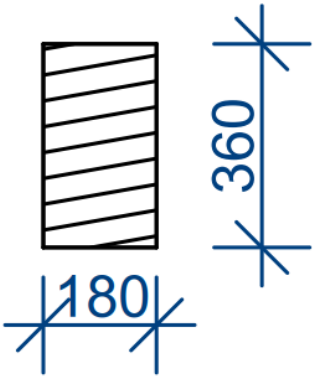
$$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}} = \frac{\lambda}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \rightarrow \lambda = \pi.\frac{\lambda rel,c}{\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}} = \frac{2,957}{\sqrt{\frac{24}{9400}}} = 58,524$$

$$\lambda = \frac{l_{cr}}{i} \rightarrow l_{cr} = \lambda.i_y = 58,524.104 = 6086mm$$

[11]

typ dřeva	GL24h	
pevnost v talku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	= 24MPa
ohybová pevnost rovnoběžně s vlákny	$f_{m,y,k}$	= 24MPa
5% kvantil modulu pružnosti	$E_{0,05}$	= 9400MPa
výška průřezu	h	= 360mm
šířka průřezu	b	= 180mm
normálová síla	N_{Ed}	= 104kN
ohybový moment k ose y	M_y	= 25,5kNm
vzpěrná délka k ose y	L_y	= 1m
vzpěrná délka k ose z	L_z	= 12m
vzpěrná délka pro příčnou a torzní tuhost	L_{ef}	= 6,086m
součinitel podmínek působení zatížení	k_m	= 0,7
součinitel geometrické imperfekt	β_c	= 0,2

Parametry průřezu:



A = b.h = 0,18.0,36 = 0,0648m^2

$I_y = \frac{1}{12} b.h^3 = \frac{1}{12} 0{,}18.0{,}36^3 = 700.10^{-6} m^4$

$I_z = \frac{1}{12} h.b^3 = \frac{1}{12} 0{,}36.0{,}18^3 = 175.10^{-6} m^4$

$W_y = \frac{1}{6}.b.h^3 = \frac{1}{6} 0{,}18.0{,}36^2 = 3{,}89.10^{-3} m^3$

$W_z = \frac{1}{6}.h.b^3 = \frac{1}{6} 0{,}36.0{,}18^2 = 1{,}94.10^{-3} m^3$

$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{700.10^{-6}}{0{,}0648}} = 104mm$

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{175.10^{-6}}{0{,}0648}} = 52mm$

Součinitel vzpěru k ose y

štíhlostní poměr - osa y $\lambda_y = \frac{Ly}{iy} = \frac{1}{0{,}104} = 9{,}62$

$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda y}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{9{,}62}{3{,}14}.\sqrt{\frac{24.10^6}{9{,}4.10^9}} = 0{,}154$

$k_y = 0{,}5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, y - 0{,}3) + \lambda_{rel,y}{}^2$

$= 0{,}5.(1+0{,}2.(0{,}154-0{,}3)+0{,}154^2) = 0{,}497$

$k_{cy} = \frac{1}{k_y+\sqrt{k_y^2-\lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0{,}497+\sqrt{0{,}497^2-0{,}154^2}} = 1{,}00$

$k_{cy} = 1$

Součinitel vzpěru k ose z

štíhlostní poměr – osa z $\lambda_z = \frac{Lz}{iz} = \frac{6{,}08}{0{,}0{,}052} = 117$

$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda z}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{104}{3{,}14}.\sqrt{\frac{24.10^6}{9{,}4.10^9}} = 1{,}67$

$k_z = 0{,}5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, z - 0{,}3) + \lambda_{rel,z}{}^2$

$= 0{,}5.(1+0{,}2.(1{,}67-0{,}3)+1{,}67^2) = 2{,}03$

$k_{cz} = \frac{1}{k_z+\sqrt{k_z^2-\lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2{,}03+\sqrt{2{,}03^2-1{,}67^2}} = 0{,}314$

$k_{cz,min}$ = min (1;0,314) = 0,314

Součinitel používaný pro příčnou a torzní stabilitu

Kritické napětí v ohybu $\sigma_{m,crit} = \frac{E_{0,05}.0{,}78.b^2}{h.L_{ef}} = \frac{9{,}4.10^9.0{,}78.0{,}18^2}{0{,}36.12}$=43,3MPa

Poměrná štíhlost v ohybu $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,y,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24.10^6}{43{,}3.10^6}} = 0{,}745$

Součinitel používaný pro příčnou torzní stabilitu

k_{crit} = 1

Modifikační součinitel pro dřevo dle Eurokódu 5, tab.2.3, 3.1

třída trvání zatížení	střednědobé zatížení
modifikační součinitel	k_{mod} = 0,8 (tab. 3.1)
třída provozu	Třída provozu 1
Materiál	Lepené lamelové dřevo

Výpočet napětí

Návrhová napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$\sigma_{c,0d} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{104000}{0,0648} = 1,6\ MPa$

Návrhové napětí v ohybu:

$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,Ed}}{Wy} = \frac{25500}{3,89.10^{-3}} = 6,56\ MPa$

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}.f_{c,0,k}}{Y_m} = \frac{0,8.22}{1,3} = 13,5\ MPa$

Návrhová pevnost v ohybu:

$f_{m,d} = \frac{k_{mod}.k_h.f_{m,y,k}}{Y_m} = \frac{0,8.1.24}{1,25} = 15,36\ MPa$

Posouzení:

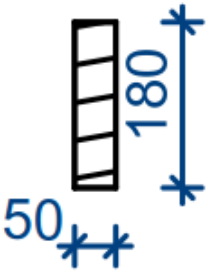
$s = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,min}.f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit}.f_{m,d}} = \frac{1,6}{0,228.13,4} + \frac{6,56}{1.15,36} = 0,951$

$0,951 \leq 1 \rightarrow$ průřez vyhovuje

Vzpěra – posouzení

typ dřeva	C24	(EN 338)
pevnost v talku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	= 21MPa
5% kvantil modulu pružnosti	$E_{0,05}$	= 7,4GPa
výška průřezu	h	= 200mm
šířka průřezu	b	= 50mm
normálová síla	N_{Ed}	= 41,5kN
vzpěrná délka k ose y	L_y	= 1,2m
vzpěrná délka k ose z	L_z	= 1,2m
součinitel geometrické imperfekt	β_c	= 0,2

Parametry průřezu



A = b.h = 0,05.0,18 = 0,009m^2

$I_y = \frac{1}{12} b.h^3 = \frac{1}{12} 0{,}0{,}05.0{,}18^3 = 24{,}3.10^{-6} m^4$

$I_z = \frac{1}{12} h.b^3 = \frac{1}{12} 0{,}18.0{,}05^3 = 1{,}88.10^{-6} m^4$

$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{24{,}3.10^{-6}}{0{,}009}} = 52mm$

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{1{,}88.10^{-6}}{0{,}009}} = 14mm$

Součinitel vzpěru k ose y

štíhlostní poměr - osa y

$\lambda_y = \frac{Ly}{iy} = \frac{1{,}2}{0{,}05} = 23{,}1$

$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda y}{\pi} . \sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{23{,}1}{3{,}14} . \sqrt{\frac{21.10^6}{7{,}4.10^9}} = 0{,}392$

$k_y = 0{,}5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, y - 0{,}3) + \lambda_{rel,y}{}^2$

$= 0{,}5.(1+0{,}2.(0{,}392-0{,}3)+0{,}392^2) = 0{,}586$

$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0{,}586+\sqrt{0{,}586^2-0{,}392^2}} = 0{,}979$

Součinitel vzpěru k ose z

štíhlostní poměr – osa z

$\lambda_z = \frac{Lz}{iz} = \frac{1{,}2}{0{,}01} = 83{,}1$

$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda z}{\pi} . \sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{83{,}1}{3{,}14} . \sqrt{\frac{21.10^6}{7{,}4.10^9}} = 1{,}41$

$k_z = 0{,}5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, z - 0{,}3) + \lambda_{rel,z}{}^2$

$= 0{,}5.(1+0{,}2.(1{,}41-0{,}3)+1{,}41^2) = 1{,}6$

$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1{,}6+\sqrt{1{,}6^2-1{,}41^2}} = 0{,}422$

Modifikační součinitel pro dřevo dle Eurokódu 5, tab.2.3, 3.1

třída trvání zatížení	střednědobé zatížení
modifikační součinitel	k_{mod} = 0,8 (tab. 3.1)
třída provozu	Třída provozu 1
Materiál	Rostlé dřevo

Únosnost prutu:

Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$$f_{c,0,k} = 21 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} f_{c,0,k}}{Ym} = \frac{0,7.21}{1,3} = 11,3MPa$$

Výsledný součinitel vzpěru:

$$k_{c,min} = \min (k_{c,y}; k_{c,z}) = \min (0,988; 0,422) = 0,422$$

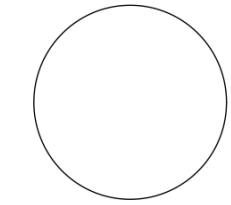
Únosnost:

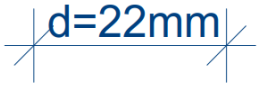
$$N_{rd} = k_{c,min} . A . f_{c,0,d} = 0,422.0,009.11,3.10^6$$
$$= 42,9kN$$

Posouzení:

$$s = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{41,5}{42,9} = 0,967 \leq 1 \rightarrow \text{průřez vyhovuje}$$

Posouzení ocelového táhla – prostý tah EC EN 1993-1-1





Normálová síla	N_{Ed} = 106 kN
Parametry průřezu:	
Plocha táhla:	A = 380 mm^2
Materiál táhla:	S355
Průměr táhla	d = 0,022 m

Únosnost v tahu:

$$N_{Rd} = \frac{A.f_y}{Ymo} = \frac{380.355}{1} = 135\ kN$$

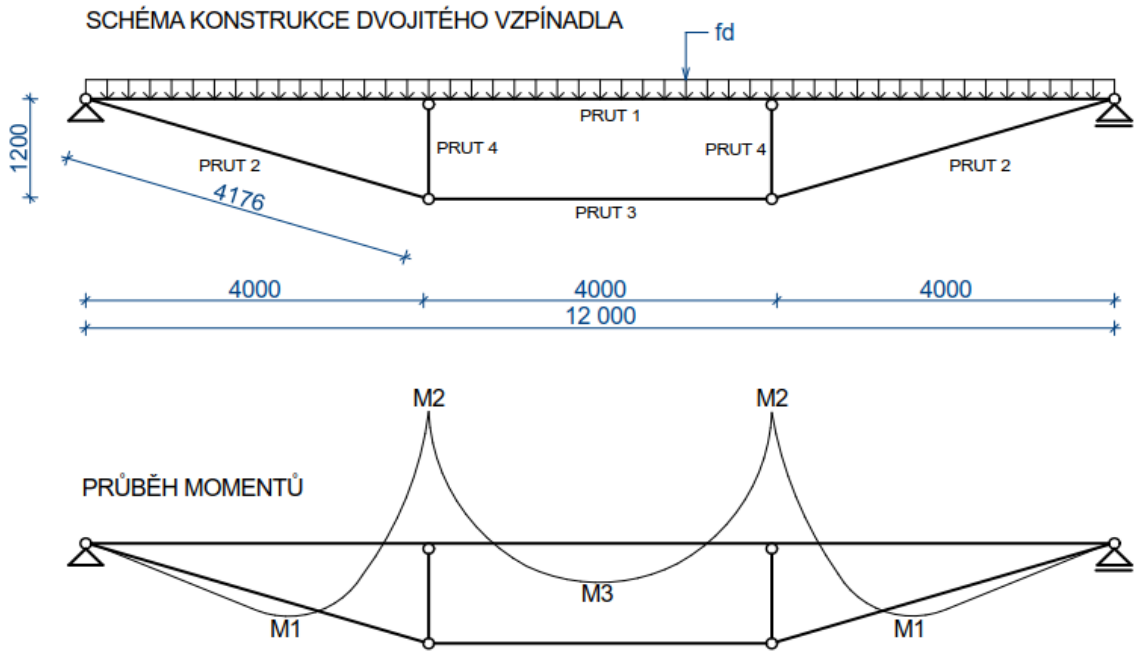
Posouzení:

$$s = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{106}{135} = 0,784 \leq 1 \rightarrow \text{průřez vyhovuje}$$

