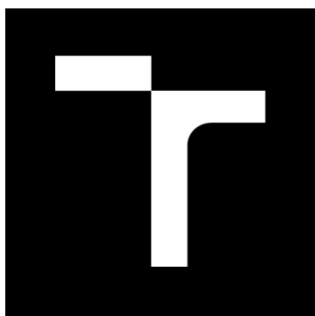




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA MONTOVANÉ HALY

STATIC ANALYSIS OF THE PREFABRICATED HALL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Ondřej Holíš

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. ZBYNĚK VLK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Ondřej Holíš
Název	Statická analýza montované haly
Vedoucí práce	Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.

Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Norma : ČSN EN 1991-1 - Eurokód 1

ČSN EN 1993-1-1 - Eurokód 3

Bittnar Z., Šejnoha J. - Numerické metody mechaniky 1,2

Kadlčák J., Kytýr J. : Statika stavebních konstrukcí I a II

Manuály k systému RFEM

Zásady pro vypracování

Cílem práce je statická analýza montované železobetonové haly. Analýza bude provedena po jednotlivých částech konstrukce vhodnými metodami pro ruční řešení. Při výpočtu budou zohledněny náběhy použité u jednotlivých dílců konstrukce. Dosažené výsledky budou porovnány s hodnotami získanými z prostorového modelu konstrukce ve výpočetním systému RFEM.

Struktura bakalářské práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Práce se zabývá výpočtem vnitřních sil a deformací trojlodní, jednopodlažní, průmyslové haly. Ke statické analýze byla použita metoda integrace ohybové a Mohrova metoda pro výpočet průhybů. V rámci práce byla také řešena problematika náběhů a jejich vlivu na statické chování konstrukce. K výpočtům a tisku grafů sloužily programy SMath a Mathcad. Výsledky byly porovnávány s rovinným modelem konstrukce v programu RFEM 6.02.

Klíčová slova

integrace diferenciálních rovnic ohybové čáry, mohrova metoda, program RFEM 6.02, program SMath, program MathCad, zatížení, železobetonová konstrukce, jednopodlažní hala, náběhy, vnitřní síly, deformace, prostý nosník, funkce momentu setrvačnosti

Abstract

This thesis is aimed at the calculation of inner forces and deformations of three-aisled, one-storey, industrial hall. For the structural analysis the integration of the elastic curve method has been used along with Mohr's method for calculation of deflections. The problematics of sloped beams and their influence on the structural behaviour of the construction has also been included in this thesis. For the calculations and diagram plots the programmes such as SMath and MathCad have been used. The results have then been compared with multiple planar models of the construction made in the RFEM 6.02 programme.

Keywords

Integration of diferencial equation of elastic curve, Mohr's method, software RFEM 6.02, software SMath, software MathCad, load, reinforced concrete, one-storey hall, sloped beams, inner forces, deflections, simply supported beam, the moment of inertia function

Bibliografická citace

Ondřej Holíš *Statická analýza montované haly*. Brno, 2022. 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Zbyněk Vlček, Ph.D.

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy závěrečné práce

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Statická analýza montované haly* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2022

Ondřej Holíš

autor práce

Prohlášení o původnosti závěrečné práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Statická analýza montované haly* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2022

Ondřej Holíš

autor práce

Poděkování

Předně bych chtěl poděkovat své rodině, za psychickou i materiální podporu v sebetěžších chvílích. Jmenovitě hlavně svému dědovi a otci, oba autorizovaní projektanti pozemních staveb, za profesní vedení a odborné zázemí. Děkuji.

Další odstavec bude patřit mé trpělivé přítelkyni a věrným kamarádům, ať už od nastoupení na vysokou školu, nebo z dřívějších let. Děkuji.

V neposlední řadě náleží poděkování firmě KSS Seidl s.r.o. za poskytnutí výrobní dokumentace k posuzované konstrukci a panu vedoucímu Ing. Zbyňku Vlkovi, Ph.D., za jeho odborný, lidský a nadšený přístup k vedení bakalářské práce. Děkuji.

Obsah

Úvod	10
1 Teoretická část.....	11
1.1 Metoda integrace diferenciálních rovnic ohybové čáry	11
1.2 Mohrova metoda	13
2 Geometrie a statické schéma	15
2.1 Popis haly.....	15
2.2 Statické schéma	16
3 Zatížení	17
3.1 Vlastní tíha konstrukcí	17
3.2 Zatížení sněhem	17
3.3 Zatížení větrem	18
3.4 Uvažované zatížení při výpočtech	20
4 Postup ručního výpočtu.....	23
4.1 Výpočet neznámých sil X metodou jednotkových sil	24
4.2 Výpočet normálových sil na sloupech a vaznících	27
4.3 Výpočet posouvajících sil a momentů na vaznici	29
4.4 Posouvající síly na sloupech a vaznících	32
4.5 Ohybové momenty na sloupech a vaznících	35
4.6 Odvození funkce momentu setrvačnosti.....	37
4.7 Výpočet deformací vaznice a vazníku Mohrovou metodou.....	42
4.8 Výpočet průhybu vazníku pomocí metody integrace ohybové čáry.....	45
5 Porovnání výsledků	51

5.1	Normálové síly rámu.....	51
5.2	Posouvající síly rámu.....	53
5.3	Ohybové momenty na rámu.....	54
5.4	Deformace vazníku.....	57
5.5	Statické veličiny vaznice.....	58
6	Závěr.....	61
	Literatura	63
	Seznam obrázků	64
	Seznam tabulek.....	66

Úvod

Bakalářská práce se zabývá statickou analýzou jednopodlažní, trojlodní haly, jejíž nosný systém byl navrhnout z železobetonových prefabrikovaných prvků.

K cílům práce patří určení zatížení jak stálého, tak klimatických, která se na zmíněné konstrukci vyskytují a aplikovat je na vhodně zvolené statické schéma. Následoval výpočet vnitřních sil rámu a určení deformací vybraného vazníku a vaznice. Ty jsou zajímavé především svou složitější geometrií s proměnnou výškou průřezu. Pro porovnání získaných výsledků sloužily výpočetní modely v programu RFEM od společnosti Dlubal.

K řešení výše popsaných cílů a získávání výsledných hodnot bylo ke statickým veličinám přistupováno jako k funkcím, které se použily pro tisk vlastních grafů vnitřních sil a deformací v matematických programech SMath a Mathcad.

Zvláštní pozornost byla v průběhu práce věnována statické analýze prutových prvků s náběhy a porovnání jejich charakteristik s pruty stejného průřezu o konstantní, průměrné výšce.

Geometricky složitější konstrukční prvky ztrácely v blízké minulosti na popularitě, díky vyšší pracnosti návrhu i realizace a relativně levným stavebním materiálům. Nicméně situace na trhu je proměnná, a i při stále se zvyšujících nárocích z hlediska ochrany životního prostředí může dojít k nárustu jejich oblíbenosti. Jak se i tato bakalářská práce snaží nastínit, vhodným návrhem náběhů je možné dosáhnout menšího průhybu se stejným množstvím stavebního materiálu, jako při uvažování konstantního průřezu po celé délce prutu.

Prvky s proměnnou výškou průřezu představovaly výpočetní výzvu. Bylo nutné matematicky popsat změnu momentu setrvačnosti v závislosti na sklonu náběhu a následně s touto funkcí operovat při výpočtu deformací prutů, kde se při integraci vyskytovala ve jmenovateli. Zde se projevil jako nepostradatelný program Mathcad, který se po pár neortodoxních úpravách v matematickém zápisu a s využitím Mohrovy metody dostal k výsledným hodnotám.

1 Teoretická část

Pro popsání posunů a pootočení libovolného průřezu na staticky určeném nosníku je možné použít více výpočetních metod. [1] Pro potřeby této bakalářské práce byly využity metody *integrace diferenciálních rovnic ohybové čáry* a *Mohrova metoda*. Jejich základní principy jsou popsány v následujících kapitolách.

1.1 Metoda integrace diferenciálních rovnic ohybové čáry

Libovolné zatížení $q(x)$ na prostém nosníku s konstantním průřezem vyvolává pružnou deformaci, při které se rovinná osa nosníku přetvoří v rovinnou křivku, neboli ohybovou čáru, vyjádřenou funkcí $w(x)$. Známe-li tuto funkci, je nyní snadné dopočítat pořadnice v jednotlivých bodech a zjistit tak průhyb námi analyzovaného prutu.

Odvození diferenciálních rovnic ohybové čáry se v odborné literatuře [1] popisuje na rovinném prostém nosníku zatíženém libovolným zatížením $q(x)$ jako

$$\varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{dw}{dx} = w', \quad (1.1)$$

kde dw značí derivaci ohybové čáry podle parametru x . Veličina φ vyjadřuje sklon tečny k ohybové čáře, dále jen pootočení průřezu.

Křivost rovinné čáry lze analyticky popsat rovnicí $w = f(x)$ a pak

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{w''}{(1 + w'^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (1.2)$$

v níž ρ je poloměr křivosti, pro který platí vztah [1]

$$\rho = \frac{dx}{d\varphi}. \quad (1.3)$$

Po zanedbání velmi malého výrazu w'^2 v rovnici (1.2) dostáváme

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\varphi}{dx} \approx -w''. \quad (1.4)$$

Za veličinu $d\varphi$, značící vzájemné pootočení způsobené ohybovým momentem $M(x)$, je nyní v rovnici (1.4) možné dosadit a dostáváme diferenciální rovnici 2. řádu na rovinném prostém nosníku, která zní

$$w''(x) = -\frac{M(x)}{E \cdot I(x)}, \quad (1.5)$$

kde $M(x)$ je funkce grafu ohybových momentů, E značí modul pružnosti materiálu nosníku a $I(x)$ pro funkci momentu setrvačnosti průřezu posuzovaného prutu.

Dvojí derivací (1.5) můžeme získat diferenciální rovnici ohybové čáry 4. řádu na námi zvoleném prostém nosníku

$$w^{IV}(x) = \frac{q(x)}{E \cdot I(x)}. \quad (1.6)$$

Při integraci ohybové čáry je nutné zohlednit okrajové podmínky a podmínky spojitosti. Ty se dají vyjádřit pomocí konstant C_1 a C_2 , vzniklých v průběhu následující postupné integrace. Pro rovnici pootočení dostáváme

$$w'(x) = \varphi(x) = -\int \frac{M(x)}{E \cdot I(x)} dx + C_1, \quad (1.7)$$

a pro rovnici ohybové čáry

$$w(x) = -\int \left[\int \frac{M(x)}{E \cdot I(x)} dx \right] dx + C_1 x + C_2. \quad (1.8)$$

Jednoduché nosníky s jedinou funkcí obrazce ohybových momentů $M(x)$ se řídí pouze okrajovými podmínkami, které udávají velikosti deformací v podporách nosníku. Pro náš popisovaný prostě podepřený nosník lze okrajové podmínky definovat jako

$$w_a = w_b = 0, \quad (1.9)$$

tedy hodnota průhybu v uzlech s kloubovými podporami musí být 0. Kdybychom ovšem uvažovali staticky určitý, v bodě a dokonale vetknutý nosník, jeho okrajové podmínky by vypadaly následovně

$$w_a = 0, \quad w'_a = \varphi_a = 0. \quad (1.10)$$

Uvažujeme-li staticky určitý nosník, kde dochází ke změnám v zápise funkcí $M(x)$ a $I(x)$ pro několik intervalů, musíme řešit takzvané podmínky spojitosti. Ty se vyjadřují pro každý bod ležící na rozhraní zmiňovaných intervalů a říkají, že v daném bodě musí platit rovnost

funkcí $w(x)$ a $w'(x)$ z předchozího a následujícího intervalu. Pro interval k a bod ležící na rozhraní intervalů k a $k + 1$ ve vzdálenosti od počátku nosníku a lze napsat tvar podmínek spojitosti

$$w_k(a) = w_{k+1}(a), \quad w'_k(a) = w'_{k+1}(a), \quad k = 1, 2 \dots n - 1, \quad (1.11)$$

kde n je počet intervalů ve kterých je průhyb nosníku popsán jedinou funkcí $M(x)$, případně $I(x)$. Integraci funkce ohybové čáry provádíme v každém intervalu zvlášť a pokaždé dostáváme 2 integrační konstanty, které musíme pomocí okrajových podmínek, nebo podmínek spojitosti řádně popsat. V našem případě prostého nosníku se jedná o 2 okrajové podmínky v místech podepření a $2(n - 1)$ podmínek spojitosti na hranicích intervalů.

1.2 Mohrova metoda

Uvažujme rovinný prostě podepřený nosník s funkcí spojitého zatížení $q(x)$, modulem pružnosti E a funkcí momentu setrvačnosti $I(x)$. Mohrova metoda vyplývá z analogie mezi diferenciální rovnicí rovnováhy nosníku [1]

$$\frac{d^2 M(x)}{dx^2} = M''(x) = -q(x), \quad (1.12)$$

a diferenciální rovnicí ohybové čáry nosníku

$$\frac{d^2 w(x)}{dx^2} = w''(x) = -\frac{M(x)}{E \cdot I(x)}. \quad (1.13)$$

Dostáváme tedy, že stejně jak počítáme ohybové momenty integrací funkce $q(x)$, tak můžeme určit i deformace $w(x)$ akorát integrací funkce ohybových momentů, která je dělena modulem pružnosti a funkcí momentu setrvačnosti. Vznikne nám vztah pro zatížení

$$\tilde{q}(x) = \frac{M(x)}{E \cdot I(x)}, \quad (1.14)$$

které následně aplikujeme na vhodně zvolený fiktivní nosník a vyřešíme posouvající síly $\tilde{V}(x)$ a ohybové momenty $\tilde{M}(x)$. Můžeme napsat závislosti

$$\frac{d^2 \tilde{M}(x)}{dx^2} = \tilde{q}(x) = -\frac{M(x)}{E \cdot I(x)} = \frac{d^2 w(x)}{dx^2}, \quad (1.15)$$

$$\frac{d\tilde{M}(x)}{dx} = \tilde{V}(x) = \varphi(x) = \frac{dw(x)}{dx}. \quad (1.16)$$

Fiktivní nosník musí plnit stejné okrajové podmínky, případně podmínky spojitosti, jako nosník reálný. Jestliže zajistíme jejich dodržení, platí na nosníku

$$w(x) = \tilde{M}(x), \quad (1.17)$$

$$w'(x) = \varphi(x) = \tilde{V}(x), \quad (1.18)$$

ze kterých plynou Mohrovy věty pro výpočet průhybu a pootočení průřezu nosníku. Ty podle [1] (str. 56-57) znějí následovně.