9. Aplikace dvojitého vzpínadla

Nyní jsou již stanoveny průřezy pro jednoduché vzpínadlo, dále nad zadaný půdorys bude umístěna konstrukce dvojitého vzpínadla a následně budou všechny použité konstrukce porovnány. Pro výpočet vnitřních sil na dvojitém vzpínadle bude opět využita silová metoda. Předpoklad - Zachování shodné geometrie jako v případě jednoduchého vzpínadla. Tzn.:

vzepětí	H=1,2m
rozpětí	L=12m
rozpětí polí rozpětí	L_p = 4m.



obr.15.: Schéma dvojitého vzpínadla

Specifikace konstrukce

fd=5,5kN/m´

Ra=Rb=33Kn

prut 1 – GL24h:	prut 2 – S355:	prut 3 – S355:	prut 4 – C24
140x240mm	d=18mm	d=18mm	50x120mm
E1=11600MPa	E2=210000MPa	E2=210000MPa	E3=11000MPa
A1=0,0336m^2	A2=2,4.10^{-4}m2	A2=2,4.10^{-4}m2	A3=0,006m^2
L1=12,000m	L2=4,176m	L3=4,00m	L3=1,200m
I_y1=1,613.10^{-4}m^4	I_y2=5,045.10 $^{-9}$m^4	I_y2=5,045.10 $^{-9}$m^4	I_y3=7,2. 10^{-6m}

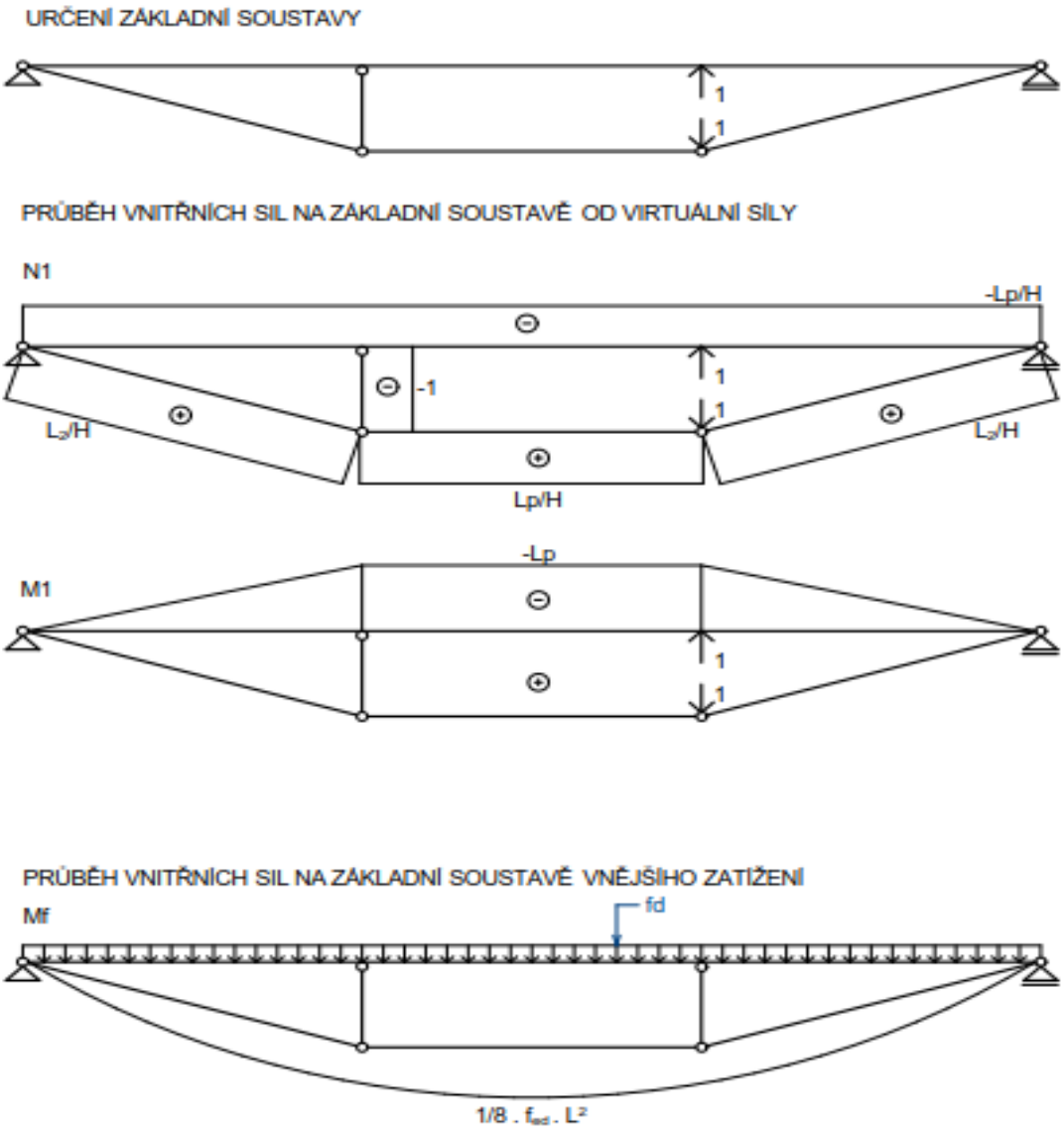
Statická neurčitost se posuzuje dle vzorce:

$n = 2\beta + 3\delta - (\alpha 1 + 2\alpha 2 + 3\alpha 3) - 3p$

kde: β je počet hmotných bodů
δ je počet desek
α_i je počet i-násobných vazeb
p je počet uzavřených rámů.

po dosazení do vzorce dostaneme:

$$2 \cdot 2 + 3 \cdot 1 - (1 + 5 \cdot 1 + 2 \cdot 1) = -1$$



obr.16. : Schéma řešení pro silovou metodu jednoduché vzpínadlo

9.1. Výpočet vnitřních sil

Jako neznámá je stanovena normálová síla ve vzpěře, pro přehlednost výpočtu označena jako X_1

Základní rovnice:

$\delta_{11}X_1+\delta_{1f}=0$

$\delta_{11}=\int_s^0 N1\frac{N1}{E1A1}+N1\frac{N1}{E2A2}+N1\frac{N1}{E3A3}+M1\frac{M1}{E1Iy1}dx$

$\delta_{1f}=\int_s^0 M1\frac{Mf}{E1Iy1}dx$

$\delta_{11}=\frac{L_p\,L}{H^2}.\frac{1}{E_1A_1}+\frac{2.L_2^3+L_p^2L-2L_2^3}{H^2}.\frac{1}{E_2A_2}+2H\frac{1}{E_3A_3}+L_2L-\frac{4}{3}L_2^3.\frac{1}{E_1I_{y1}}$

$\delta_{1f}=\frac{f_{ed}L^3L_p+f_{ed}L_p^4-2f_{ed}LL_p^3}{12}.\frac{1}{E_1I_{y1}}$

$X_1=\frac{\delta 1f}{\delta 11}$

$$X_1 = \frac{\frac{f_{ed}L^3 L_p + f_{ed}L_p^4 - 2f_{ed}LL_p^3}{12\,E1Iy1}}{\frac{L_p^2 L}{H^2 E1A1} + \frac{2L_2^3 + L_p^2 L - 2L_p^3}{H^2 E2A2} + \frac{2H}{E3A3} + \frac{L_p^3 L - \frac{4}{3}L_p^3}{E1Iy1}} =$$

[9]

$$X_1 = \frac{\frac{5,5.12^3.4 + 5,5.4^4 - 2.5,5.12.4^3}{12.11,6.10^6.161,28.10^{-6}}}{\frac{4^2.12}{1,2.11,6.10^6.0,0336} + \frac{2.4,176^3 + 4^3.12 - 2.4^3}{1,2^2.2,1.10^8.2,4.10^{-4}} + \frac{2.1,2}{11.10^6.0,006} + \frac{4^2.12 - \frac{4}{3}.4^3}{11,6.10^6.161,28.10^{-6}}} =$$

X_1 =22,6kN

Vyjádření skutečných vnitřních sil na nosníku:

Normálová síla na hlavním nosníku: $N_{nosník} = -\frac{X1.Lp}{H} = -\frac{22,6.4}{1,2} = -75,34kN$

Normálová síla táhla: $N_{táhlo} = \frac{X1.L_2}{H} = \frac{22,6.4,176}{1,2} = 78,66kN$

Normálová síla vzpěry: $N_{vzpěra}$ = -X = -22,6kN

Momenty: $M_1 = \frac{1}{2}fed.L.x - X_1.x - \frac{1}{2}fed.x^2$

Ve výše uvedené rovnici vystupuje neznámá veličina *x*, která charakterizuje polohu maximálního momentu na hlavním nosníku. Tato neznámá může být vyjádřena pomocí svislé podmínky rovnováhy:

$\downarrow: 0 = --\frac{1}{2}fed.L + X1 + fed.x$

$x = \frac{L}{2} - \frac{X1}{fed} \quad \rightarrow \quad M_1 = \frac{1}{2}fed.L\frac{L}{2} - \frac{X1}{fed} - X1.\frac{L}{2} - \frac{X1}{fed} - 0,5.fed.(\frac{L}{2} - \frac{X1}{fed})^2 =$