„Průhyb $w(x)$ v libovolném místě m daného nosníku je roven ohybovému momentu $\tilde{M}(x)$ na fiktivním nosníku, zatíženém redukovanou momentovou plochou $M(x)/EI(x)$.“

„Pootočení $\varphi(x)$ průřezu m daného nosníku je rovnou posouvající síle $\tilde{V}(x)$ na fiktivním nosníku, zatíženém redukovanou momentovou plochou $M(x)/EI(x)$.“

2 Geometrie a statické schéma

2.1 Popis haly

Jedná se o trojlodní, jednopodlažní, výrobní halu z železobetonových prefabrikovaných prvků. Hlavní nosnou konstrukci tvoří železobetonové sloupy, průřezu $0,5 \times 0,6$ m, výšky 10,6 m, v příčné osově vzdálenosti 24 m. V podélném směru jsou krajní sloupy od sebe osově vzdálené 6 m, vnitřní sloupy 12 m.

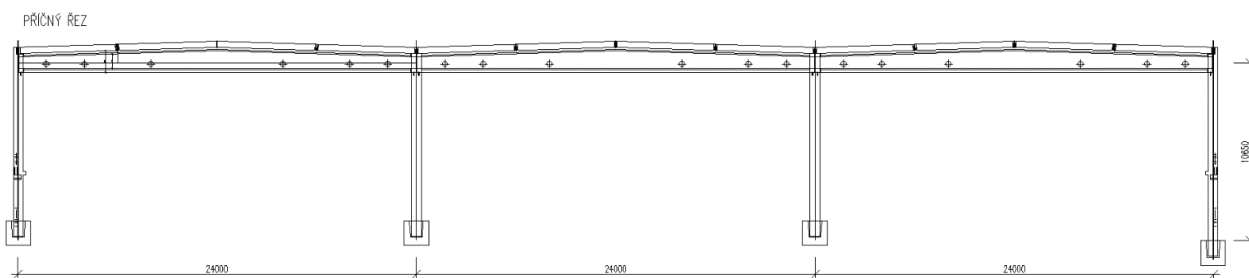
Dominantou příčného řezu jsou bezpochyby vazníky se sedlovým náběhem, které byly navrženy na osovou délku 24 m, s počáteční výškou průřezu 1,14 m a ve středu rozpětí 1,5 m. Průřez vazníků lze popsat jako „I“ profil s náběhy mezi pásnicí a stojinou.

Na vaznicích leží v podélném směru vaznice, které nesou střešní plášť haly. Jejich osová délka je 12 m. Průřez vaznice byl navržen do tvaru „T“, s proměnnou stojinou. Náběhy je možné charakterizovat jako z každé strany klesající, do $1/3$ celkové délky vaznice.

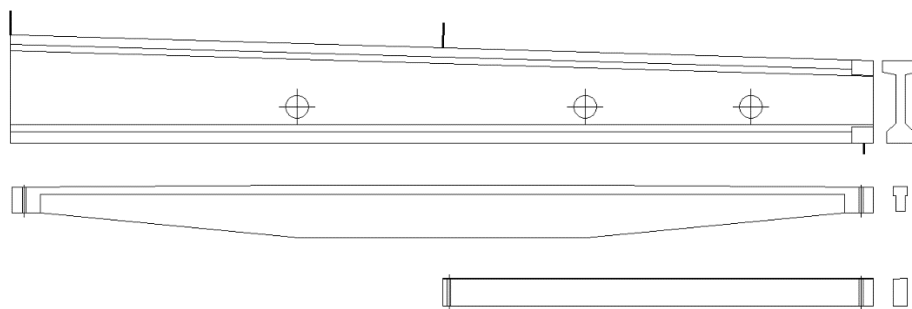
V krajních styčnicích roli vaznic nahrazují železobetonová ztužidla obdélníkového průřezu, které jsou v podélném směru 6 m dlouhé.

Obvodový plášť haly byl navržen ze sendvičových zateplených panelů Kingspan. Co se střešního pláště týče, jedná se o skladbu z hydroizolační fólie a polystyrenu ležících na trapézovém plechu, který roznáší tíhu střechy na vaznice.

Na okrajích haly se nachází 1,25 m vysoká atika stejné skladby jako obvodový plášť.



Obrázek 1: Příčný řez halou



Obrázek 2: Vazník, vaznice, ztužidlo

2.2 Statické schéma

Statické schéma prefabrikované haly se v literatuře běžně uvažuje jako jednopodlažní rám s kloubovými styčníky v hlavách sloupů a s vetknutím v patách sloupů. Vazníky a vaznice jsou uvažovány jako jednotlivé prosté nosníky a sloupy jako jednostranně vetknuté. Celý rám haly ovšem staticky určitý není. Vodorovné síly je možné díky tuhosti vazníků přerozdělit na všechny sloupy v příčném řezu. Vzniknou nám tedy normálové síly v příčlích rámu a zároveň posouvající síly a momenty u vnitřních sloupů. [2]

V rámci zjednodušení nebyly uvažovány excentricity jednotlivých prvků od os konstrukce. Samotné excentricity ovšem nejsou nijak výrazné, pohybují se v rozmezí 10-20 cm od os. Toto zjednodušení by nemělo mít výrazný vliv na výsledky statické analýzy.

Při ručních výpočtech byl také zanedbán sklon střednice vlivem náběhů. Touto úpravou došlo k výraznějším odchylkám v průběhu vnitřních sil rámu v programu RFEM oproti ručnímu výpočtu. Proto byl vytvořen i druhý rovinný model v programu RFEM, který předpokládá neměnnou průměrnou výšku průřezu příčle rámu. Odchyly se vyskytují převážně u statické analýzy sloupů a normálových sil na vaznicích. Na posouzení deformací vazníků však nemělo zjednodušení větší vliv.

3 Zatížení

3.1 Vlastní tíha konstrukcí

Dle [3].

Tíha vazníku a vaznice byla vygenerována programem RFEM.

Tíha ztužidla: $0,2 \cdot 0,38 \cdot 25 = 1,9 \text{ kN/m}$

Tíha sloupu: $0,5 \cdot 0,6 \cdot 25 = 7,5 \text{ kN/m}$

Tíha střešního pláště:

Hydroizolační fólie z PVC-P: $0,02 \text{ kN/m}^2$

Pěnový polystyren EPS: $0,2 \cdot 15 = 3 \text{ kN/m}^2$

Trapézový plech TR 60 (1 mm): $0,1 \text{ kN/m}^2$

Ostatní (5 %): $0,16 \text{ kN/m}^2$

$$\Sigma = 3,27 \text{ kN/m}^2$$

Tíha obvodového pláště

Izolační panely KS 1000 $0,16 \text{ kN/m}^2$

Ostatní (5 %) $0,01 \text{ kN/m}^2$

$$\Sigma = 0,17 \text{ kN/m}^2$$

3.2 Zatížení sněhem

Zatížení sněhem bylo stanoveno v souladu s normou ČSN EN 1991-1-3, dle které byl výpočet proveden. [4]

Střecha haly byla brána jako pultová, se sklonem $2,5^\circ$. V rámci zjednodušení nebyl uvažován vliv návějí, jak za atikou, tak v úžlabích, které by díky nesymetrii značně komplikovaly ruční výpočty. Tyto zjednodušení by neměly mít zásadní vliv na výsledné hodnoty statické analýzy.

Zatížení sněhem se určí ze vztahu

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k. \quad (3.1)$$

V našem případě spadá posuzovaná hala do I. sněhové oblasti. Z toho vyplývá charakteristická hodnota zatížení sněhem $s_k = 0,7 \text{ kN/m}^2$. Při podélném sklonu $2,5^\circ$ připadá hodnota součinitele tvarového součinitele $\mu_1 = 0,8$. Součinitel expozice C_e a tepelný součinitel C_t byli ponecháni jako 1.

Po dosazení do předešlého vztahu (3.1) nám vychází:

$$s = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 = 0,56 \text{ kN/m}^2$$

3.3 Zatížení větrem

Zatížení sněhem bylo stanoveno v souladu s normou ČSN EN 1991-1-4, dle které byl výpočet proveden. [5]

Střecha haly je brána jako plochá střecha s atikou. Pro zjednodušení ručních výpočtů byl konzervativně uvažován pouze rovnoměrný příčný tlak. Podobná situace nastala i u příčného tlaku větru na stěny s pravoúhlým půdorysem, kde byla pro levou stranu uvažována oblast D, pro pravou stranu haly sání větru v oblasti E.

Doporučená hodnota součinitelů c_{dir} a c_{season} je 1. Základní hodnota rychlosti větru ve výšce 10 m nad zemí v terénu kategorie II $v_{b,0}$ pro 2. větrnou oblast je 25 m/s . Po dosazení dostáváme základní rychlost větru

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 25 = 25 \text{ m/s} \quad (3.2)$$

Výška haly i s atikou $z = 12,5 \text{ m}$. Kategorie terénu II nám určuje minimální výšku $z_{min} = 2 \text{ m}$ a parametr drsnosti terénu $z_0 = 0,05 \text{ m}$. Hodnoty byly vyčteny z tabulky.

Tabulka 1: Kategorie terénu [4]

Kategorie terénu	z_0 (m)	z_{min} (m)
0 – moře a přímořské oblasti	0,003	1
I – jezera nebo vodorovná plochá krajina bez překážek	0,01	1
II – krajina s nízkou vegetací, jako je tráva nebo izolované překážky	0,05	2
III – oblast pravidelně pokrytá vegetací, budovami nebo překážkami	0,3	5
IV – alespoň 15% povrchu je pokryto budovami, průměrná výška přesahuje 15m	1	10

Součinitel orografie $c_0(z)$ je roven 1. Známe-li výše zmíněné součinitele, můžeme začít postupně dosazovat do normového výpočtu střední rychlosti větru

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b, \quad (3.3)$$

kde figuruje námi zatím neznámý součinitel drsnosti $c_r(z)$, který se počítá následovně

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0}, \text{ pro } z \geq z_{min}, \quad (3.4)$$

opět je požadována nová neznámá hodnota a sice hodnota součinitele terénu k_r , ta se zjistí následovně

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z}{z_{0,II}} \right)^{0,07}. \quad (3.5)$$

Následují numerická dosazení do vzorců (3.5), (3.4) a (3.3)

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

$$c_r(z) = 0,19 \cdot \ln \frac{12,5}{0,05} = 1,05,$$

$$v_m(z) = 1,05 \cdot 1 \cdot 25 = 26,25 \text{ m/s}.$$

Další výpočet normového zatížení větrem na konstrukci určuje maximální dynamický tlak $q_p(z)$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z), \quad (3.6)$$

kde ρ je měrná hmotnost vzduchu, který je v oblasti očekáván při silné vichřici, doporučená hodnota $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, $I_v(z)$ intenzita turbulence ve výšce z . Ta se stanoví jako

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}}. \quad (3.7)$$

Doporučená hodnota součinitele turbulence k_I je 1. Dosadíme do vztahů (3.7) a (3.6)

$$I_v(z) = \frac{1}{1 \cdot \ln \frac{12,5}{0,05}} = 0,18,$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot 0,18] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 26,25^2 = 973,3 \text{ Pa}.$$

Pro stanovení povrchových tlaků byla na střešní konstrukci uvažována konstantní oblast tlaku větru I. Na stěny haly připadnul příčný vítr oblasti A a D, jejichž účinky budou

posuzovány na levém a pravém sloupu. Pro přesnější hodnotu tlaku větru byly mezilehlé hodnoty v příslušných tabulkách interpolovány.

$$\text{Oblast I: } C_{pe,10,I} = 0,2 \quad q_{pI}(z) = q_p(z) \cdot C_{pe,10,I} = 0,19 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Oblast D: } C_{pe,10,A} = 0,7 \quad q_{pA}(z) = q_p(z) \cdot C_{pe,10,A} = 0,68 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Oblast E: } C_{pe,10,D} = -0,3 \quad q_{pD}(z) = q_p(z) \cdot C_{pe,10,D} = -0,29 \text{ kN/m}^2$$

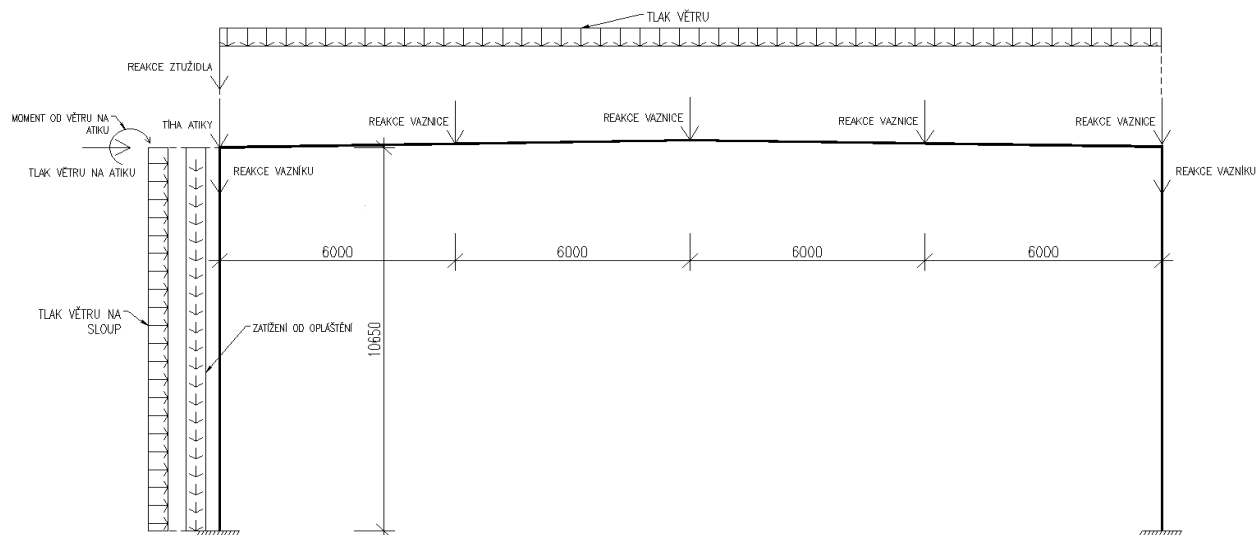
3.4 Uvažované zatížení při výpočtech

Vlastní tíha střešního pláště a tíha sněhu jsou na vazník přenášeny jako reakce posouvajících sil od vaznic. Naopak proměnné zatížení větrem bylo modelováno na vazník jako spojitě.

Vnitřní sloupy přenášejí tíhu jedné vaznice a reakce od přilehlých vazníků. Ze statického hlediska zajímavější jsou krajní sloupy, kde se vyskytuje příčný tlak větru, skladba obvodového pláště, uzlová síla od reakce ztužidla, které je stejně jako vaznice zatíženo vlastní tíhou střešního pláště na zatěžovací šířce a proměnným zatížením sněhem. Ve stejném styčnicku lze nalézt jak uzlové síly od vlastní tíhy atiky, tak vodorovnou sílu a moment od tlaku větru na atiku.

Zatěžovací šířky pro jednotlivé konstrukční prvky jsou následující:

vaznice:	6 m,
okrajové ztužidlo:	3 m,
krajní sloupy:	6 m.
výška atiky:	1,25 m.



Obrázek 3: Schéma zatížení první lodě haly

Pro účely bakalářské práce nebyly řešeny kombinace zatěžovacích stavů a jejich kombinační součinitelé dle [6]. Výpočty jsou tedy prováděny v charakteristických hodnotách.

Spojité zatížení na vaznici od tíhy stropní konstrukce

$$q_v = 3,27 \cdot 6 = 19,62 \text{ kN/m},$$

a od tíhy sněhu

$$q_{v,s} = 0,56 \cdot 6 = 3,36 \text{ kN/m}.$$

Reakce vaznic byla následně spočítána softwarem a ověřena ručním výpočtem. Výslednými uzlovými silami byl zatížen vazník.

Pro určení reakcí krajních ztužidel bylo potřeba určit zatížení na ně působící

$$q_z = 3,37 \cdot 3 = 10,11 \text{ kN/m},$$

následuje tíha sněhu

$$q_{z,s} = 0,56 \cdot 3 = 1,68 \text{ kN/m}.$$

Výpočet reakcí ztužidla vypadá následovně

$$R_{z,a} = \frac{(10,11 + 1,9) \cdot 6 \cdot 3}{6} = 36,03 \text{ kN},$$

$$R_{z,s,a} = \frac{1,68 \cdot 6 \cdot 3}{6} = 5,04 \text{ kN}.$$

Sloupy průřezu 0,6 x 0,5 m byly kromě vlastní tíhy zatíženy tíhou skladby obvodového pláště

$$q_s = 0,17 \cdot 6 = 1,02 \text{ kN/m},$$

a tlakem, případně sáním, příčného větru zleva. Pro levý sloup zatížení činí

$$q_{s,vL} = 0,68 \cdot 6 = 4,08 \text{ kN/m},$$

pravý sloup odolávající sání větru

$$q_{s,vP} = 0,29 \cdot 6 = 1,74 \text{ kN/m}.$$

Nesmí být opomenuta ani atika o výšce 1,25 m ze stejné skladby jako obvodový plášť haly. Kromě vlastní tíhy je nutné připočítat tlak větru a ohybový moment, který ve styčnicku vyvozuje. Vlastní tíha atiky

$$Q = 0,17 \cdot 6 \cdot 1,25 = 1,275 \text{ kN},$$

síla od tlaku větru na levou stěnu

$$V_{v1} = 0,68 \cdot 6 \cdot 1,25 = 5,1 \text{ kN},$$

a ohybový moment od transformace síly do styčnicku

$$M_1 = 5,1 \cdot 1,25 \cdot 0,5 = 2,55 \text{ kNm}.$$

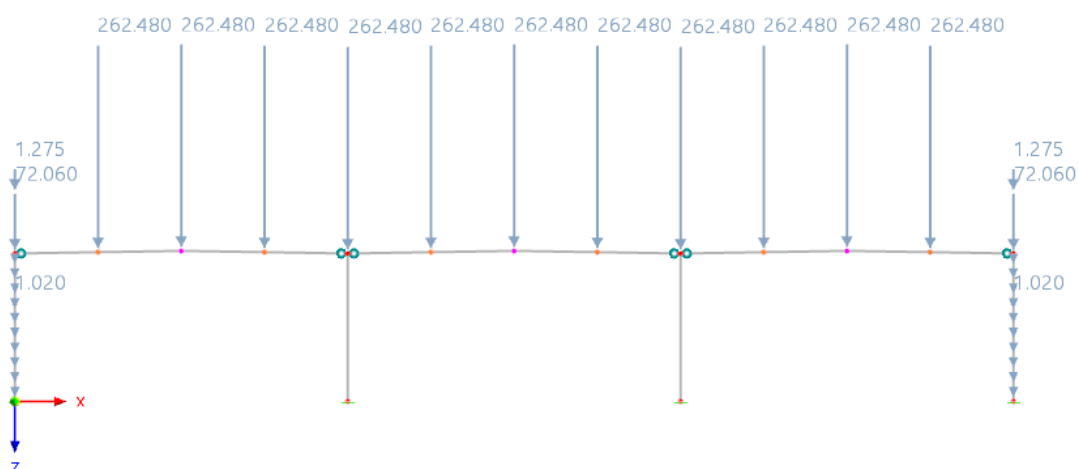
Stejným způsobem přistoupíme k sání větru v pravém krajním styčnicku

$$V_{v2} = 0,29 \cdot 6 \cdot 1,25 = 2,175 \text{ kN},$$

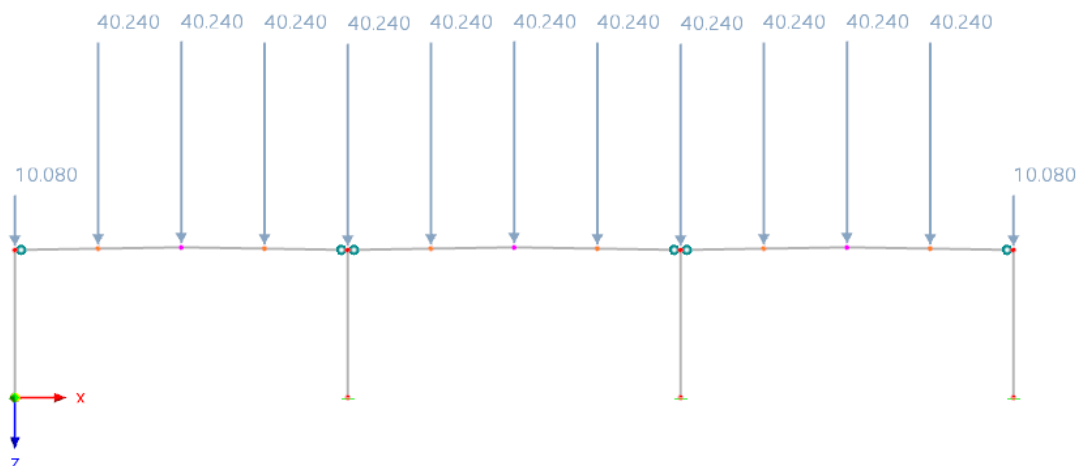
$$M_2 = 2,175 \cdot 1,25 \cdot 0,5 = 1,09 \text{ kNm}.$$

Zatížení větrem na střechu bylo uvažováno jako rovnoměrný tlak oblasti „I“. Vazníky byly tedy zatíženy

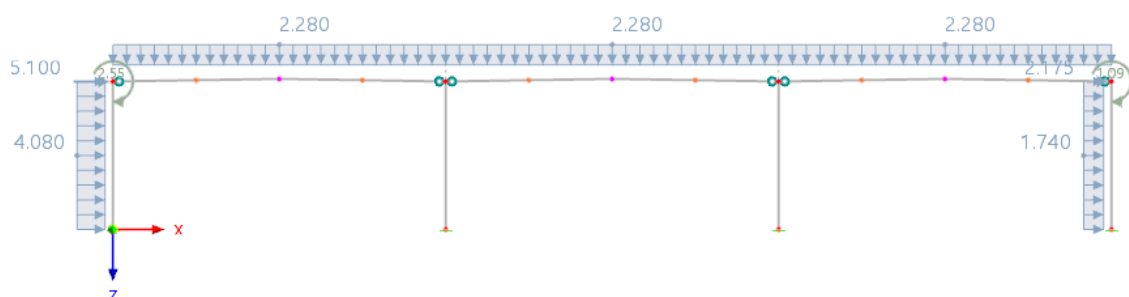
$$q_{va} = 0,19 \cdot 12 = 2,28 \text{ kN/m}.$$



Obrázek 4: Zatížení vlastní tíhou na rámu



Obrázek 5: Zatížení sněhem na rámu



Obrázek 6: Zatížení větrem na rámu

4 Postup ručního výpočtu

Ruční výpočty budou prováděny integrací funkce zatížení. Nosník byl při integraci rozdělen na několik úseků, dle měnícího se zatížení. Platnost neznámé proměnné x , případně jednotlivých dvojčlenů $(x - L_i)$ je omezena vhodně zvoleným intervalem. S dvojčlenem bylo v průběhu integrace pracováno jako s jednou proměnnou, tedy nebyly odstraňovány závorky.

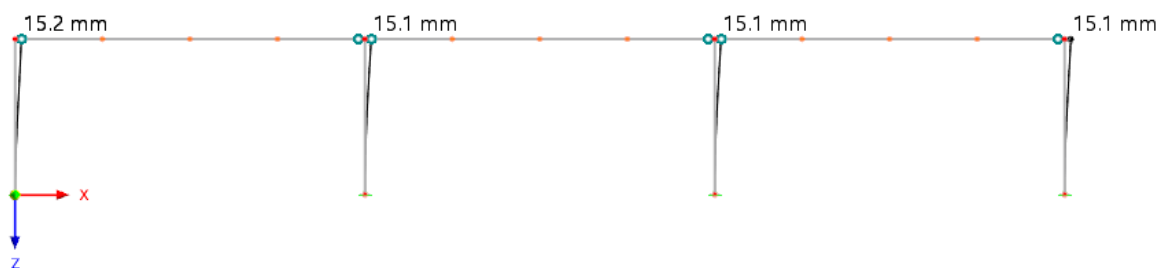
Výpočty byly realizovány v programech SMATH a Mathcad. Program SMATH byl zvolen kvůli větší volnosti a možným vizuálním úpravám při práci s grafy. Ovšem při výpočtu deformací nosníků s náběhy, kde se vyskytuje proměnná funkce momentu setrvačnosti

ve jmenovateli, se ukázal jako neschopný řešit tyto složité integrály. Proto bylo pro výpočet deformací přistoupeno k programu Mathcad, který je značně výkonnější a dokázal si poradit i s nejsložitějšími funkcemi.

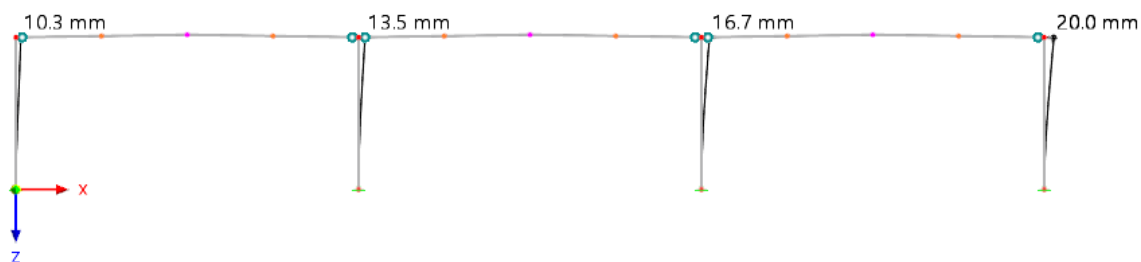
4.1 Výpočet neznámých sil X metodou jednotkových sil

Neznámé staticky neurčitě osově síly $x_1, x_2 \dots x_i$ působí ve vodorovném směru na příčlích. Vyjadřují spolupůsobení sloupů spojených tuhým vazníkem, které si navzájem pomáhají s přenášením vodorovného zatížení. Vznikají tak dodatečné normálové síly na příčlích. V odborné literatuře se tento jev řeší pomocí silové metody, za předpokladů nestlačitelnosti příčle a uvažování stejných posunů ve všech hlavách sloupů rámu. Konstrukce je tolikrát staticky neurčitá, kolik je v ní rámových příčlí.[2]

Pro ověření našich předpokladů a ověření statického modelu byly v programu RFEM vytvořeny následující grafy deformací, ze kterých vyplynulo, že posuny v hlavách sloupů v modelu s konstantním průřezem vazníku se skutečně liší velmi nepatrně a je možné je prohlásit za stejné. Aplikované zatížení na modelech rámu odpovídá hodnotách na obrázcích 4,5,6. U modelu se sedlovým náběhem tomu ovšem tak není. Důvodem může být přerozdělení posouvajících sil do normálových v důsledku šikmé střednice.