$M_1 = \frac{1}{8}fed.L^2 + \frac{X1^2}{2fed} - \frac{X1.L}{2}$

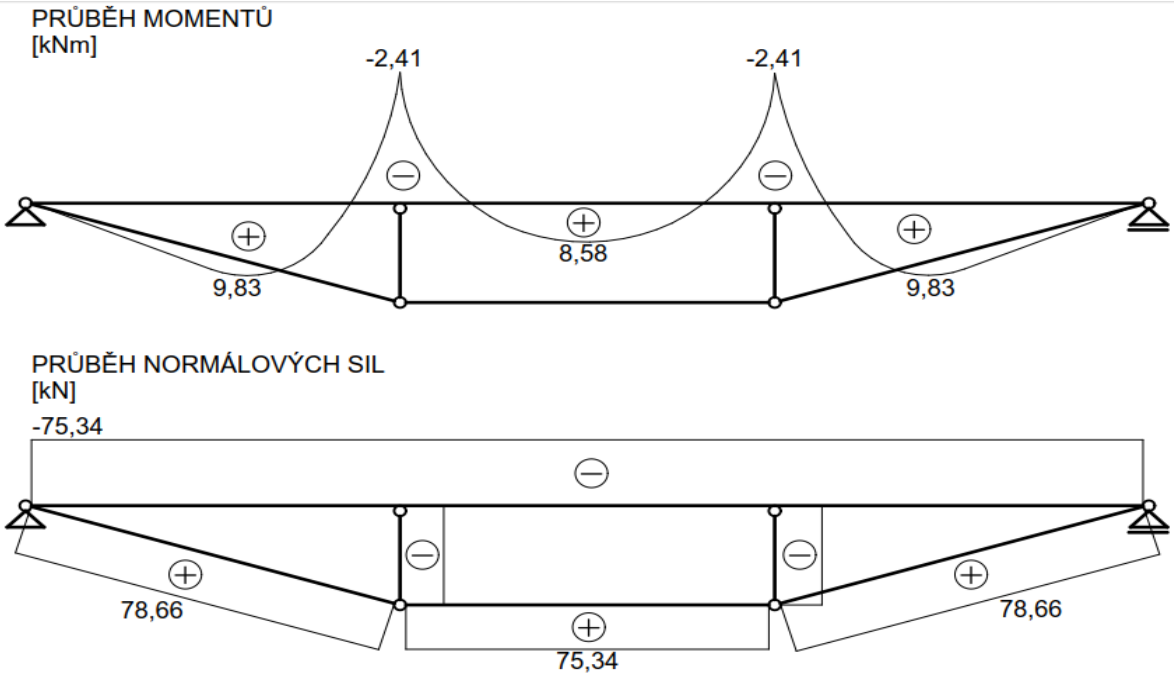
$M_1 = \frac{1}{8}5,5.12^2 + \frac{22,6^2}{2.5,5} - \frac{22,6.12}{2}$ = 9,83kNm

$M_2 = \frac{1}{2}.fed.L.Lp - \frac{1}{2}fed.Lp^2 - X1.Lp$

=0,5.5,5.12.4-0,5.5,5.4²-22,6.4

=-2,41 kNm

$M_3 = \frac{1}{8}fed.L^2 - X1.L_p = \frac{1}{8}.5,5.12^2 - 22,6.4$ = 8,58 kNm



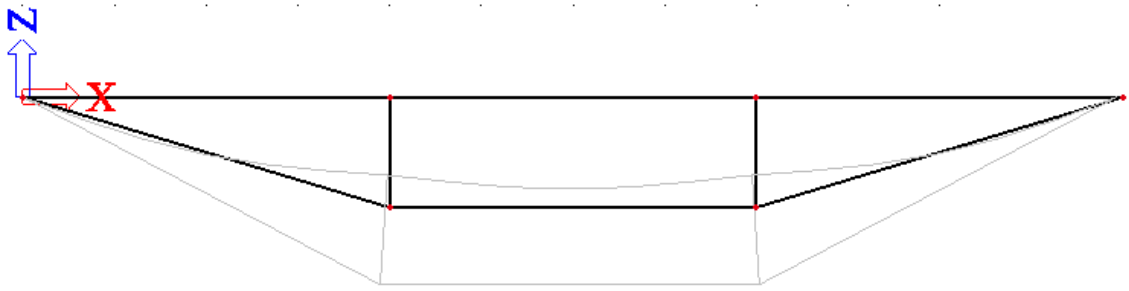
obr.17.: Schematické vykreslení vnitřních sil

9.2. Návrh prvků vzpínadla:

Hlavní nosný trám - posouzení

Před vlastním návrhem hlavního nosného trámu je nutné stanovit vzpěrné délky nosníku.

Vzpěrná délka kolmo na rovinu vzpínadla je díku fixaci pomocí vaznic 1m, ve směru roviny vzpínadla se využívá ke stanovení vzpěrné délky lineární stabilitní výpočet v programu SCIA, který stanoví součinitel kritického zatížení k. Následně je nutné provést stabilitní výpočet pro určení vzpěrné délky.



obr.18. : Deformace jednoduchého vzpínadla

<u>Určení vzpěrné délky pomocí stabilitního výpočtu – lineární bifurkační analýza LBA:</u>

Koeficient *k* je poměr mezi kritickým a návrhovým zatížením.

Po vymodelování konstrukce a nedefinování zatěžovacích stavů je určena nejnižší hodnota koeficientu *k* pro daný typ vybočení.

V tomto případě je k=19,73 [-]

Jako první dojde k vybočení hlavního nosného trámu v rovině vzpínadla, jak je patrné z obr.18.

Stanovení kritické síly, při které dojde k vybočení prutu:

$N_{CR}=k.N_{SD}$

$N_{CR}=19,73.75,34=1486,458$

N_{CR} – je kritická síla v prutu, při které dojde k vybočení ideální konstrukce

N_{SD} – je návrhová osová síla v daném prutu

Dále pro prvky ze dřeva platí:

$$\lambda_{rel,c}=\sqrt{\frac{A.f_{c,0,k}}{N_{CR}}}=\sqrt{\frac{38,4.10^3.24}{1486458}}=0,7874$$

parametr $\lambda_{rel,c}$ se nazývá poměrná štíhlost a v ČSN EN 1995-1-1 je vyjádřena vztahem:

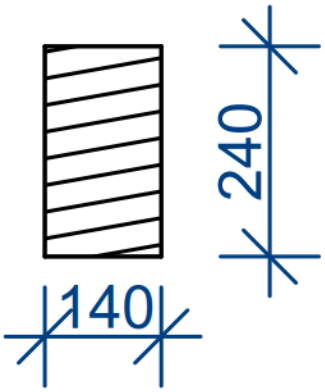
$$\lambda_{rel,c}=\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}}=\frac{\lambda}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}\rightarrow\lambda=\pi.\frac{\lambda rel,c}{\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}}=48,955$$

$$\lambda=\frac{l_{cr}}{i}\rightarrow l_{cr}=\lambda.i_y=48,955.69,3=3388mm$$

[11]

typ dřeva	GL24h	
pevnost v talku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	= 24MPa
ohybová pevnost rovnoběžně s vlákny	$f_{m,y,k}$	= 24MPa
5% kvantil modulu pružnosti	$E_{0,05}$	= 9400MPa
výška průřezu	h	= 240mm
šířka průřezu	b	= 140mm
normálová síla	N_{Ed}	= 75,34kN
ohybový moment k ose y	M_y	= 9,83kNm
vzpěrná délka k ose y	L_y	= 1m
vzpěrná délka k ose z	L_z	= 3,338m
vzpěrná délka pro příčnou a torzní tuhost	L_{ef}	= 12m
součinitel podmínek působení zatížení	k_m	= 0,7
součinitel geometrické imperfekt	β_c	= 0,2

Parametry průřezu:



$A = b.h = 0,14.0,24 = 0,0336\ m^2$

$I_y = \frac{1}{12}b.h^3 = \frac{1}{12}0,14.0,24^3 = 161.10^{-6}m^4$

$I_z = \frac{1}{12}h.b^3 = \frac{1}{12}0,24.0,14^3 = 54,9.10^{-6}m^4$

$W_y = \frac{1}{6}.b.h^3 = \frac{1}{6}0,14.0,24^2 = 1,34.10^{-3}m^3$

$W_z = \frac{1}{6}.h.b^3 = \frac{1}{6}0,24.0,14^2 = 784.10^{-6}m^3$

$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{161.10^{-6}}{0,0336}} = 69,3m$

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{54,9.10^{-6}}{0,0336}} = 40,4mm$

Součinitel vzpěru k ose y

štíhlostní poměr - osa y $\lambda_y = \frac{Ly}{iy} = \frac{1}{0{,}0693} = 14{,}4$

$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda y}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{14{,}4}{3{,}14}.\sqrt{\frac{24.10^6}{9{,}4.10^9}} = 0{,}231$

$k_y = 0{,}5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, y - 0{,}3) + \lambda_{rel,y}{}^2$

$= 0{,}5.(1+0{,}2.(0{,}231-0{,}3)+0{,}231^2) = 0{,}519$

$k_{cy} = \frac{1}{k_y+\sqrt{k_y^2-\lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0{,}519+\sqrt{0{,}519^2-0{,}231^2}} = 1{,}01$

$k_{cy} = 1$

Součinitel vzpěru k ose z

štíhlostní poměr – osa z $\lambda_z = \frac{Lz}{iz} = \frac{3{,}39}{0{,}0404} = 83{,}8$

$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda z}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{83{,}8}{3{,}14}.\sqrt{\frac{24.10^6}{9{,}4.10^9}} = 1{,}34$

$k_z = 0{,}5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, z - 0{,}3) + \lambda_{rel,z}{}^2$

$= 0{,}5.(1+0{,}2.(1{,}34-0{,}3)+1{,}34^2) = 1{,}502$

$k_{cz} = \frac{1}{k_z+\sqrt{k_z^2-\lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1{,}502+\sqrt{1{,}502^2-1{,}34^2}} = 0{,}458$

$k_{cz,min} = \min(1;0{,}458) = 0{,}458$

Součinitel používaný pro příčnou a torzní stabilitu

Kritické napětí v ohybu $\sigma_{m,crit} = \frac{E_{0,05}.0{,}78.b^2}{h.L_{ef}} = \frac{9{,}4.10^9.0{,}78.0{,}16^2}{0{,}24.12}$=65,2MPa

Poměrná štíhlost v ohybu $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,y,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24.10^6}{65{,}2.10^6}} = 0{,}606$

Součinitel používaný pro příčnou torzní stabilitu

$k_{crit} = 1$

Modifikační součinitel pro dřevo dle Eurokódu 5, tab.2.3, 3.1

třída trvání zatížení	Střednědobé zatížení
modifikační součinitel	k_{mod} = 0,8 (tab. 3.1)
třída provozu	Třída provozu 1
materiál	Lepené lamelové dřevo

Výpočet napětí

Návrhová napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$\sigma_{c,0d} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{75340}{0{,}0334} = 2{,}24\ MPa$

Návrhové napětí v ohybu:

$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,Ed}}{Wy} = \frac{9800}{1{,}34.10^{-3}} = 7{,}31\ MPa$

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}.f_{c,0,k}}{Y_m} = \frac{0{,}8.24}{1{,}3} = 14{,}76\ MPa$

Návrhová pevnost v ohybu:

$f_{m,d} = \frac{k_{mod}.k_h.f_{m,y,k}}{Y_m} = \frac{0{,}8.1.24}{1{,}3} = 15{,}4\ MPa$