Obrázek 7: Posun hlav sloupů u modelu s konstantním průřezem



Obrázek 8: Posun hlav sloupů u modelu s náběhy na vaznících

Postup odvození rovnic pro vyjádření neznámých osových sil je následující [2]

$$u_a = u_b, \quad (4.1)$$

kde u_a je součet posunů hlavy levého sloupu, u_b je součet posunů pravého sloupu.

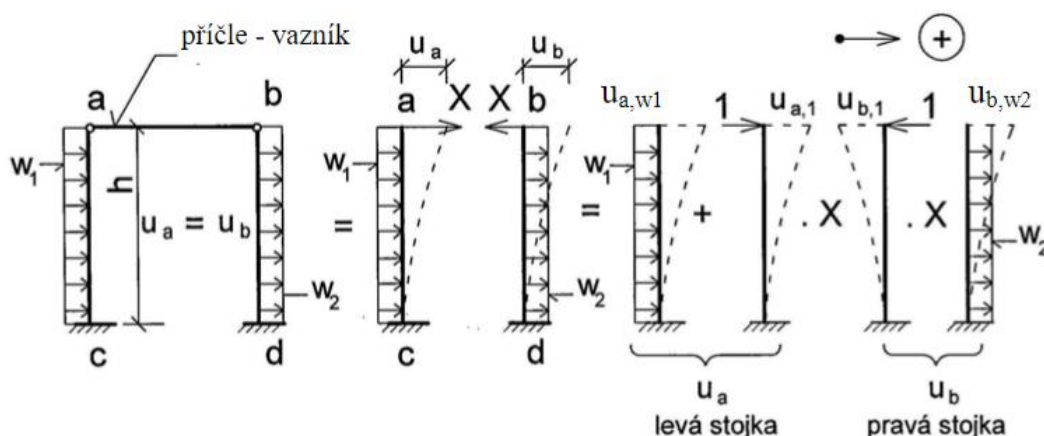
Po zavedení neznámé x a účinku jednotkových sil působících v předpokládaném směru se vztah upraví následovně

$$u_a = u_{a,w1} + u_{a,1} \cdot x, \quad (4.2)$$

$$u_b = u_{b,w2} - u_{b,1} \cdot x, \quad (4.3)$$

$u_{a,w1}$ a $u_{b,w2}$ značí posuny hlavy sloupů od vnějšího zatížení, $u_{a,1}$ a $u_{b,1}$ posuny hlavy sloupů od jednotkového zatížení. Po dosazení vzorců (4.2) a (4.3) do rovnosti (4.1) a vyjádření neznámé x dostáváme.

$$x = \frac{u_{b,w2} - u_{a,w1}}{u_{a,1} + u_{b,1}}. \quad (4.4)$$



Obrázek 9: Schéma výpočtu neznámých sil x pro jednolodní halu [2]

Pro vícelodní haly je systém výpočtu obdobný. Počet neznámých sil je stejný, jako je počet příčlů. Obecný vzorec posunutí hlavy sloupu je vyjádřen následovně [2]

$$u_i = \sum u_{z,i} + (x_i - x_{i-1}) \cdot u_{i,1}, \quad (4.5)$$

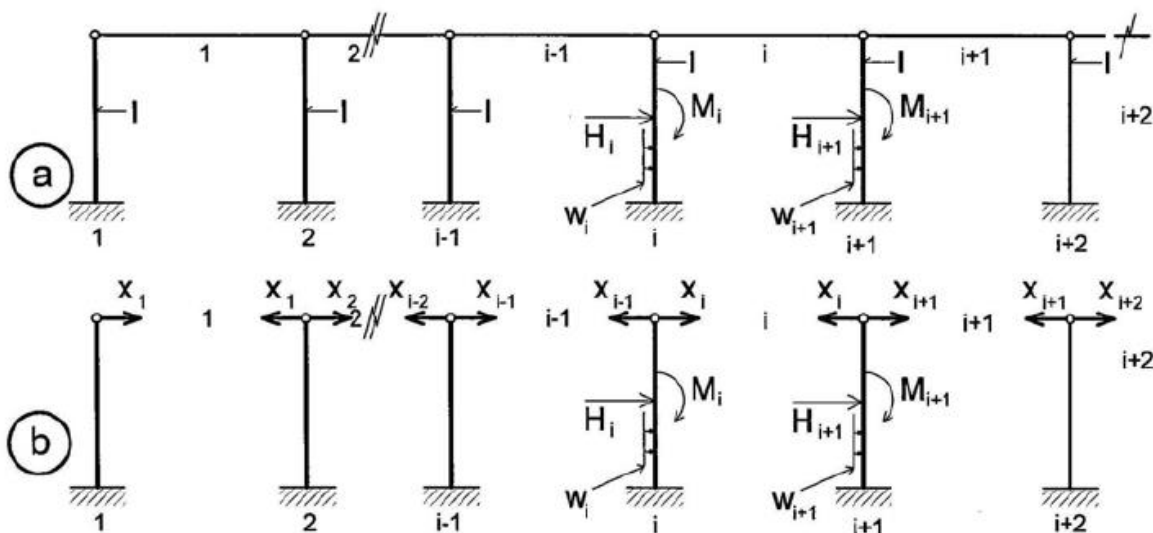
kde $\sum u_{z,i}$ jsou všechny posuny od vnějšího zatížení, x_i a x_{i-1} vyjadřují neznámé vodorovné síly v hlavě i a $i - 1$, $u_{i,1}$ značí jednotkové posuny v hlavě sloupu i .

Po úpravách a vyjádření stejného vzorce, akorát pro $i + 1$ můžeme složit rovnici rovnosti posunů (4.1)

$$\sum u_{z,i} + (x_i - x_{i-1}) \cdot u_{i,1} = \sum u_{z,i+1} + (x_{i+1} - x_i) \cdot u_{i+1,1}, \quad (4.6)$$

ze které si můžeme odvodit kanonickou rovnici

$$x_{i-1}u_{i,1} - x_i(u_{i,1} + u_{(i+1,1)}) + x_{i+1}u_{i+1,1} = \sum u_{z,i} - \sum u_{z,i+1}. \quad (4.7)$$



Obrázek 10: Schéma pro výpočet neznámých sil x vícelodních hal [2]

Do kanonické rovnice můžeme dosadit naše výpočetní hodnoty. Budeme mít 3 rovnice o 3 neznámých x_1, x_2 , a x_3 . Vztahy pro posuny u jak od vnějšího zatížení, tak od jednotkových sil v hlavách sloupů jsou brány ze statických tabulek. Po dosazení vzniká soubor rovnic

$$-x_1 \left(2 \frac{l^3}{3EI} \right) + x_2 \left(\frac{l^3}{3EI} \right) = q_1 \frac{l^4}{8EI} + M_1 \frac{l^2}{2EI} + Vv_1 \frac{l^3}{3EI}, \quad (4.8)$$

$$x_1 \left(\frac{l^3}{3EI} \right) - x_2 \left(2 \frac{l^3}{3EI} \right) + x_3 \left(\frac{l^3}{3EI} \right) = 0, \quad (4.9)$$

$$x_2 \left(2 \frac{l^3}{3EI} \right) - x_3 \left(2 \frac{l^3}{3EI} \right) = -q_2 \frac{l^4}{8EI} - M_2 \frac{l^2}{2EI} - Vv_2 \frac{l^3}{3EI}, \quad (4.10)$$

kde q_1 a q_2 je spojité zatížení od tlaku větru na prvním a posledním sloupu, M_1 a M_2 jsou momenty od tlaku větru na atiku na prvním a posledním sloupu, Vv_1 a Vv_2 vyjadřují vodorovné síly od tlaku větru na atiku, E modul pružnosti betonu C30/37, uvažováno jako 33 GPa, I moment setrvačnosti průřezu sloupů a nakonec l značí výšku sloupů.

V programu SMath byla sestavena matice A a vektor B reprezentující rozdělení neznámých z veličin x_i a pomocí inverzní matice a vektorového součinu byla soustava rovnic vyřešena.

$$A = \begin{bmatrix} -2 \cdot \frac{l^3}{3 \cdot EI} & \frac{l^3}{3 \cdot EI} & 0 \\ \frac{l^3}{3 \cdot EI} & -2 \cdot \frac{l^3}{3 \cdot EI} & \frac{l^3}{3 \cdot EI} \\ 0 & \frac{l^3}{3 \cdot EI} & -2 \cdot \frac{l^3}{3 \cdot EI} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$= \begin{bmatrix} -805,30 & 402,65 & 0 \\ 402,65 & -805,30 & 402,65 \\ 0 & 402,65 & -805,30 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} q1 \cdot \frac{l^4}{8 \cdot EI} + M1 \cdot \frac{l^2}{2 \cdot EI} + Vv1 \cdot \frac{l^3}{3 \cdot EI} \\ 0 \\ -q2 \cdot \frac{l^4}{8 \cdot EI} - M1 \cdot \frac{l^2}{2 \cdot EI} - Vv1 \cdot \frac{l^3}{3 \cdot EI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8759,11 \\ 0 \\ -3735,64 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

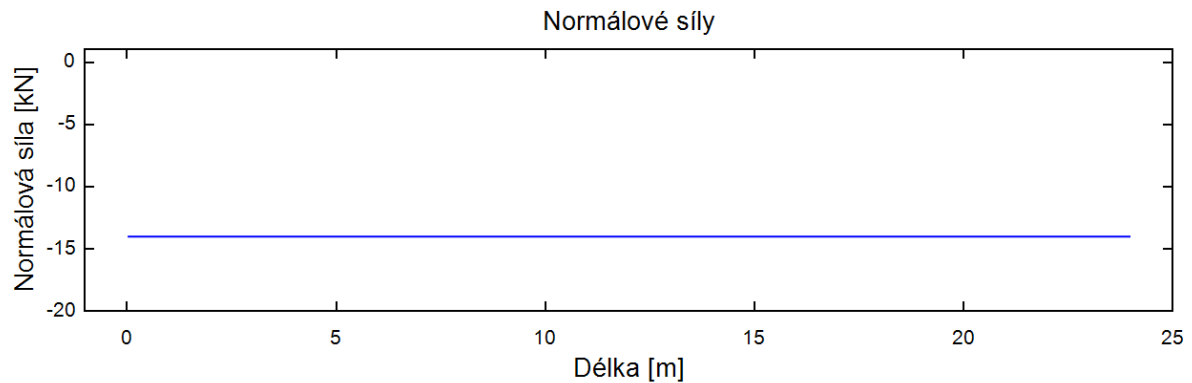
$$A^{-1} \cdot B = \begin{bmatrix} -13,996 \\ -6,238 \\ 1,520 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Z matice (4.13) vyplývají výsledky neznámých sil x_i s hodnotami $x_1 = -13,996 \text{ kN}$, $x_2 = -6,238 \text{ kN}$ a $x_3 = 1,520 \text{ kN}$. Porovnání výsledků s výpočetním softwarem bylo provedeno v příslušné kapitole.

4.2 Výpočet normálových sil na sloupech a vaznících

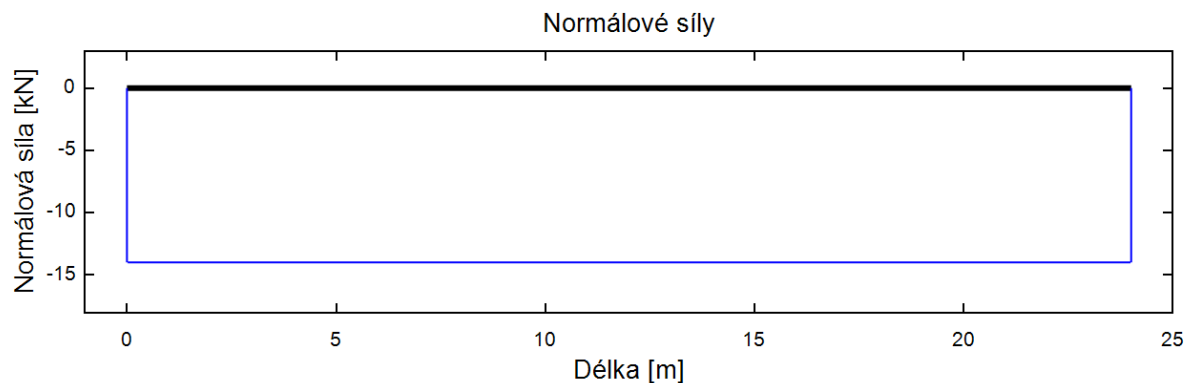
Byly spočítány normálové síly jak pro vazník, tak pro sloupy. U sedlového vazníku se ovšem vyskytují odchylky způsobené zjednodušením ručního výpočtu. K přesnějšímu porovnání byl vytvořen rovinný model haly v programu RFEM s průměrnou výškou průřezu vazníku.

Pro řešení normálových sil na vaznících byly použity jednoduché funkce, kde figuruje vzájemné sčítání, nebo odečítání normálových sil. Grafy jsou následně doplněny několika maticemi o 4 polích sloužícími pro vizuální úpravu.



$\{N1(x)\}$

Obrázek 11: Graf normálových sil funkce $N1(x)$ bez úprav



$\{NVazník1\}$

Obrázek 12: Graf normálových sil $N1(x)$, s grafickými úpravami

Funkce normálových sil prvního vazníku byla odvozena jako

$$N1(x) = ((x \geq 0) \cdot (x \leq L))^{-1} \cdot \frac{x1}{v}, \quad (4.14)$$

ve které se vyskytuje nová neznámá v neboli poměrový součinitel. Do vzorců byl přidán pouze pro vizuální úpravu a upravení měřítka grafů, kde se nachází více výsledků o značně odlišných velikostech. Ve většině předpisů funkcí se objevují intervaly $((x \geq 0) \cdot (x \leq L))^{-1}$. Jedná se o vizuální omezení průběhu funkce. Program SMath chápe, že když se číslo nevyskytuje v námi daném intervalu, bere ho jako nulu. A jakékoliv hodnoty s nulou ve jmenovateli nevykreslí. Pro výpočty normálových sil na zbylých vaznících byly použity funkce

$$N2(x) = ((x \geq L) \cdot (x \leq 2L))^{-1} \cdot \frac{x2}{v}, \quad (4.15)$$

$$N3(x) = ((x \geq 2L) \cdot (x \leq 3L))^{-1} \cdot \frac{x^3}{v}. \quad (4.16)$$

Kvůli neschopnosti programu SMATH vykreslovat funkce závislé na proměnné y , bylo přistoupeno k alternativnímu řešení a sice již zmiňované matice o 4 polích. Například následující výraz pro normálové síly na prvním sloupu

$$N1 = \begin{bmatrix} \frac{Ns1}{n} + Ra & 0 \\ \frac{qN \cdot l + Ns1}{n} + Ra & -l \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Kde $Ns1$ udává svislou sílu v daném uzlu (reakce ztužidla), n je druhý poměrový součinitel pro lepší viditelnost křivek v grafu, l značí délku sloupu, v našem případě $l = 10,65$ m, qN vyjadřuje vlastní tíhu sloupu a připočtenou tíhu obvodového pláště.

Matice pro zbylé sloupy jsou prakticky totožné, až na výskyt délky vazníku L , která posunuje výsledné úsečky o další pole. Pro číselné výsledky je samozřejmě nutné tuto délku odečíst. Pro ukázkou řešení vnitřního sloupu slouží matice

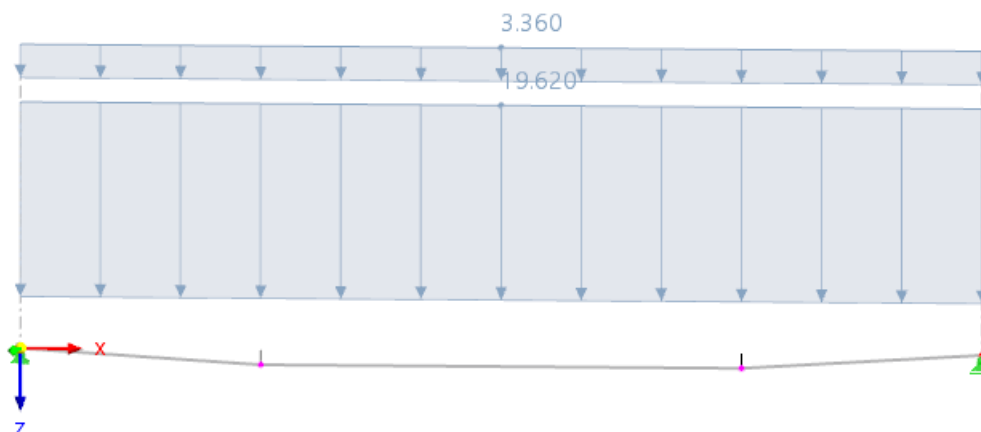
$$N2 = \begin{bmatrix} L + \frac{Ns2}{n} + 2 \cdot Ra & 0 \\ \frac{qN \cdot l + Ns2}{n} + L + 2 \cdot Ra & -l \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

kde se počítá s předem nezmíněným zatížením $Ns2$ vyjadřující reakci vaznice ležící na vnitřních sloupech.

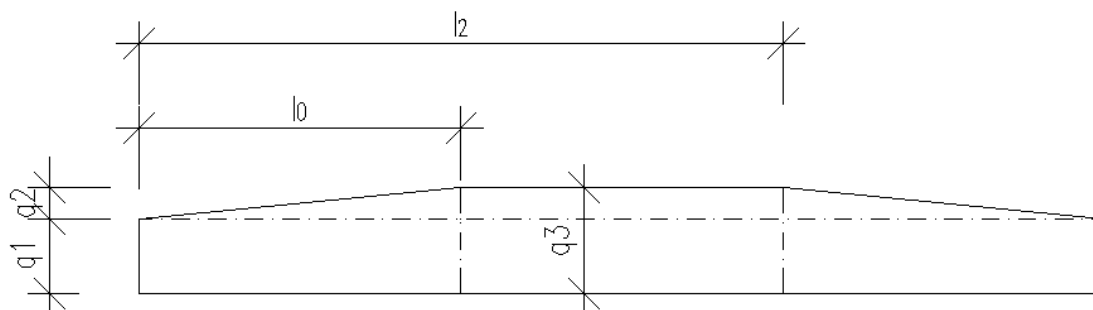
Výsledné grafy normálových sil a porovnání s modely v programu RFEM lze najít v příslušné kapitole.

4.3 Výpočet posouvajících sil a momentů na vaznici

Vaznice o délce $L = 12$ m s oboustrannými, klesajícími náběhy do $\frac{1}{3}L$. Na vaznici působí spojitě zatížení tvořené součtem skladby střechy a tíhou sněhu. Vlastní tíha prvku byla generována softwarem.



Obrázek 13: Geometrie a zatížení vaznice



Obrázek 14: Schéma zatížení vaznice

Při odvozování funkce spojitého zatížení byl prvek rozdělen do 3 částí a postupujeme od

$$q(x) = (k_1 \cdot x + q_1 - (x \geq l_0) \cdot (k_1 \cdot (x - l_0) + q_3) + (x \geq l_0) \cdot q_3 - (x \geq l_2) \cdot q_3 + (x \geq l_2) \cdot (k_2 \cdot (x - l_2) + q_3)) \cdot ((x \geq 0) \cdot (x \leq L))^{-1}, \quad (4.19)$$

počátku po ose x v kladném směru. Konečná funkce vypadá následovně

Kde q_1 je tíha v počátku, v našem příkladě $q_1 = 24,345 \text{ kN/m}$, q_3 tíha v rovinné části vaznice $q_3 = 25,58 \text{ kN/m}$, L celková délka vaznice $L = 12 \text{ m}$.

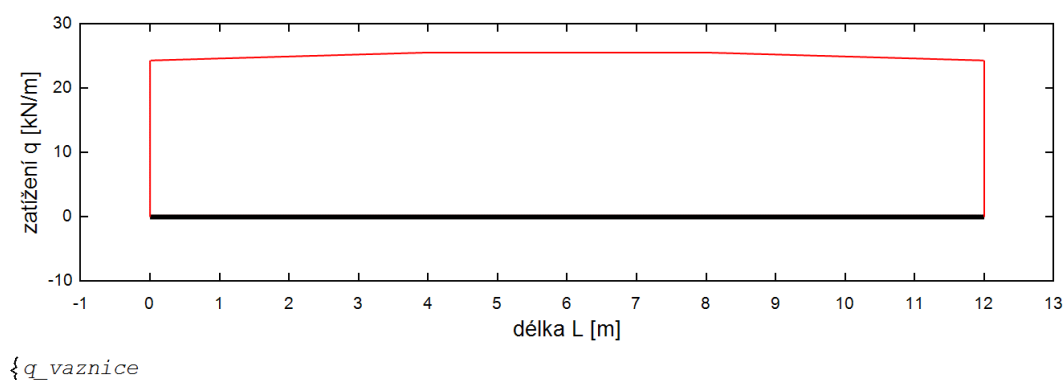
Následuje odvození 2 parametrů sklonu funkce k_1 a k_2 . Ty závisí na velikosti

$$k_1 = \frac{q_3 - q_1}{l_0}, \quad (4.20)$$

$$k_2 = \frac{q_1 - q_3}{L - l_2}, \quad (4.21)$$

zatížení q a jejich polohách na ose x , tedy vzdálenostech $l_0 = L/3$ a $l_2 = 2L/3$

Funkce spojitého zatížení je zobrazena na následujícím grafu s přidánými úsečkami hlavní osy a spojnicemi zatížení s osou. Za povšimnutí stojí lehký sklon v první a druhé třetině grafu způsobený vlastní tíhou náběhů.



Obrázek 15: Funkce spojitého zatížení vaznice

Na řadu přichází řešení reakcí. Jelikož se jedná o prosté nosníky, byla použita metoda momentové podmínky k jednomu bodu. Pro vaznici byla reakce v počátku určena jako

$$R_a = \frac{q_1 \cdot 0.5 \cdot l_0^2 + \frac{2}{3} \cdot l_0 \cdot q_2 + (l_0 + 0.5 \cdot l_0) \cdot l_0 \cdot q_3 + (l_2 + 0.5 \cdot l_0) \cdot l_0 \cdot q_1}{L} + \frac{(q_2 \cdot l_0 \cdot 0.5) \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot l_0 + l_2\right)}{L}. \quad (4.22)$$

Se známou reakcí v počátku nám nic nebrání začít integrovat funkci spojitého zatížení a tím vyjádření grafu posouvajících sil. Zápis následující funkce byl zkouškou programu Mathcad, jak je schopný při integracích. Za zmínku stojí, že matematický zápis v následujících funkcích vycházejících z programu Mathcad není úplně správný. Řešení neurčitých integrálů bohužel není možné. Neznámá x je definovaná jako řada reálných čísel, které program dosazuje a v těchto bodech počítá funkci. Proto jsou integrály počítané programem Mathcad psány jako určité.

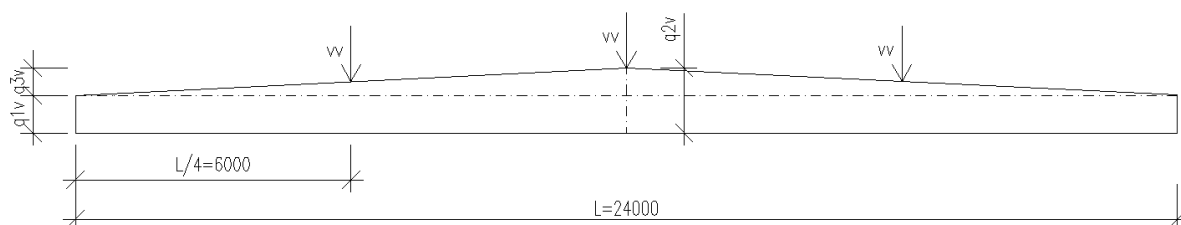
$$V(x) = R_a - \int_0^x k_1 \cdot x + q_1 dx + (x > l_0) \cdot \int_0^{x-l_0} k_1 \cdot x + q_3 dx - (x > l_0) \cdot \int_0^{x-l_0} q_3 dx + (x > l_2) \cdot \int_0^{x-l_2} q_3 dx + (x > l_2) \cdot \int_0^{x-l_2} k_2 \cdot x + q_3 dx. \quad (4.23)$$

A ukázal se být velmi schopný. Výsledky rovnice (4.23) se shodují s výsledky v programu RFEM. Proto pro výpočet ohybových momentů byl využit vzorec

$$M(x) = \int_0^x V(x)dx. \quad (4.24)$$

4.4 Posouvající síly na sloupech a vaznících

Princip výpočtu posouvajících sil na vazníku je prakticky totožný s předešlým výpočtem u vaznic. Je však rozšířený o uzlové síly, brány jako reakce vaznic, na vazníku ležících.