Posouzení:

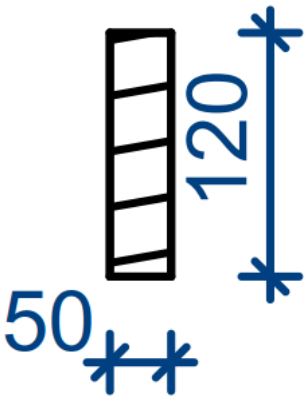
$s = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,min}.f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit}.f_{m,d}} = \frac{2{,}24}{0{,}458.13{,}4} + \frac{6{,}38}{1.15{,}4} = 0{,}779$

0,779 ≤ 1 → průřez vyhovuje

Vzpěra – posouzení

typ dřeva	C24	(EN 338)
pevnost v talku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	= 21MPa
5% kvantil modulu pružnosti	$E_{0,05}$	= 7,4GPa
výška průřezu	h	= 140mm
šířka průřezu	b	= 50mm
normálová síla	N_{Ed}	= 22,6 kN
vzpěrná délka k ose y	L_y	= 1,2m
vzpěrná délka k ose z	L_z	= 1,2m
součinitel geometrické imperfekt	β_c	= 0,2

Parametry průřezu



A = b.h = 0,05.0,14 = 0,006m^2

$I_y = \frac{1}{12}b.h^3 = \frac{1}{12}0{,}0{,}05.0{,}14^3 = 7{,}2.10^{-6}m^4$

$I_z = \frac{1}{12}h.b^3 = \frac{1}{12}0{,}14.0{,}05^3 = 1{,}25.10^{-6}m^4$

$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{7{,}2.10^{-6}}{0{,}006}} = 35mm$

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{1{,}25.10^{-6}}{0{,}006}} = 14mm$

Součinitel vzpěru k ose y

štíhlostní poměr - osa y $\lambda_y = \frac{Ly}{iy} = \frac{1,2}{0,03} = 34,6$

$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda y}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{34,6}{3,14}.\sqrt{\frac{21.10^6}{7,4.10^9}} = 0,587$

$k_y = 0,5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, y - 0,3) + \lambda_{rel,y}{}^2$

$= 0,5.(1+0,2.(0,587-0,3)+0,587^2) = 0,701$

$k_{cy} = \frac{1}{k_y+\sqrt{k_y^2-\lambda^2_{rel,y}}} = \frac{1}{0,701+\sqrt{0,701^2-0,587^2}} = 0,922$

Součinitel vzpěru k ose z

štíhlostní poměr – osa z $\lambda_z = \frac{Lz}{iz} = \frac{1,2}{0,01} = 83,1$

$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda z}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{83,1}{3,14}.\sqrt{\frac{21.10^6}{7,4.10^9}} = 1,41$

$k_z = 0,5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, z - 0,3) + \lambda_{rel,z}{}^2$

$= 0,5.(1+0,2.(1,41-0,3)+1,41^2) = 1,6$

$k_{cz} = \frac{1}{k_z+\sqrt{k_z^2-\lambda^2_{rel,z}}} = \frac{1}{1,6+\sqrt{1,6^2-1,41^2}} = 0,422$

Modifikační součinitel pro dřevo dle Eurokódu 5, tab.2.3, 3.1

třída trvání zatížení	Střednědobé zatížení
modifikační součinitel	k_{mod} = 0,8 (tab. 3.1)
třída provozu	Třída provozu 1
materiál	Rostlé dřevo

Únosnost prutu

Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$f_{c,0,k}$ = 21 MPa

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}.f_{c,0,k}}{Ym} = \frac{0,7.21}{1,3} = 11,3MPa$

Výsledný součinitel vzpěru:

$k_{c,min}$ = min ($k_{c,y}$; $k_{c,z}$) = min (0,988; 0,422) = 0,422

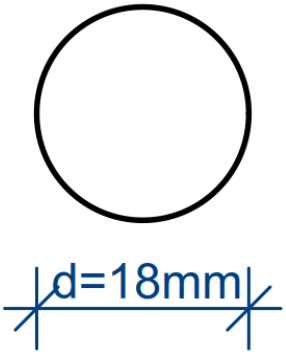
Únosnost:

N_{rd} =$k_{c,min}$. A .$f_{c,0,d}$ = $0,422.0,006.11,3.10^6$
=28,6kN

Posouzení:

$s = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{22,6}{28,6} = 0,79 \leq 1$ → průřez vyhovuje

posouzení ocelového táhla – prostý tah EC EN 1993-1-1



Normálová síla	N_{Ed} = 78,66 kN
Parametry průřezu:	
Plocha táhla:	A = 254 mm^2
Materiál táhla:	S355
Průměr táhla	d = 0,018 m

Únosnost v tahu:

$$N_{Rd} = \frac{A.f_y}{Ymo} = \frac{254.355}{1} = 90{,}3\ kN$$

Posouzení:

$$s = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{78{,}66}{90{,}33} = 0{,}871 \leq 1 \rightarrow \text{průřez vyhovuje}$$

9.3. Shrnutí

Z výše uvedeného je patrné, že nejvýhodnějším ze zkoumaných konstrukcí je z hlediska ekonomičnosti návrhu dvojité vzpínadlo. V předchozích kapitolách byla vzpínadla navržena pouze pomocí empirických vztahů a odhadů. Nyní, když je známa nejefektivnější geometrie konstrukce, může být aplikován postup optimalizace a tím dojde k zefektivnit konstrukce dvojitého vzpínadla a maximálnímu využití vlastností použitých materiálů.

Proces optimalizace bude představovat snižování a zvyšování tuhosti jednotlivých prvků, ať už modulem pružnosti použitého materiálu, tak pomocí jeho rozměrů, dále také vlastní geometrií konstrukce – zvyšováním vzepětí v efektivní míře s ohledem na využití prostoru a v neposlední řadě návrhem roztečí vzpěr a jejich uspořádání.

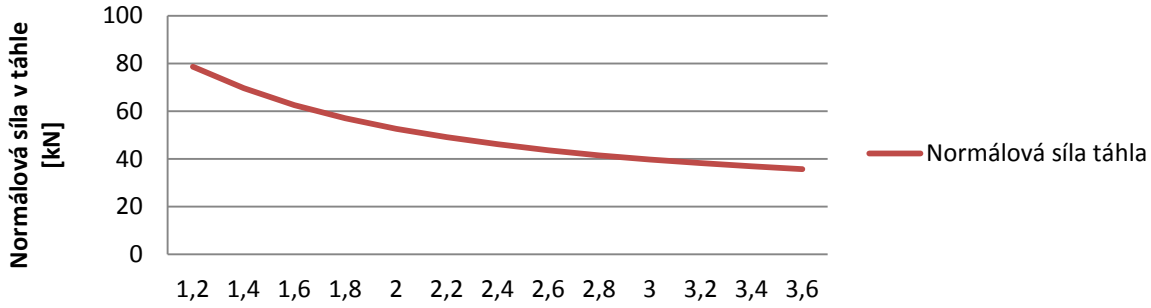
10. Optimalizace dvojitého vzpínadla

Prvotně bude upravena geometrie vzpínadla tak, aby konstrukce vyvozovala co nejmenší vnitřní síly. Toho lze docílit zvýšením vzepětí vzpínadla a efektivním uspořádáním vzpěr.

10.1. Vzepětí dvojitého vzpínadla

Je důležité stanovit optimální hodnotu vzepětí. Čím větší bude aplikované vzepětí, tím efektivnější bude uvažovaná konstrukce. Avšak zvyšováním vzepětí je snižována světlá výška vnitřního prostoru a klesá efektivnost využití samotného objektu. Je tedy důležité, vzepětí zbytečně nepředimenzovat.

10.1.1. Vliv vzepětí na normálovou sílu táhla

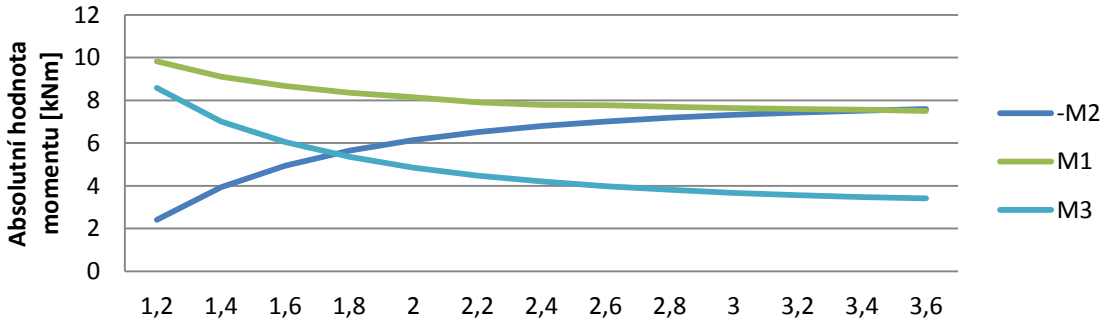


graf 2.: Průběh normálové síly táhla se zvyšováním vzepětí

Z grafu je patrné, že průběh normálové síly má konvexní charakter a v první části má mírně strmější ráz. Toto zjištění je velmi důležité, z důvodu vyvarování se zbytečnému nadvýšení vzepětí.

Z hlediska průběhu normálové síly v táhle, je tedy vhodné a efektivní vzepětí H= 1,8-2,4m

10.1.2. Vliv vzepětí na průběh momentů



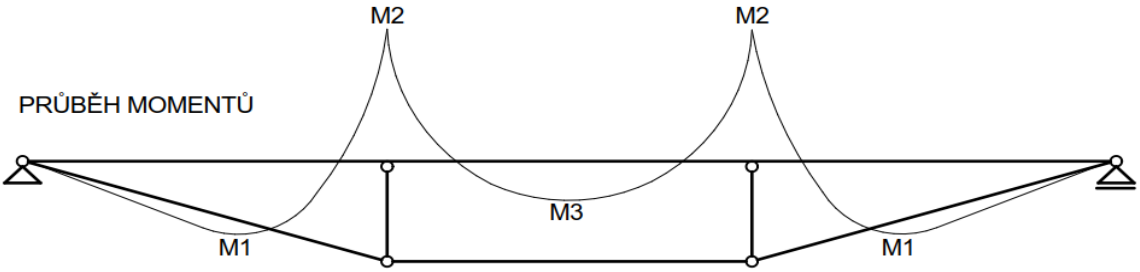
graf.3.: Vliv vzepětí na průběh momentů

Cílem jsou co nejnižší hodnoty momentů. Jako optimální řešení je zvolen průsečík čar grafu znázorňující průběh M3 a M2, tedy hodnota vzepětí je rovna 1,8 m.