Obrázek 16: Schéma zatížení vazníku

Ze schématu vyplývá, že $q1v$ značí zatížení na začátku vazníku, $q2v$ naopak uprostřed a $q3v$ je rozdíl výše zmíněných. Reakce vaznic charakterizují součinitelé vv . Funkce zatížení vazníku byla odvozena

$$q_v(x) = ((x \geq 0) \cdot (x \leq L))^{-1} \cdot \left((x \geq 0) \cdot (k1 \cdot x + q1v) + \left(x \geq \frac{L}{2}\right) \cdot \left(k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) + q2v\right) - \left(x \geq \frac{L}{2}\right) \cdot \left(k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) + q2v\right) - \left(x \geq \frac{L}{4}\right) \cdot vv - \left(x \geq \frac{L}{2}\right) \cdot vv - \left(x \geq 3 \cdot \frac{L}{4}\right) \cdot vv + (x \geq L) \cdot Rb \right). \quad (4.25)$$

Následující výpočet zjišťuje velikost podporové reakce v bodě a , tedy na začátku vazníku. Díky symetrii zatížení by měla být reakce v bodě b stejná. Tento fakt nám slouží jako jednoduchá kontrola správnosti výsledků. Výpočet probíhá následovně

$$Ra = \frac{q1v \cdot \frac{L^2}{2} + vv \cdot \frac{L}{4} + vv \cdot \frac{L}{2} + vv \cdot 3 \cdot \frac{L}{4} + (q3v) \cdot \frac{L^2}{12} + q3v \cdot \frac{L}{4} \cdot \left(\frac{L}{6} + \frac{L}{2}\right)}{L}. \quad (4.26)$$

Pro kontrolu byla vypočtena i reakce v bodě b , pro změnu součtem všech svislých sil

$$Rb = q1v \cdot L + 3 \cdot vv + 2 \cdot \left(0.5 \cdot (q3v) \cdot \frac{L}{2}\right) - Ra \quad (4.27)$$

Integrací funkce zatížení a přidáním reakcí vyjde funkce posouvajících sil, konkrétně na prvním vazníku následovně

$$\begin{aligned} V1(x) = & \left((x \geq 0) \cdot (x \leq L)\right)^{-1} \\ & \cdot \left((x \geq 0) \cdot \left(k1 \cdot \frac{x^2}{2} + q1v \cdot x \right) + \left(x \geq \frac{L}{2} \right) \right. \\ & \cdot \left(k1 \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2} + q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) \right) - \left(x \geq \frac{L}{2} \right) \\ & \cdot \left(k2 \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2} + q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) \right) - \left(x \geq \frac{L}{4} \right) \cdot vv - \left(x \geq \frac{L}{2} \right) \cdot vv \\ & \left. - \left(x \geq 3 \cdot \frac{L}{4} \right) \cdot vv + (x \geq L) \cdot Rb \right). \end{aligned} \quad (4.28)$$

Pro funkce dalších vazníků platí, že jejich hodnoty jsou posunuty o L . U druhého vazníku zleva se posouvající síly určí

$$\begin{aligned}
 V2(x) = & \left((x \geq L) \cdot (x \leq 2 \cdot L) \right)^{-1} \\
 & \cdot \left((x \geq L) \cdot \left(k1 \cdot \frac{(x-L)^2}{2} + q1v \cdot (x-L) \right) + \left(x \geq \frac{3 \cdot L}{2} \right) \right. \\
 & \cdot \left(k1 \cdot \frac{\left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right)^2}{2} + q2v \cdot \left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right) \right) - \left(x \geq \frac{3 \cdot L}{2} \right) \\
 & \cdot \left(k2 \cdot \frac{\left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right)^2}{2} + q2v \cdot \left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right) \right) - \left(x \geq \frac{5 \cdot L}{4} \right) \cdot vv - \left(x \geq \frac{3 \cdot L}{2} \right) \\
 & \cdot vv - \left(x \geq 7 \cdot \frac{L}{4} \right) \cdot vv + (x \geq 2 \cdot L) \cdot Rb \left. \right).
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

Při výpočtech posouvajících sil sloupů se vyskytl stejný problém jako u sil normálových. A sice neschopnost programu SMATH vyjadřovat funkce závislé na proměnné y . Proto byl zvolen stejný přístup řešení přes matice o 4 polích. Jelikož výsledky vycházejí z posouzení normálových sil, vyskytuje se i zde značná chyba oproti modelu se sedlovými vazníky v programu RFEM. Posouvající síly na 1. sloupu

$$V1 = \begin{bmatrix} N1(1) + Vv11 & 0 \\ N1(1) + Vv11 + q1 \cdot \frac{l}{v} & -l \end{bmatrix}. \tag{4.30}$$

Znak $N1(1)$ odkazuje na hodnotu funkce normálových sil vazníku $N1(x)$ a bere její velikost. $Vv11$ je v našem případě vodorovná síla v krajním pravém styčnicku, dříve citovaná jako $V1$, která byla podělena poměrovým součinitelem v . Opět se jedná pouze o estetický krok na vyrovnaní měřítek v grafech. Pro připomenutí $q1$ značí tlak větru na levý sloup a l výšku sloupu. Posouvající síly na obou vnitřních sloupech jsou totožné, až na posunutí o L . Dalo by se napsat, že $V3 = V2 + L$.

Pro druhý sloup z levé strany platí

$$V_2 = \begin{bmatrix} L + N_2(L) - N_1(1) & 0 \\ L + N_2(L) - N_1(1) & -l \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

Jak můžeme vidět znovu se objevuje nový odkaz, tentokrát na funkci normálových sil 2. vazníku a její hodnotu v bodě L . Posouvající síly na vnitřních sloupech jsou konstantní po celé výšce sloupu. Zajímavější je průběh u pravého krajního sloupu

$$V_4 = \begin{bmatrix} 2 \cdot L - N_3(3 \cdot L) + V_{v22} & 0 \\ 2 \cdot L - N_3(3 \cdot L) + V_{v22} + q_2 \cdot \frac{l}{v} & -l \end{bmatrix}. \quad (4.32)$$

Jelikož se jedná o sloup zatížený sáním větru závisí průběh posouvajících sil na uzlové vodorovné síle v pravém krajním styčnicku V_{v22} , kterou tvoří dříve uvedená V_2 dělné poměrovým součinitelem v . Stejně tak spojitě zatížení q_2 odpovídá zatížení sáním větru na pravý sloup.

4.5 Ohybové momenty na sloupech a vaznících

Integrací funkcí posouvajících sil dostáváme funkce ohybových momentů na vaznících. Funkce pro první vazník

$$\begin{aligned} M_{v1}(x) = & ((x \geq 0) \cdot (x \leq L))^{-1} \\ & \cdot \left((x \geq 0) \cdot \left(k_1 \cdot \frac{x^3}{6} + q_1 v \cdot \frac{x^2}{2} \right) + \left(x \geq \frac{L}{2} \right) \right. \\ & \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} + q_2 v \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2} \right) - \left(x \geq \frac{L}{2} \right) \\ & \cdot \left(k_2 \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} + q_2 v \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2} \right) - \left(x \geq \frac{L}{4} \right) \cdot v v \cdot \left(x - \frac{L}{4} \right) - \left(x \geq \frac{L}{2} \right) \\ & \cdot v v \cdot \left(x - \frac{L}{2} \right) - \left(x \geq 3 \cdot \frac{L}{4} \right) \cdot v v \cdot \left(x - 3 \cdot \frac{L}{4} \right) \left. \right). \end{aligned} \quad (4.33)$$

Pro následné 2 vazníky vypadají funkce obdobně, akorát posunuté o adekvátní počet L

$$\begin{aligned}
 Mv2(x) = & ((x \geq L) \cdot (x \leq 2 \cdot L))^{-1} \\
 & \cdot \left((x \geq L) \cdot \left(k1 \cdot \frac{(x-L)^3}{6} + q1v \cdot \frac{(x-L)^2}{2} \right) + \left(x \geq \frac{3 \cdot L}{2} \right) \right. \\
 & \cdot \left(k1 \cdot \frac{\left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right)^3}{6} + q2v \cdot \frac{\left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right)^2}{2} \right) - \left(x \geq \frac{3 \cdot L}{2} \right) \\
 & \cdot \left(k2 \cdot \frac{\left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right)^3}{6} + q2v \cdot \frac{\left(x - \frac{3 \cdot L}{2}\right)^2}{2} \right) - \left(x \geq \frac{5 \cdot L}{4} \right) \cdot vv \cdot \left(x - \frac{5 \cdot L}{4} \right) \\
 & \left. - \left(x \geq \frac{3 \cdot L}{2} \right) \cdot vv \cdot \left(x - \frac{3 \cdot L}{2} \right) - \left(x \geq 7 \cdot \frac{L}{4} \right) \cdot vv \cdot \left(x - 7 \cdot \frac{L}{4} \right) \right).
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

Ohybové momenty na sloupech už bohužel nešlo řešit ve svislém směru, jelikož nebyl nalezen dostatečně podobný výraz na určení paraboly 2°. Byly pokusy vhodně využít funkce $\sqrt{x}$, avšak neúspěšné. Proto bylo přistoupeno k projekci sloupů do vodorovného směru a byly řešeny v jednotlivých grafech. Pro příklad je uvedena funkce sloupu 1

$$Ms1(x) = \left(-V1_{11} \cdot x - q1 \cdot \frac{x^2}{2} - M1 \right) \cdot ((x \geq 0) \cdot (x \leq l))^{-1}, \tag{4.35}$$

kde $V1_{11}$ značí odkaz na první pole matice $V1$ u řešení posouvajících sil. Ohybové momenty na obou vnitřních sloupech jsou stejné. Proto stačí uvést jediný příklad

$$Ms2(x) = (- (V2_{11} - L) \cdot x) \cdot ((x \geq 0) \cdot (x \leq l))^{-1}. \tag{4.36}$$

Stejně jako u ohybového momentu $Ms1(x)$ se i zde vyskytuje odkaz na první pole matice $V2_{11}$ odkazující na hodnotu posouvající síly ve vrcholu sloupu odečtenou o délku vazníku L . Zajímavější se jeví ohybové momenty na čtvrtém, krajním sloupu

$$Ms4(x) = \left((-V4_{11} + L) \cdot x - q2 \cdot \frac{x^2}{2} - M2 \right) \cdot ((x \geq 0) \cdot (x \leq l))^{-1}, \tag{4.37}$$

ve kterém dodatečně figuruje spojitě zatížení od sání větru a ohybový moment vzniklý transformací vodorovné síly větru na atiku.

4.6 Odvození funkce momentu setrvačnosti

Pro vazník i vaznici s náběhy platí, že moment setrvačnosti není v určitých místech konstantní. Tento fakt bylo nutné zohlednit při výpočtu deformací. Pro oba průřezy platí, že se mění pouze výška stojiny. Pásnice zůstávají beze změny. Tím pádem stačí za výšku stojiny dosadit neznámou x vynásobenou součinitelem zohledňujícím sklon změny náběhu a dále s touto funkcí počítat.

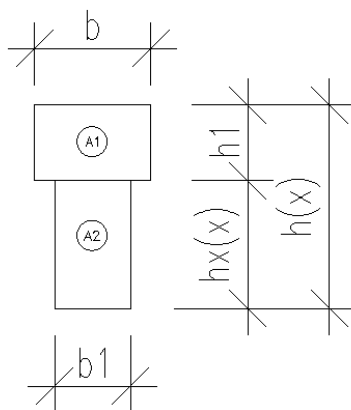
Postup výpočtu momentu setrvačnosti je dle [7] následující. Jako první je výhodné rozdělit si daný průřez na jednodušší rovinné obrazce. Z nich lze dále dopočítat jejich plochy a vzdálenosti těžišť k počátku. V našem případě je počátek vždy na horní hraně průřezu a jelikož nás zajímá pouze moment setrvačnosti k pomyslné ose y , tedy ve svislém směru, nemusíme řešit polohu počátku k ose x . Následuje výpočet společného těžiště průřezu dle

$$zT = \frac{\sum A_i \cdot zt_i}{\sum A_i}, \quad (4.38)$$

kde zT vzdálenost hlavního těžiště od počátku, $\sum A_i$ součet ploch jednotlivých obrazců, $\sum A_i \cdot zt_i$ součet ploch obrazců násobených vzdáleností dílčího těžiště k počátku. Když známe polohu hlavního těžiště průřezu, můžeme si dopočítat vzdálenosti mezi těžišti obrazců k těžišti průřezu. Tyto vzdálenosti v rámci práce označujeme písmenem d . Nesmíme opomenout ani na momenty setrvačnosti jednotlivých jednoduchých geometrických tvarů. Konečný moment setrvačnosti průřezu určíme takzvanou Steinerovou větou, která zní pro složený průřez

$$I = \sum I_i + A_i \cdot d_i^2. \quad (4.39)$$

Začneme u méně náročného průřezu a sice u vaznice. Jedná se o „T“ profil složený ze 2 obdélníků. Výška stojiny se po délce prvku mění. Proto je symbolicky popsána jako funkce $hx(x)$ a celková výška profilu odpovídá značení $h(x)$.



Obrázek 17: Schéma průřezu vaznice

Pro stoupající část vaznice se sklon funkce určí jako

$$kx1 = \frac{hmax - h0}{l_0}, \quad (4.40)$$

kde $hmax$ značí maximální výšku profilu, tedy v bodě l_0 , $h0$ vyjadřuje výšku profilu v počátku. Když známe parametr $kx1$ je možné odvodit si výšku profilu v jednotlivých bodech x

$$x1(x) = h0 + kx1 \cdot x, \quad (4.41)$$

díky které určíme výšku stojiny

$$hx1(x) = x1(x) - h1, \quad (4.42)$$

ve které $h1$ je neměnná výška pásnice. Nyní známe vše potřebné k tomu, abychom mohli určit polohy těžišť stojiny a pásnice, jejich plochy, a nakonec pořadnici celkového těžiště průřezu. Pro plochy obrazců platí

$$A1 = b \cdot h1, \quad (4.43)$$

$$Ax1(x) = b1 \cdot hx(x). \quad (4.44)$$

Vzdálenosti od počátku k těžištím ploch $A1$ a $Ax1(x)$

$$zt1 = \frac{h1}{2}, \quad (4.45)$$

$$z_{Tx1}(x) = h_1 + \frac{hx_1(x)}{2}. \quad (4.46)$$

Nakonec určení polohy těžiště průřezu

$$z_{Tx1}(x) = \frac{A_1 \cdot z_{t1} + Ax_1(x) \cdot z_{Tx1}(x)}{A_1 + Ax_1(x)}. \quad (4.47)$$

Následuje nalezení vzájemných vzdáleností těžišť obrazců a hlavního těžiště průřezu

$$d_1(x) = z_{Tx1}(x) - z_{t1}, \quad (4.48)$$

$$dx_1(x) = z_{Tx1}(x) - z_{Tx1}(x). \quad (4.49)$$

Momenty setrvačnosti obou obdélníků byly vypočteny

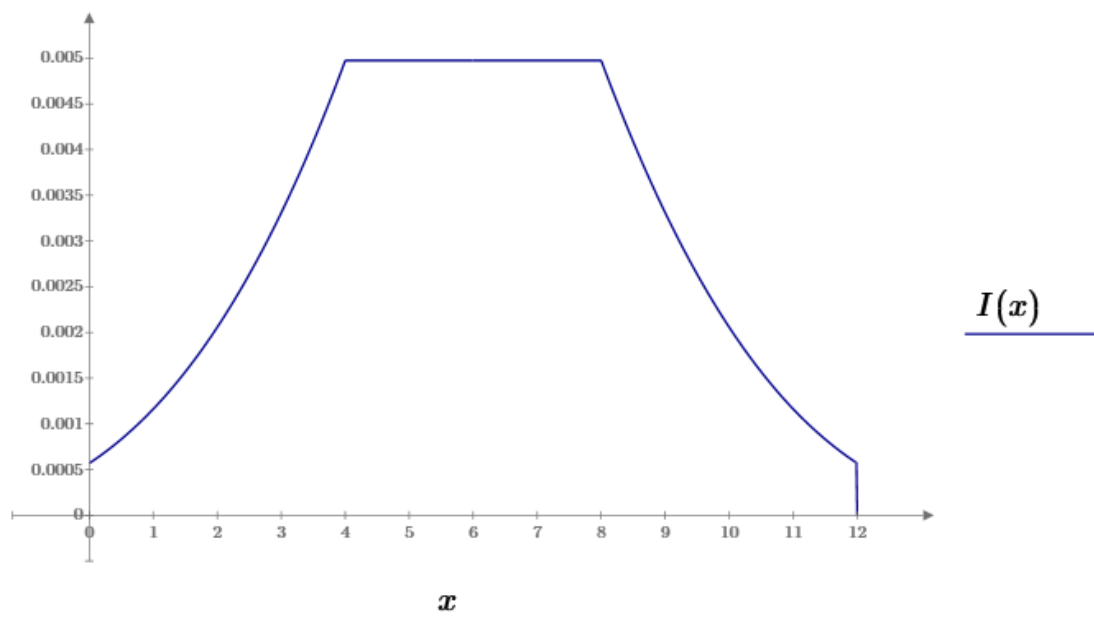
$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h_1^3, \quad (4.50)$$

$$Ix_1(x) = \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot hx_1(x)^3, \quad (4.51)$$

Dosazením všech již známých parametrů do Steinerovy věty získáme konečný předpis funkce momentu setrvačnosti pro klesající část vaznice

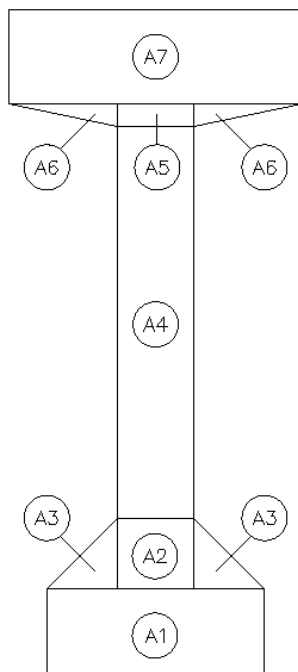
$$I_i(x) = I_1 + A_1 \cdot d_1(x)^2 + Ix_1(x) + Ax_1(x) \cdot dx_1(x)^2. \quad (4.52)$$

Funkce momentu setrvačnosti pro stoupající náběh ve třetí třetině vaznice byla odvozena obdobně s rozdílnou hodnotou součinitele k .

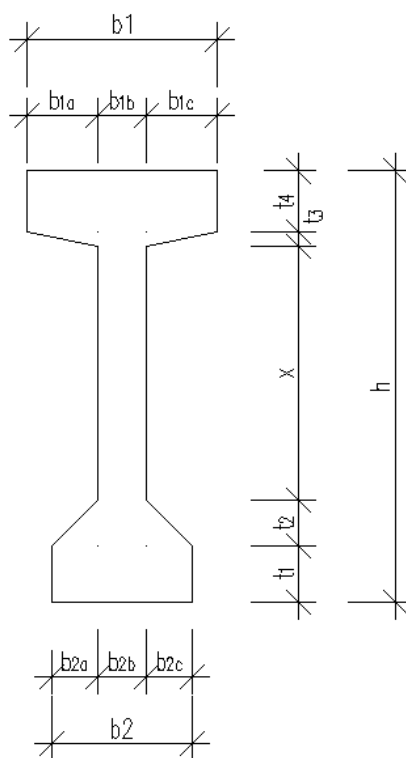


Obrázek 18: Moment setrvačnosti u vaznice

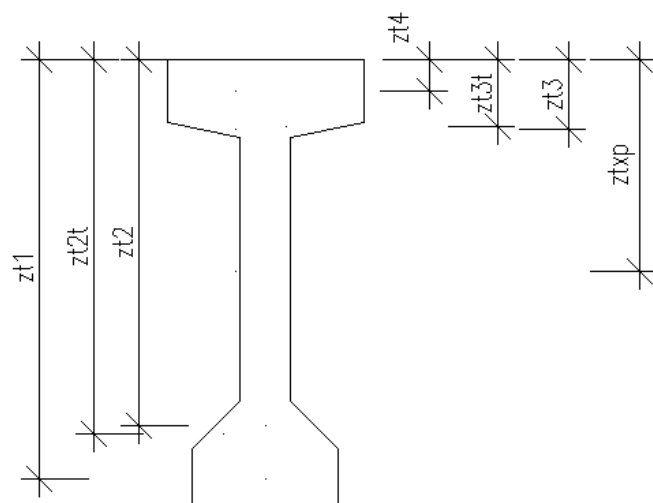
U odvození funkce momentu setrvačnosti pro vazník bylo postupováno stejně. Profil byl rozdělen do 7 zjednodušených obrazců a postup výpočtu se oproti vaznici lišil jen ve zdlouhavosti. I zde byl postup rozdělen na dvě samostatné funkce, jednu pro stoupající část, druhou pro klesající.



Obrázek 19: Rozdělení profilu vazníku do zjednodušených obrazců



Obrázek 20: Symbolické popisy rozměrů profilu vazníku



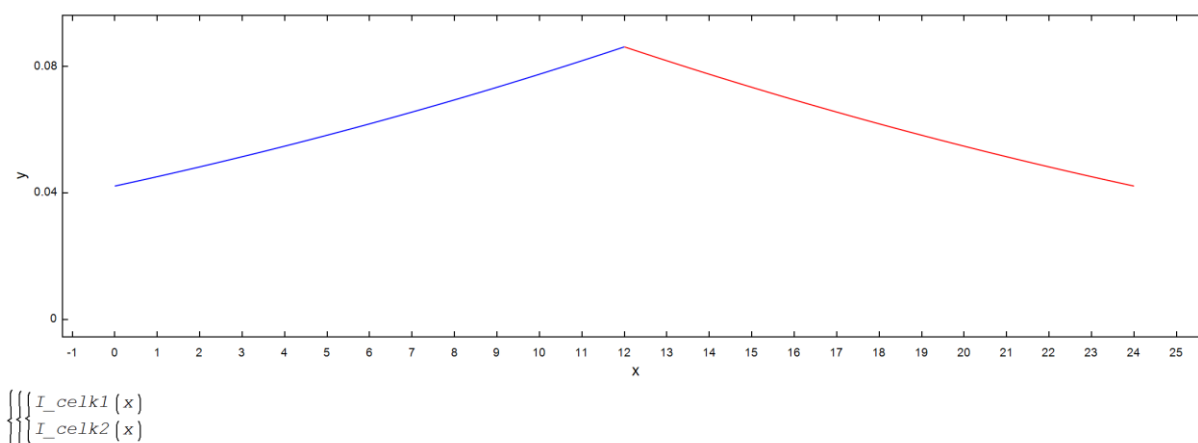
Obrázek 21: Značení vzdálenosti jednotlivých těžišť obrazců od počátku

Těžiště průřezu stoupající části vazníku se určí jako

$$zT(x) = \frac{A1 \cdot zt1(x) + A2 \cdot zt2(x) + 2 \cdot A3 \cdot zt2t(x) + ztxp(x) \cdot A4(x)}{A1 + A2 + 2 \cdot A3 + A4(x) + A5 + 2 \cdot A6 + A7} + \frac{zt3 \cdot A5 + zt3t \cdot 2 \cdot A6 + zt4 \cdot A7}{A1 + A2 + 2 \cdot A3 + A4(x) + A5 + 2 \cdot A6 + A7'} \quad (4.53)$$

po výpočtech vzdáleností d a momentů dílčích momentů setrvačnosti vypadá dosazení do Steinerovy věty

$$Ii(x) = I1 + A1 \cdot d1(x)^2 + I2 + A2 \cdot d2(x)^2 + 2 \cdot I3 + 2 \cdot A3 \cdot d2t(x)^2 + I4(x) + A4(x) \cdot dxpx(x)^2 + I5 + A5 \cdot d3(x)^2 + 2 \cdot I6 + 2 \cdot A6 \cdot d3t(x)^2 + I7 + A7 \cdot d4(x)^2. \quad (4.54)$$



Obrázek 22: Moment setrvačnosti na vazníku

4.7 Výpočet deformací vaznice a vazníku Mohrovou metodou

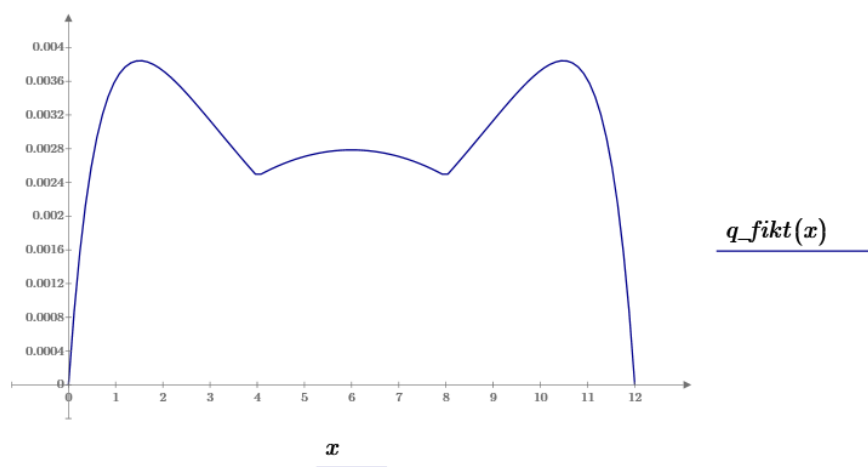
Výpočet deformací s proměnným momentem setrvačnosti se ukázal jako extrémně náročný pro ruční řešení. Proto byl prováděn výhradně v programu Mathcad, který se ukázal schopný a uživatelsky přívětivý. Jako nejvhodnější metoda výpočtu deformací se ukázala Mohrova metoda. Podrobnější popis se nachází v první kapitole práce. Samotná volba fiktivního nosníku je poměrně jednoduchá. U prostého nosníku nedochází ke změnám.

Při výpočtu průhybu vaznice bylo postupováno následovně

$$q_{fikt}(x) = \frac{M(x)}{E \cdot Ii(x)} \cdot (x > 0) \cdot (x < l_0) + \frac{M(x)}{E \cdot Ii(l_0)} \cdot (x > l_0) \cdot (x < l_2) + \frac{M(x)}{E \cdot Ia(x)} \cdot (x > l_2) \cdot (x < L). \quad (4.55)$$

Prakticky se jedná o 3 funkce složené dohromady a vhodně omezené intervaly. Za zmínění stojí l_0 , vzdálenost od počátku do 1/3 vaznice, l_2 značí vzdálenost od počátku do 2/3 vaznice a L celou délku vaznice. Funkce momentů setrvačnosti $Ii(x)$ pro klesající náběh, $Ii(l_0)$ hodnota momentu setrvačnosti ve svém maximu a $Ia(x)$ funkce

stoupajícího náběhu v poslední třetině vaznice. $M(x)$ reprezentuje funkci ohybového momentu na vaznici.



Obrázek 23: Graf zatížení na fiktivním nosníku vaznice

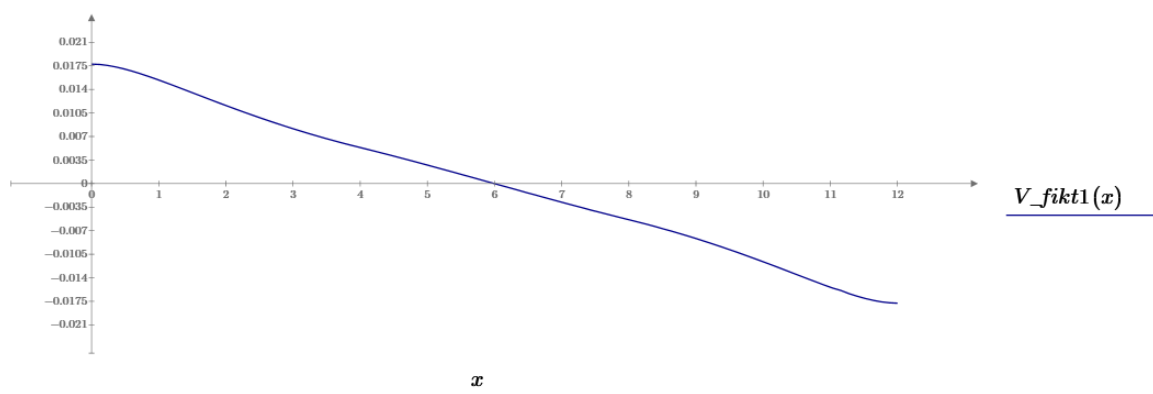
I zde bylo nutné využít určitý integrál, aby byl program Mathcad schopný funkci počítat a zobrazit ve grafu.

Ze zatížení vypočteme integraci posouvající síly na fiktivním nosníku

$$V_{fikt}(x) = \int_0^x q_{fikt}(x) dx \quad (4.56)$$

a vyřešíme reakce v podporách. Díky symetrii zatížení je možné použít následující vztah a graf posouvajících sil

$$V_{fikt1}(x) = V_{fikt}\left(\frac{L}{2}\right) - V_{fikt}(x). \quad (4.57)$$



Obrázek 24: Posouvající síly na fiktivním nosníku vaznice

Samotný průhyb je pak další integrací posouvajících sil.