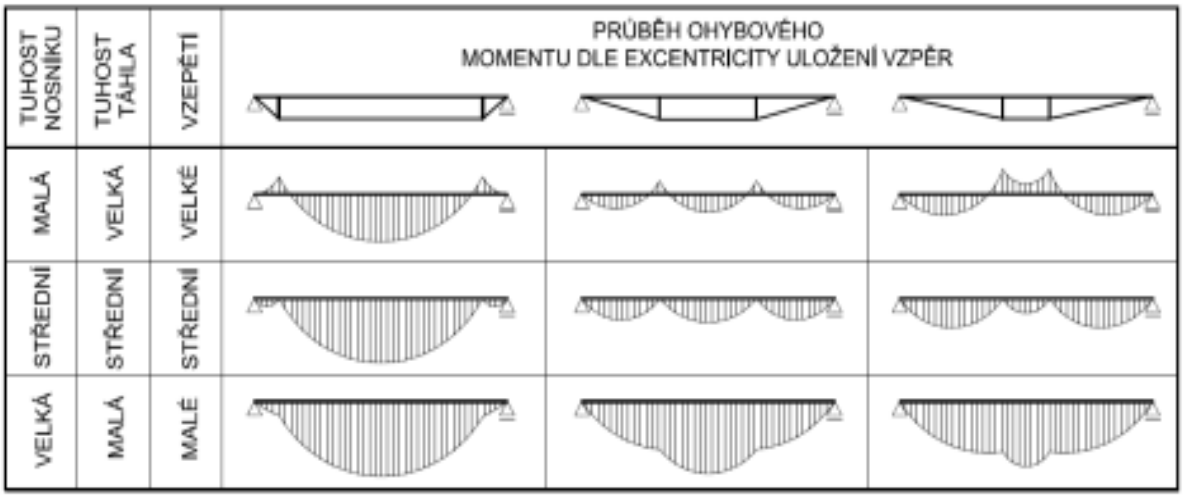
S přihlédnutím k zadaným podmínkám je optimální vzepětí dvojitého vzpínadla stanoveno na H=1,8m. Tato hodnota je brána jako fixní.

10.2. Rozmístění vzpěr dvojitého vzpínadla

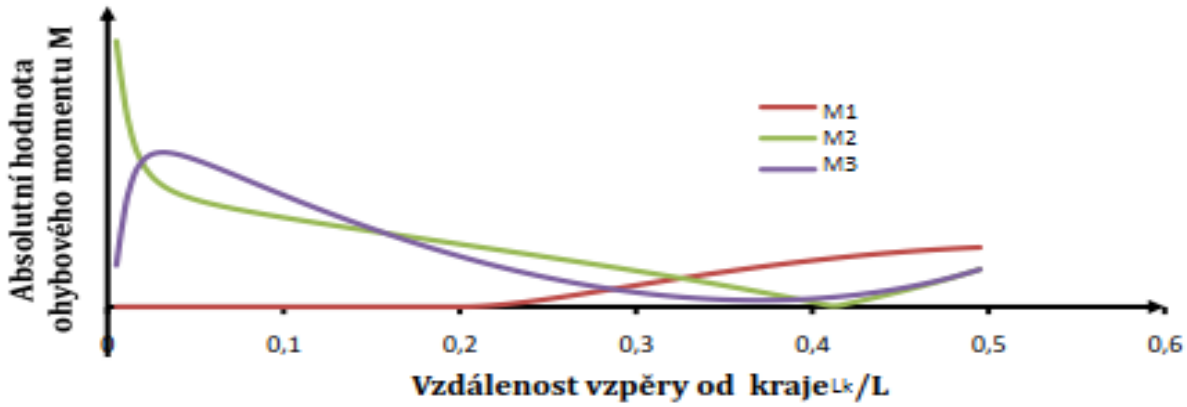
Nejprve bude opraveno rozmístění vzpěr, tak aby krajní kladný moment byl roven vnitřnímu kladnému momentu mezi vzpěrami, neboli M1=M3



obr.19.: Průběh momentů se symetricky uspořádanými vzpěrami 4m



obr. 20.: Vliv parametrů a umístění vzpěr na průběh momentů [9]



graf 4. : Ohybový moment ve vztahu k umístění podpor [9]

10.3. Aplikace optimalizace:

Z výše uvedeného grafu je patrné, že optimální poměr mezi $\frac{Lk}{L}$ se pohybuje okolo hodnoty 0,32 kdy se momenty M1, M2 a M3 téměř rovnají.

Stanovení vzdálenost L_k:

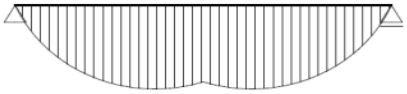
$$\frac{L_k}{L} = 0{,}32 \quad \rightarrow \quad L_k = L \,.\, 0{,}32$$

$$L_k = 12 \,.\, 0{,}32$$

$L_k = 3{,}85\text{m}$ → zaokrouhlíme tedy na 3,9 m

Je patrné, že prvotní empirický návrh dvojitého vzpínadla, kdy bylo uvažováno rozdělení konstrukce na tři symetrická pole, byl téměř optimální.

Tuhost jednotlivých prvků vzpínadla

TUHOST NOSNÍKU	TUHOST TÁHLA	VZEPĚTÍ	PRŮBĚH OHYBOVÉHO MOMENTU
MALÁ	VELKÁ	VELKÉ	
STŘEDNÍ	STŘEDNÍ	STŘEDNÍ	
VELKÁ	MALÁ	MALÉ	

obr.21.: Vliv tuhosti prvků na průběh momentů [9]

Vzhledem k relativně malé normálové síle v ocelovém táhle budou vycházet malé tuhosti táhla, tedy třetí případ na obrázku 9.

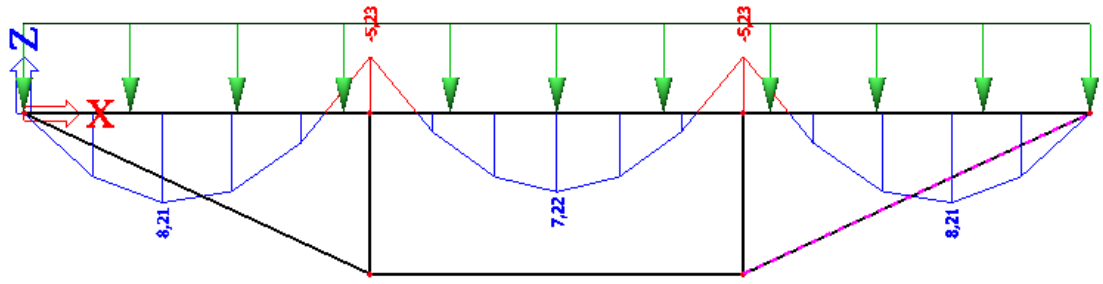
Průřez nosníku se již příliš měnit nebude, proto bude zaměřen proces optimalizace na samotné táhlo, u kterého je z hlediska statiky potřebná velkou tuhost a proto větší průřez, ale z hlediska ekonomičnosti návrhu je snaha o maximální využití průřezu táhla.

Tento problém lze řešit zavedením excentricity v místě uložení nosníku. Bude tedy připuštěna menší tuhost táhla a tím vzniknou větší kladné momenty na nosníku, které ale následně vykompenzuje zavedení excentricity a cílem bude získání původního průběhu momentů s použitím táhla s nižší tuhostí.

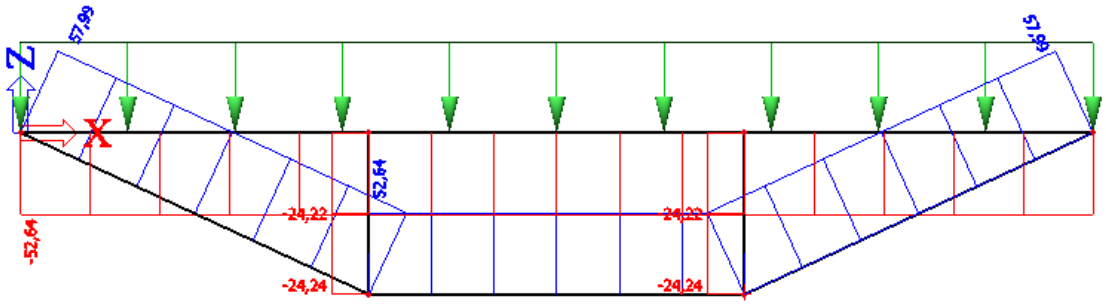
K této problematice již bude využito programu Scia Engineer, ve kterém bude celá konstrukce vymodelována.

Optimalizace vzpínadla pomocí tuhosti táhla a excentricity:

průběh M_y [kNm]

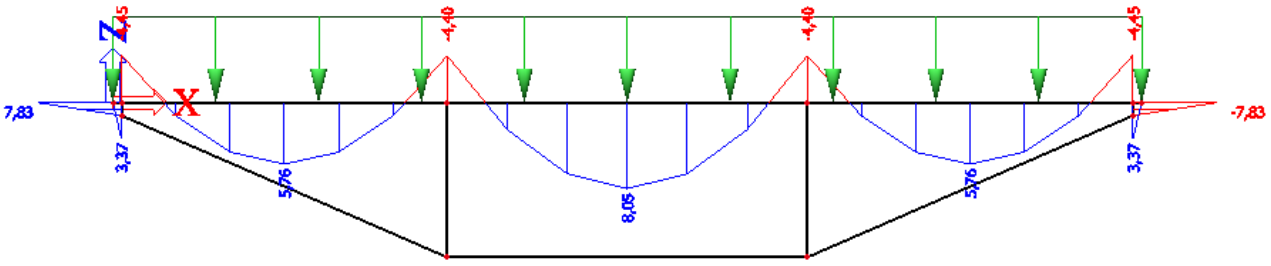


průběh N [kN]

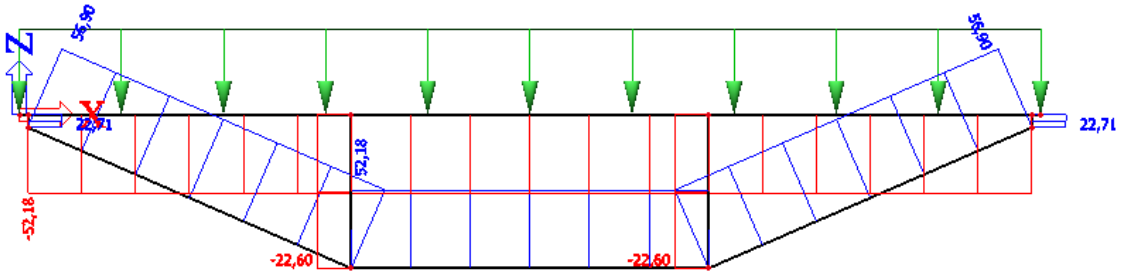


obr.:22. Průběh vnitřních sil bez vlivu excentricity, tuhost táhla nízká

průběh M_y [kNm]

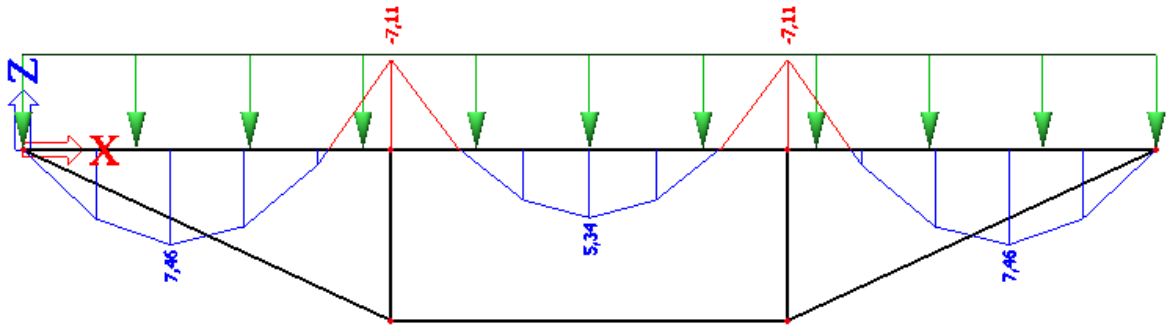


průběh N [kN]

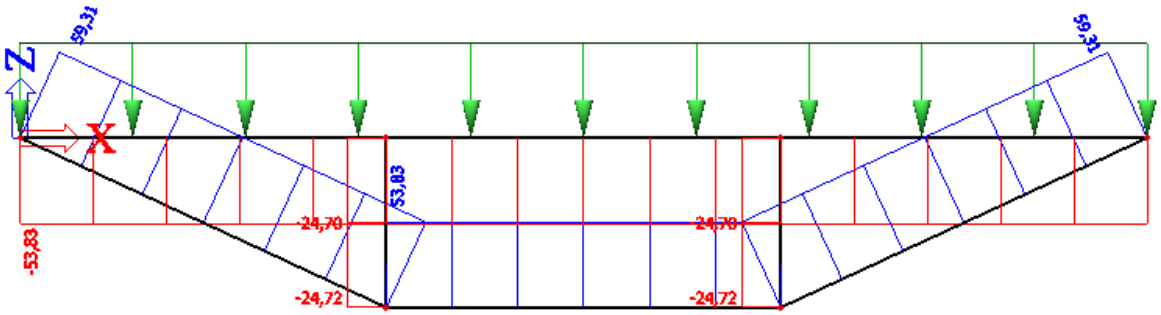


obr.:23. Průběh vnitřních sil malá tuhost táhla, excentricita 150mm

průběh M_y [kNm]

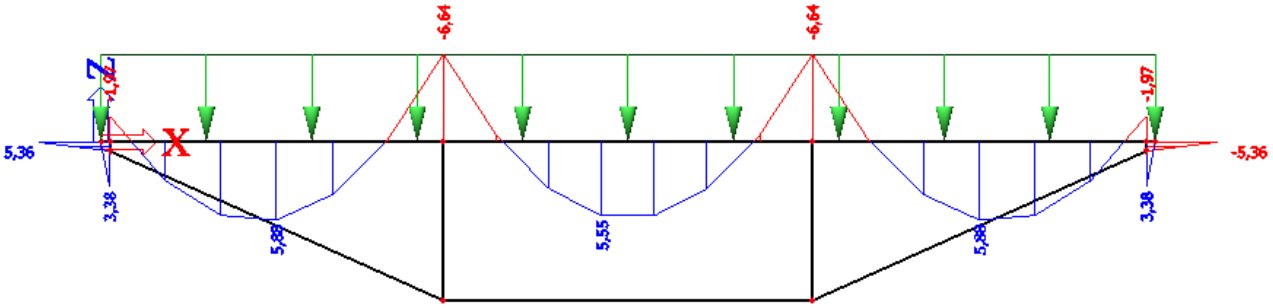


průběh N [kN]

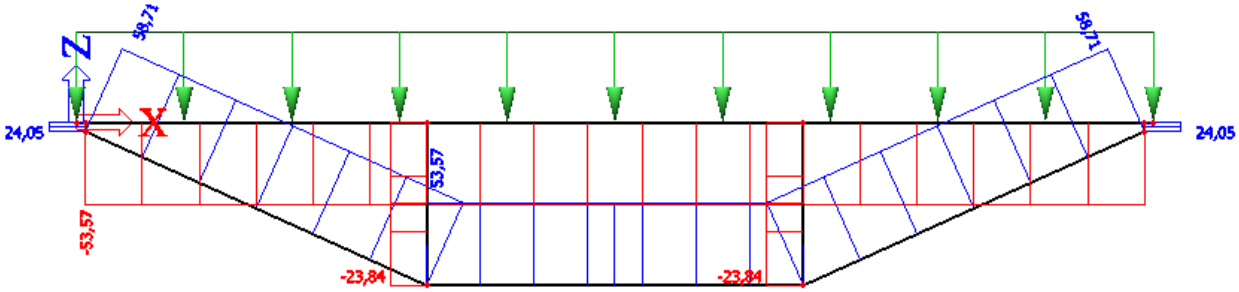


obr.:24. Průběh vnitřních sil bez vlivu excentricity tuhé táhlo

průběh M_y [kNm]



průběh N [kN]



obr.:25. Průběh vnitřních sil tuhé táhlo excentricita 150mm

10.4. Shrnutí:

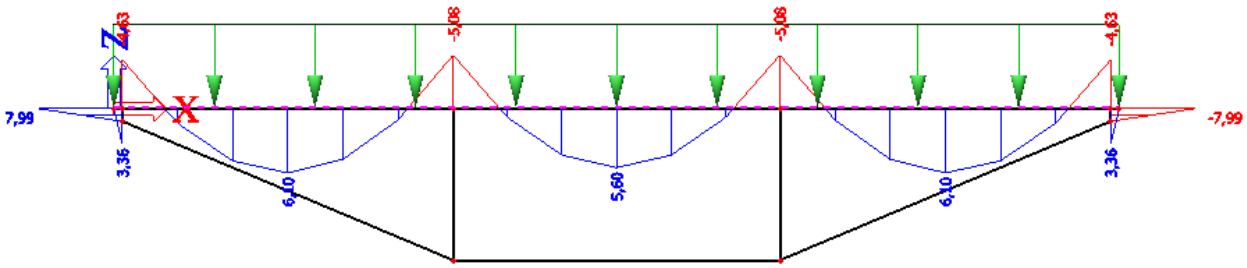
Z výše uvedených kombinací je patrné, že nejefektivnější řešení je použití táhla s nízkou tuhostí a zavedení excentricity s hodnotou 150mm.

Využití excentricity je velmi výhodné, bohužel v uvažovaném případě, kdy je využito táhlo s malou tuhostí, při zavedení excentricity nad hodnotu 150mm dojde k překročení maximální hodnoty momentu na hlavním nosníku a bylo by nutné navrhovat další opatření na pokrytí tohoto momentu v místě uložení, což by vedlo ke zneefektivnění celého návrhu. Proto je nutné aplikovat excentricitu pouze do hodnoty 150mm.

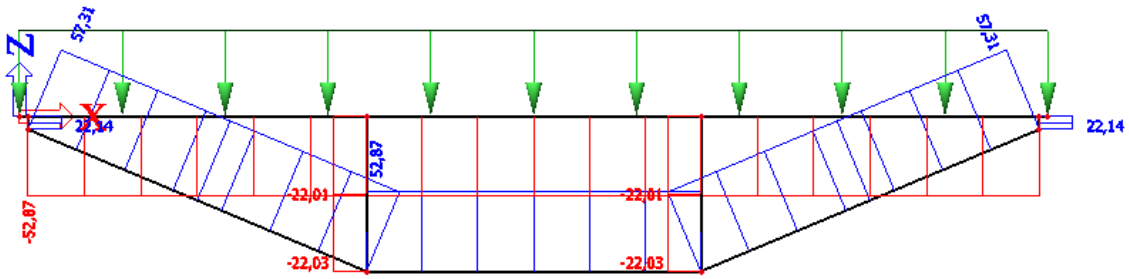
Další jev, který vyvodila zavedená excentricita je nárůst mezipodporového momentu M_3, na který by nyní musel být nosník navržen. Snížení tohoto momentu je možné provést opětovnou úpravou hodnoty L_k, která byla stanovena v předchozí kapitole na hodnotu 3,9m. Vlivem excentricity se tato hodnota navýší.

10.5. Úprava roztečí vzpěr

průběh M_y [kNm]



průběh N [kN]



obr.:26. Průběh vnitřních sil tuhé táhlo excentricita 150mm, L_k=4,05m

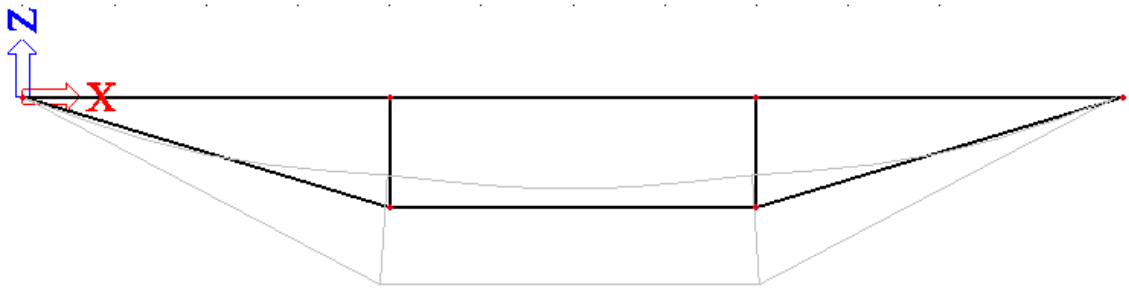
Po úpravě roztečí vzpěr a excentricity se moment ustálil na maximální hodnotě 6,1kNm, normálová síla táhla 57,3kN a normálová síla hlavního trámu 52,9kNm.

Hodnoty záporných momentů by bylo možné navýšit a tím docílit stejných hodnot jako u momentů kladných, avšak na úkor zvýšení tuhosti táhla. Nyní budou na hodnoty vnitřních sil navrženy konkrétní prvky a následně porovnány s předchozími návrhy.

10.6. Návrh prvků optimalizovaného vzpínadla:

Hlavní nosný trám – posouzení

Před vlastním návrhem hlavního nosného trámu je nutné stanovit vzpěrné délky nosníku. Vzpěrná délka kolmo na rovinu vzpínadla je díku fixaci pomocí vaznic 1m, ve směru roviny vzpínadla se využívá ke stanovení vzpěrné délky lineární stabilitní výpočet v programu SCIA, který stanoví součinitel kritického zatížení k a následně je nutné provést stabilitní výpočet pro určení vzpěrné délky.



obr.27. : Deformace jednoduchého vzpínadla

Určení vzpěrné délky pomocí stabilitního výpočtu – lineární bifurkační analýza LBA:

Koeficient *k* je poměr mezi kritickým a návrhovým zatížením.

Po vymodelování konstrukce a nedefinování zatěžovacích stavů bude vybrána nejnižší hodnota koeficientu *k* pro daný typ vybočení.

V tomto případě je k=21,7 [-]

Jako první dojde k vybočení hlavního nosného trámu, jak je patrné z obr.27.

Stanovení kritické síly, při které dojde k vybočení prutu:

$N_{CR}=k.N_{SD}$

$N_{CR}=21,7.52,9=1147,93kN$

N_{CR} – je kritická síla v prutu, při které dojde k vybočení ideální konstrukce

N_{SD} – je návrhová osová síla v daném prutu

Dále pro prvky ze dřeva platí:

$$\lambda_{rel,c}=\sqrt{\frac{A.f_{c,0,k}}{N_{CR}}}=\sqrt{\frac{20000.24}{1147930}}=0,6466$$

parametr $\lambda_{rel,c}$ se nazývá poměrná štíhlost a v ČSN EN 1995-1-1 je vyjádřena vztahem:

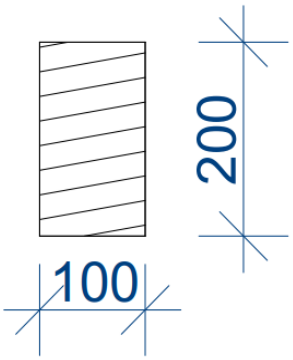
$$\lambda_{rel,c}=\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}}=\frac{\lambda}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}\rightarrow\lambda=\pi.\frac{\lambda rel,c}{\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}}=40,204$$

$$\lambda=\frac{l_{cr}}{i}\rightarrow l_{cr}=\lambda.i_y=57,7.40,204=2320mm$$

[11]

typ dřeva	GL24h	
pevnost v talku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	= 24MPa
ohybová pevnost rovnoběžně s vlákny	$f_{m,y,k}$	= 24MPa
5% kvantil modulu pružnosti	$E_{0,05}$	= 9400MPa
výška průřezu	h	= 200mm
šířka průřezu	b	= 100mm
normálová síla	N_{Ed}	= 53kN
ohybový moment k ose y	M_y	= 6,1kNm
vzpěrná délka k ose y	L_y	= 1m
vzpěrná délka k ose z	L_z	= 2,32m
vzpěrná délka pro příčnou a torzní tuhost	L_{ef}	= 12m
součinitel podmínek působení zatížení	k_m	= 0,7
součinitel geometrické imperfekt	β_c	= 0,2

Parametry průřezu:



A = b.h = 0,1.0,2 = 0,02m^2

$I_y = \frac{1}{12} b.h^3 = \frac{1}{12} 0{,}1.0{,}2^3 = 66{,}7.10^{-6} m^4$

$I_z = \frac{1}{12} h.b^3 = \frac{1}{12} 0{,}2.0{,}1^3 = 16{,}7.10^{-6} m^4$

$W_y = \frac{1}{6}.b.h^3 = \frac{1}{6} 0{,}1.0{,}2^2 = 667.10^{-6} m^3$

$W_z = \frac{1}{6}.h.b^3 = \frac{1}{6} 0{,}2.0{,}1^2 = 333.10^{-6} m^3$

$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{66{,}7.10^{-6}}{0{,}02}} = 57{,}7mm$

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{16{,}7.10^{-6}}{0{,}02}} = 28{,}9mm$

Součinitel vzpěru k ose y

štíhlostní poměr - osa y

$\lambda_y = \frac{Ly}{iy} = \frac{1}{0{,}57{,}7} = 17{,}3$

$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda y}{\pi}.\sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{17{,}3}{3{,}14}.\sqrt{\frac{24.10^6}{9{,}4.10^9}} = 0{,}278$

$k_y = 0{,}5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, y - 0{,}3) + \lambda_{rel,y}{}^2$

$= 0{,}5.(1+0{,}2.(0{,}278-0{,}3)+0{,}278^2) = 0{,}536$

$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda^2_{rel,y}}} = \frac{1}{0{,}536+\sqrt{0{,}536^2-0{,}278^2}} = 1{,}00$

$k_{cy} = 1$

Součinitel vzpěru k ose z

štíhlostní poměr – osa z $\lambda_z = \frac{Lz}{iz} = \frac{2,32}{0,0289} = 79,7$

$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda z}{\pi} . \sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{79,7}{3,14} . \sqrt{\frac{24.10^6}{9,4.10^9}} = 1,2818$

$k_z = 0,5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, z - 0,3) + \lambda_{rel,z}{}^2$

$= 0,5.(1+0,2.(1,282-0,3)+1,282^2) = 1,419$

$k_{cz} = \frac{1}{k_z+\sqrt{k_z^2-\lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,419+\sqrt{1,419^2-1,28^2}} = 0,493$

$k_{cz,min} = \min (1;0,493) = 0,493$

Součinitel používaný pro příčnou a torzní stabilitu

Kritické napětí v ohybu $\sigma_{m,crit} = \frac{E_{0,05}.0,78.b^2}{h.L_{ef}} = \frac{9,4.10^9.0,78.0,1^2}{0,2.12} = 30,55 MPa$

Poměrná štíhlos v ohybu $\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,y,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24.10^6}{30,55.10^6}} = 0,886$

Součinitel používaný pro příčnou torzní stabilitu

$k_{crit} = 1,56-0,75. \lambda_{rel,m}=1,56-0,75.0,886=0,896$

Modifikační součinitel pro dřevo dle Eurokódu 5, tab.2.3, 3.1

třída trvání zatížení	Střednědobé zatížení
modifikační součinitel	k_{mod} = 0,8 (tab. 3.1)
třída provozu	Třída provozu 1
materiál	Lepené lamelové dřevo

Výpočet napětí

Návrhová napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$\sigma_{c,0d} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{53000}{0,02} = 2,65\ MPa$

Návrhové napětí v ohybu:

$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,Ed}}{Wy} = \frac{6100}{667.10^{-6}} = 9,15\ MPa$

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}.f_{c,0,k}}{Y_m} = \frac{0,8.24}{1,25} = 15,36\ MPa$

Návrhová pevnost v ohybu:

$f_{m,d} = \frac{k_{mod}.k_h.f_{m,y,k}}{Y_m} = \frac{0,8.1.24}{1,25} = 15,36\ MPa$

Posouzení

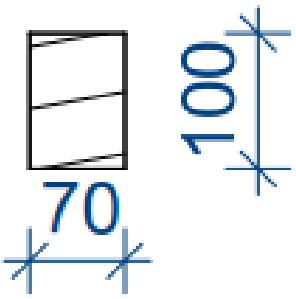
$$s = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,min} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} = \frac{2,65}{0,493.15,36} + \frac{9,15}{0,896.15,36} = 0,995$$

0,995 ≤ 1 → průřez vyhovuje

Vzpěra – posouzení

typ dřeva	C24	(EN 338)
pevnost v talku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	= 21MPa
5% kvantil modulu pružnosti	$E_{0,05}$	= 7,4GPa
výška průřezu	h	= 100mm
šířka průřezu	b	= 70mm
normálová síla	N_{Ed}	= 22kN
vzpěrná délka k ose y	L_y	= 1,8m
vzpěrná délka k ose z	L_z	= 1,8m
součinitel geometrické imperfekt	β_c	= 0,2

Parametry průřezu



A = b.h = 0,07.0,1 = 0,007m^2

$I_y = \frac{1}{12} b.h^3 = \frac{1}{12} 0,0,07.0,1^3 = 5,83.10^{-6} m^4$

$I_z = \frac{1}{12} h.b^3 = \frac{1}{12} 0,1.0,07^3 = 2,86.10^{-6} m^4$

$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{5,83.10^{-6}}{0,007}} = 29\ mm$

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{2,86.10^{-6}}{0,007}} = 20mm$

Součinitel vzpěru k ose y

štíhlostní poměr - osa y

$\lambda_y = \frac{Ly}{iy} = \frac{1,8}{0,03} = 62,4$

$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda y}{\pi} . \sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{62,4}{3,14} . \sqrt{\frac{21.10^6}{7,4.10^9}} = 1,06$

$k_y = 0,5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, y - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2$

$= 0,5.(1+0,2.(1,06-0,3)+1,06^2) = 1,13$

$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,13+\sqrt{1,13^2-1,06^2}} = 0,647$

Součinitel vzpěru k ose z

štíhlostní poměr – osa z $\lambda_z = \frac{Lz}{iz} = \frac{1,8}{0,02} = 89,1$

$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda z}{\pi} . \sqrt{\frac{f_{c,0ck}}{E_{0,05}}} = \frac{89,1}{3,14} . \sqrt{\frac{21.10^6}{7,4.10^9}} = 1,51$

$k_z = 0,5.(1+ \beta_c.(\lambda rel, z - 0,3) + \lambda_{rel,z}{}^2$

$= 0,5.(1+0,2.(1,51-0,3)+1,51^2) = 1,76$

$k_{cz} = \frac{1}{k_z+\sqrt{k_z^2-\lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,76+\sqrt{1,76^2-1,51^2}} = 0,375$

Modifikační součinitel pro dřevo dle Eurokódu 5, tab.2.3, 3.1

třída trvání zatížení	Střednědobé zatížení
modifikační součinitel	k_{mod} = 0,8 (tab. 3.1)
třída provozu	Třída provozu 1
materiál	Rostlé dřevo

Únosnost prutu

Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$f_{c,0,k}$ = 21 MPa

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}.f_{c,0,k}}{Ym} = \frac{0,8.21}{1,3} = 12,9MPa$

Výsledný součinitel vzpěru:

$k_{c,min}$ = min ($k_{c,y}$; $k_{c,z}$) = min (0,647; 0,375) = 0,375

Únosnost:

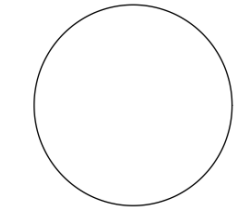
N_{rd} =$k_{c,min}$. A .$f_{c,0,d}$ = 0,375.0,01.12,9.10^6

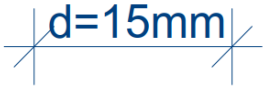
=29,7kN

Posouzení:

$s = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{22}{29,7} = 0,743 \leq 1$ → průřez vyhovuje

Posouzení ocelového táhla – prostý tah EC EN 1993-1-1





Normálová síla N_{Ed} = 57,3 kN

Parametry průřezu:

Plocha táhla: A = 177 mm^2

Materiál táhla: S355

Průměr táhla d = 0,015 m

Únosnost v tahu:

$$N_{Rd} = \frac{A.f_y}{Ymo} = \frac{177.355}{1} = 62{,}7\ kN$$

Posouzení:

$$s = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{57{,}3}{62{,}7} = 0{,}914 \leq 1 \rightarrow \text{průřez vyhovuje}$$

11. Závěr:

Níže uvedené tabulky shrnují použitý materiál pro jednotlivé posuzované konstrukce.

Výstupem tabulek je orientační hmotnost a cena jednotlivých konstrukcí.

Je patrné, že prostý lepený nosník na rozpětí 12m, na kterém vznikají momentové účinky o hodnotě 99kNm, je značně neekonomický. Jeho cena vzhledem k velké spotřebě materiálu se pohybuje okolo 19500 Kč za jeden nosník a množství spotřebovaného materiálu na nosník je 1,2m^3 lepeného lamelového dřeva.

Po aplikaci jednoduchého vzpínadla se hodnota momentu zmenšila na 25,5kNm, cena jedné konstrukce snížila o 32% a to na cenu 13300 Kč a množství použitého řeziva kleslo na 0,77m^3.

K dalšímu snížení ceny konstrukce došlo po přidání druhé vzpěry, tedy z jednoduchého vzpínadla bylo vytvořeno vzpínadlo dvojité, hodnota momentového účinku klesla na 10kNm, cena se snížila oproti prostému trámu o 63% a to na 7100 Kč a množství řeziva kleslo na 0,4m^3.

TABULKA POUŽITÉHO MATERIÁLU - prostý nosník										
	b [m]	h[m]	D[m]	PLOCHA [m^2]	DÉLKA PRVKU [m]	OBJEM [m^3]	OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg/m3]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]	ORIENTAČNÍ CENA ZA JEDNOTKU [Kč]	CENA [Kč]
LEPENÉ DŘEVO GL24h	0,18	0,56		0,1008	12	1,2096	380	459,648	16000	19354
						Hmotnost konstrukce [kg]		460	Cena konstrukce [Kč]	19354

Tabulka 1

TABULKA POUŽITÉHO MATERIÁLU - jednoduché vzpínadlo										
	b [m]	h[m]	D[m]	PLOCHA [m^2]	DÉLKA PRVKU [m]	OBJEM [m^3]	OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg/m3]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]	ORIENTAČNÍ CENA ZA JEDNOTKU [Kč]	CENA [Kč]
LEPENÉ DŘEVO GL24h	0,18	0,36		0,0648	12	0,7776	380	295,488	16000	12442
OCEL S355			0,022	0,0004	12,236	0,0046	7850	36,499988	21	766
ROSTLÉ DŘEVO	0,05	0,18		0,009	1,2	0,0108	470	5,076	6500	70,2
						Hmotnost konstrukce [kg]		337	Cena konstrukce	13278

Tabulka 2

TABULKA POUŽITÉHO MATERIÁLU - dvojité vzpínadlo										
	b [m]	h[m]	D[m]	PLOCHA [m^2]	DÉLKA PRVKU [m]	OBJEM [m^3]	OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg/m3]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]	ORIENTAČNÍ CENA ZA JEDNOTKU [Kč]	CENA [Kč]
LEPENÉ DŘEVO GL24h	0,14	0,24		0,0336	12	0,4032	380	153,216	16000	6451
OCEL S355			0,018	0,0003	12,2	0,0031	7850	24,32558	21	511
ROSTLÉ DŘEVO	0,05	0,12		0,006	2,4	0,0144	470	6,768	6500	93,6
						Hmotnost konstrukce [kg]		184	Cena konstrukce	7056

Tabulka 3

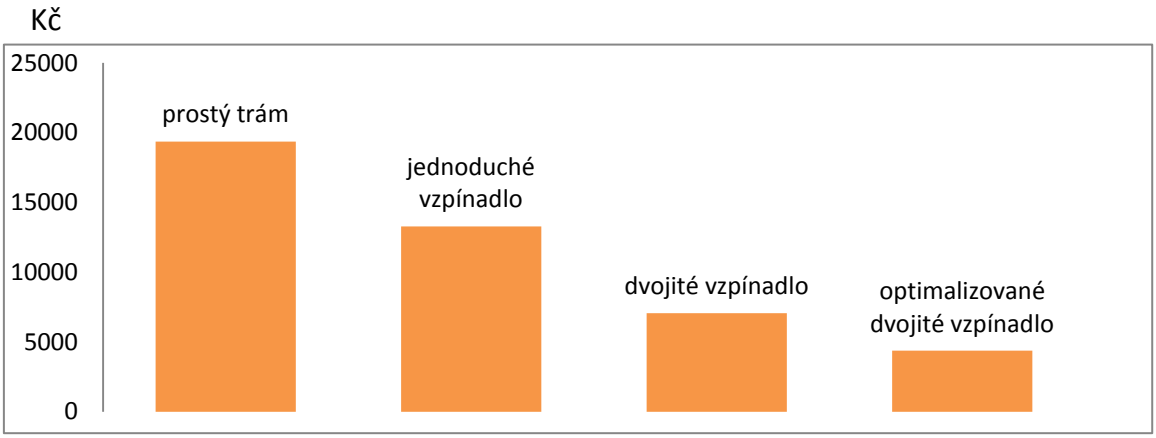
TABULKA POUŽITÉHO MATERIÁLU - optimalizované dvojité vzpínadlo										
	b [m]	h[m]	D[m]	PLOCHA [m^2]	DÉLKA PRVKU [m]	OBJEM [m^3]	OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg/m3]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]	ORIENTAČNÍ CENA ZA JEDNOTKU [Kč]	CENA [Kč]
LEPENÉ DŘEVO GL24h	0,1	0,2		0,02	12	0,24	380	91,2	16000	3840
OCEL S355			0,015	0,0002	12,74	0,0023	7850	17,6715903	21	371
ROSTLÉ DŘEVO	0,07	0,1		0,007	3,6	0,0252	470	11,844	6500	163,8
						Hmotnost konstrukce [kg]		121	Cena konstrukce	4375

Tabulka 4

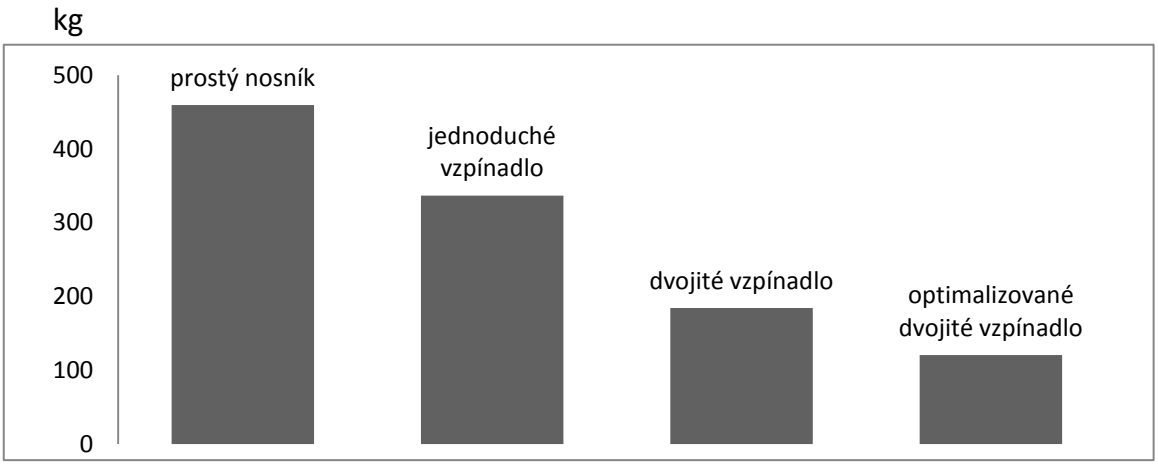
V této práci byla vyhodnocena konstrukce dvojitého vzpínadla jako nejvhodnější, jak z hlediska ekonomičnosti, geometrie, tak náročnosti na provádění. Proto bylo dvojité vzpínadlo podrobeno procesu optimalizace, který obnášel úpravu roztečí vzpěr, úpravu tuhostí jednotlivých prvků a v neposlední řadě navýšení vzepětí celé konstrukce vzpínadla. Těmito úpravami bylo docíleno snížení momentového účinku na 6,1kNm, cena klesla oproti prostému trámu o 77% a to na cenu 4400 Kč za jedno vzpínadlo a spotřeba materiálu klesla na 0,24m^3.

Uvedené ceny jsou pouze za materiál a není v nich započítána cena práce za provedení konstrukce a cena doplňkových prvků vzpínadla. Pokud bude předpokládána cena práce a doplňkových konstrukcí 40% z ceny konstrukce, stále bude optimalizované vzpínadlo o 65% levnější, než cena prostě ohýbaného lepeného lepeného nosníku.

Samotným procesem optimalizace bylo tedy dosaženo snížení ceny konstrukce oproti dvojitému vzpínadlu o 37%.



graf 3. porovnání nákladů na realizaci jednotlivých konstrukcí



graf 4. porovnání hmotností jednotlivých konstrukcí

12. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

[1] Wikimedia foundation, Optimalizace (matematika)

http://cs.wikipedia.org/wiki/Optimalizace_(matematika)

[2] Ferjenčík, P. – Tesár, A.: Predpäté kovové konštrukcie. Časť 2b., Predpäté nosníky priehradove, plnostenné vzpínadlá a vešadlá, Kand. dis.: Bratislava, SVŠT, f. stavební, 1965, str. 101-112

[3] American institute of Steel Construction: Steel construction manual, 13th edition, 2005, str. 38-44

[4] http://concrete.fsv.cvut.cz/pomucky/down/vzor_zat.pdf

[5] http://www.fce.vutbr.cz/bzk/simunek.p/prvky/01_cv1_zatizeni_teorie_tabulky.pdf

[6] Ing. JAN BEDÁŇ Ing. PETR FRANTÍK, Ph.D. Ing. TOMÁŠ PAIL Ing. MICHAL ŠTAFA – BD01 STATIKA 1 cvičebnice str. 21-29

[7] Kuklík, P. – Blažek, V.: Stavební mechanika 40, Praha ČVUT, 2002, str. 5-8

[8] PETRTÝL, Miroslav a Radmila VONDROVÁ.: *Stavební mechanika 32: příručka základů stavební mechaniky a pružnosti*. Vyd. 4. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003

[9] SOUČEK, Jakub.: *Využití vzpínadel a věšadel u nosných konstrukcí*. Praha, 2011. Bakalářská práce. Fakulta stavební, ČVUT.

[10] fce.vutbr.cz. *VUT Brno.* [online]. 5.3.2002 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: *www.fce.vutbr.cz/BZK/svarickova.i/pdf/BL05/zat%C3%AD%C5%BEen%C3%AD%20v%C4%9Btrem.pdf*

[11] Wald, F. a kol.: K navrhování ocelových dřevěných a skleněných konstrukcí, podpora modelování dřevěných konstrukcí, strana 126-134, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2012

[12] vpupraha.cz. *VPÚ Deco Praha a.s..* [online]. 22.9.2008 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: *http://www.vpupraha.cz/cz/reference/2-pozemni-stavby/20-nove-ustredi-csob-radlicka-praha-5/*

[13] izdoprava.cz. *Internetový zpravodaj Komunikace a doprava.* [online]. 9.6.2013 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: *http://www.izdoprava.cz/dopravni-stavby-2/mosty/2013/lavka-pro-pesi-a-cyklisty-v-hradci-kralove-dostala-oceneni-v-soutezi-ceska-dopravni-stavba-2012/*

[14] panoramio.com. *panoramio.* [online]. 12.5.2012 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: *http://www.panoramio.com/photo/3841229*

13. SEZNAM POUŽITÝCH NOREM:

ČSN EN 1990 – kombinace zatížení

EN 1993-1-1 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings

EN 1995-1-1 (2004) (English): Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1

ČSN EN 1991-1-1 (Eurokód 1): Zatížení konstrukcí – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha : ČNI, 2004.