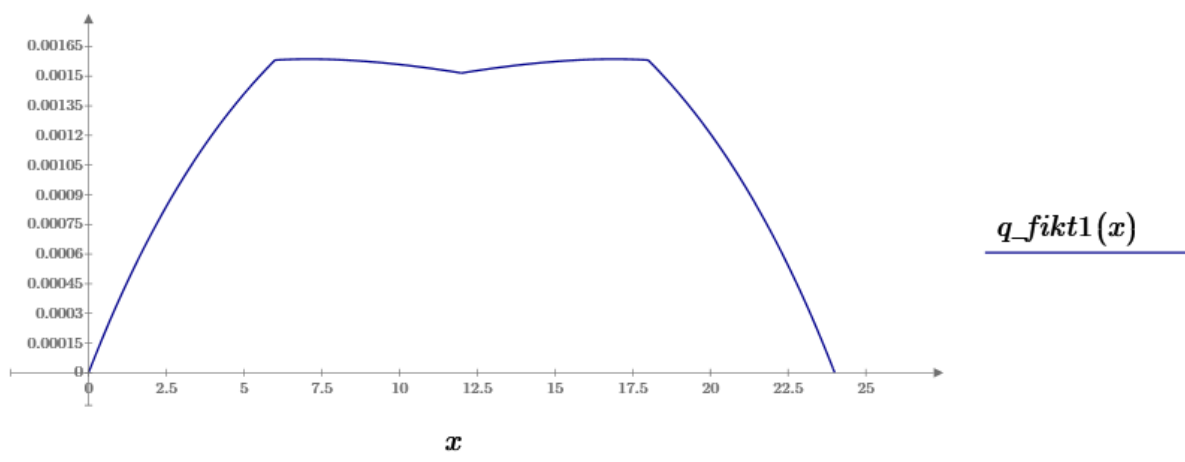
$$w(x) = - \int_0^x V_{fikt1}(x) dx. \quad (4.58)$$

Výsledný graf deformací vaznice je k nahlédnutí v následující kapitole. Znaménko mínus ve vzorci (4.58) zajišťuje správné směrování grafu deformací.

Obdobný postup byl zvolen i u řešení průhybu vazníku. Zde bylo zatížení působící na fiktivní nosník určeno jako

$$q_{fikt1}(x) = \frac{Mx(x)}{E \cdot Ii(x)} \cdot (x \geq 0) \cdot \left(x < \frac{L}{2}\right) + \frac{Mx(x)}{E \cdot Iia(x)} \cdot \left(x \geq \frac{L}{2}\right) \cdot (x < L). \quad (4.59)$$

Stejně jako u vaznice je funkce zatížení na fiktivní nosník rozdělena do 2 intervalů. V prvním intervalu od 0 do $L/2$, kde L značí délku vazníku, značí funkce $Ii(x)$ stoupající náběh a tím pádem stoupající moment setrvačnosti.

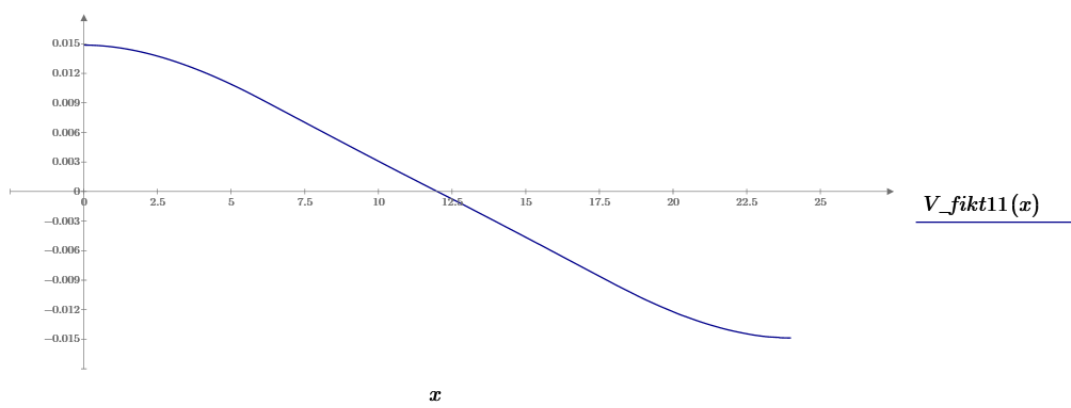


Obrázek 25: Zatížení na fiktivní nosník u vazníku

Postup integrace a řešení posouvajících sil je stejný jako ve vztazích (4.56) a (4.57)

$$V_{fikt1}(x) = \int_0^x q_{fikt1}(x) dx, \quad (4.60)$$

$$V_{fikt11}(x) = V_{fikt1}\left(\frac{L}{2}\right) - V_{fikt1}(x). \quad (4.61)$$



Obrázek 26: Posouvající síly na fiktivním nosníku vazníku

Stejně tak asi nikoho nepřekvapí, že pro výpočet deformací byl použit jednoduchý zápis

$$w(x) = - \int_0^x V_{fikt11}(x) dx. \quad (4.62)$$

Výsledný graf je opět k nahlédnutí v kapitole porovnání výsledků.

4.8 Výpočet průhybu vazníku pomocí metody integrace ohybové čáry

Pro ověření výsledků z programu RFEM byl proveden další ruční výpočet průhybu vazníku, tentokrát ovšem s konstantním průřezem průměrné výšky. Tato volba zajistila téměř totožné velikosti posouvajících sil a momentů, zároveň však lze vidět rozdíl ve velikostech deformací na vazníku. Teorie k metodě integrace ohybové čáry je uvedena v první kapitole bakalářské práce.

Základem výpočtu bylo rozdělení vazníku do 4 intervalů dle změn funkce ohybových momentů a následnou dodatečnou integraci těchto intervalů. Jelikož zde považujeme moment setrvačnosti I jako konstantu, je možné jej s modulem pružnosti E vytknout před integrál.

Pro první interval od 0 do $L/4$ byla odvozena funkce pootočení následovně

$$EI \cdot w'(x) = Ra \cdot \frac{x^2}{2} - \left(\frac{k1 \cdot x^4}{24} + \frac{q1v \cdot x^3}{6} \right) + C_1, \quad (4.63)$$

další integrací dostaneme funkci průhybu v daném intervalu

$$EI \cdot w(x) = Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) + C_1 \cdot x + C_5. \quad (4.64)$$

Následuje vyjádření funkcí pootočení a deformace vazníku pro interval od $L/4$ do $L/2$

$$EI \cdot w'(x) = Ra \cdot \frac{x^2}{2} - \left(\frac{k1 \cdot x^4}{24} + \frac{q1v \cdot x^3}{6} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^2}{2} + C_2, \quad (4.65)$$

$$EI \cdot w(x) = Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{6} + C_2 \cdot x + C_6. \quad (4.66)$$

Pro interval od $L/2$ do $3L/4$

$$\begin{aligned} EI \cdot w'(x) = & Ra \cdot \frac{x^2}{2} - \left(\frac{k1 \cdot x^4}{24} + \frac{q1v \cdot x^3}{6} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^2}{2} \\ & + \left(\frac{k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} \right) \\ & - \left(\frac{k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2} + C_3, \end{aligned} \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned} EI \cdot w(x) = & Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{6} \\ & + \left(\frac{k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) \\ & - \left(\frac{k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} + C_3 \cdot x + C_7. \end{aligned} \quad (4.68)$$

V posledním intervalu od $3L/4$ do L se přidá poslední uzlová síla od vaznice

$$\begin{aligned} EI \cdot w'(x) = & Ra \cdot \frac{x^2}{2} - \left(\frac{k1 \cdot x^4}{24} + \frac{q1v \cdot x^3}{6} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^2}{2} \\ & + \left(\frac{k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} \right) \\ & - \left(\frac{k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2} - vv \\ & \cdot \frac{\left(x - 3 \cdot \frac{L}{4}\right)^2}{2} + C_4, \end{aligned} \quad (4.69)$$

$$\begin{aligned}
EI \cdot w(x) = & Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{6} \\
& + + \left(\frac{k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) \\
& - \left(\frac{k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} - vv \\
& \cdot \frac{\left(x - 3 \cdot \frac{L}{4}\right)^2}{2} + C_4 \cdot x + C_8.
\end{aligned} \tag{4.70}$$

Zbývá vyřešit okrajové podmínky a podmínky spojitosti vyjádřené integračními konstantami $C_1 - C_8$. Začneme okrajovými podmínkami vyjádřenými konstantami C_5 a C_8 . V těchto bodech se mají jednotlivé funkce průhybu rovnat nule. Pro C_5 v $x = 0$ platí

$$0 = Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) + C_1 \cdot x + C_5, \tag{4.71}$$

$$C_5 = 0. \tag{4.72}$$

Konstanta C_8 v bodě $x = L$ zjistíme

$$\begin{aligned}
0 = & Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{6} \\
& + + \left(\frac{k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) \\
& - \left(\frac{k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} - vv \\
& \cdot \frac{\left(x - 3 \cdot \frac{L}{4}\right)^2}{2} + C_4 \cdot x + C_8.
\end{aligned} \tag{4.73}$$

$$\begin{aligned}
C_8 = Ra \cdot \frac{L^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot L^5}{120} + \frac{q1v \cdot L^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(L - \frac{L}{4}\right)^3}{6} \\
+ \left(\frac{k1 \cdot \left(L - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(L - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) \\
- \left(\frac{k2 \cdot \left(L - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(L - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(L - \frac{L}{2}\right)^3}{6} - vv \\
\cdot \frac{\left(L - 3 \cdot \frac{L}{4}\right)^2}{2} + C_4 \cdot L.
\end{aligned} \tag{4.74}$$

Podmínky spojitosti vyjadřujeme v bodech na rozhraní intervalů. Prakticky musíme zajistit, aby se pootočení a deformace v námi vyšetřovaném bodě rovnaly. Pro ukázkou následuje řešení podmínek spojitosti v bodě $L/4$ kde probíhá styk rovnic pootočení (4.63) a (4.65)

$$\begin{aligned}
Ra \cdot \frac{x^2}{2} - \left(\frac{k1 \cdot x^4}{24} + \frac{q1v \cdot x^3}{6} \right) + C_1 \\
= Ra \cdot \frac{x^2}{2} - \left(\frac{k1 \cdot x^4}{24} + \frac{q1v \cdot x^3}{6} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^2}{2} + C_2.
\end{aligned} \tag{4.75}$$

Po dosazení $x = L/4$ nám zbude

$$C_1 = C_2. \tag{4.76}$$

Stejně tak dáme do rovnosti rovnice deformací (4.64) a (4.66) a rovnou dosadíme za $x = L/4$

$$\frac{L}{4} \cdot C_1 + C_5 - C_2 \cdot \frac{L}{4} - C_6 = 0. \tag{4.77}$$

Výpočet zbylých integračních koeficientů probíhal ve stejném duchu. Dosazení rovnic deformací do vzájemné rovnosti v příslušném bodě x . Pro řešení tolika rovnic byla sestavena matice

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{L}{4} & -\frac{L}{4} & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L}{2} & \frac{L}{2} & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{4} \cdot L & -\frac{3}{4} \cdot L & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.78)$$

a vektor

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w(L) \end{bmatrix}, \quad (4.79)$$

ve kterém se vyskytuje hodnota funkce průhybu $w(L)$ v posledním intervalu (4.74) v bodě L . Řešením soustavy rovnic je vektor

$$H = F^{-1} \cdot G, \quad (4.80)$$

který vyjadřuje námi hledané hodnoty integračních koeficientů $C_1 - C_8$. Za zmínku stojí, že ve vektoru H jsou nenulové pouze první 4 sloupce, jejichž hodnoty jsou stejné. Konečné funkce průhybu vazníku s konstantní průměrnou výškou průřezu na zvolených intervalech vypadají následovně

$$w_a(x) = \frac{1}{EI_{prum}} \cdot \left(Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - H_{11} \cdot x \right), \quad (4.81)$$

$$w_b(x) = \frac{1}{EI_{prum}} \cdot \left(Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{6} - H_{21} \cdot x \right), \quad (4.82)$$

$$\begin{aligned}
w_c(x) = \frac{1}{EI_{prum}} & \cdot \left(Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{6} \right. \\
& + \left(\frac{k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) \\
& \left. - \left(\frac{k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} - H_{3\ 1} \cdot x \right),
\end{aligned} \tag{4.83}$$

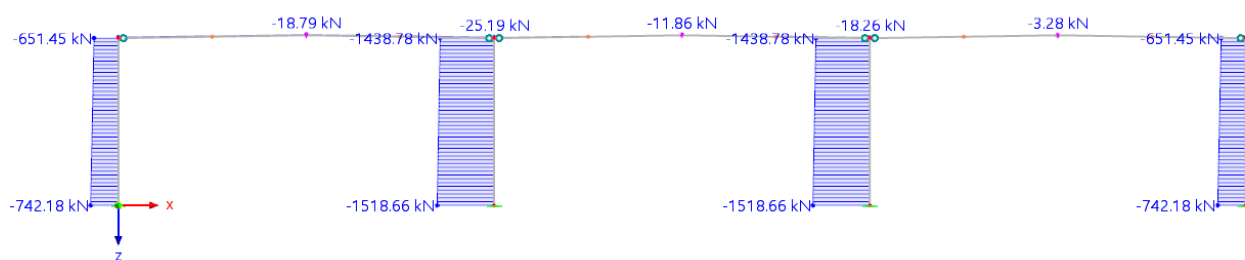
$$\begin{aligned}
w_d(x) = \frac{1}{EI_{prum}} & \cdot \left(Ra \cdot \frac{x^3}{6} - \left(\frac{k1 \cdot x^5}{120} + \frac{q1v \cdot x^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{6} \right. \\
& + \left(\frac{k1 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) \\
& - \left(\frac{k2 \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^5}{120} + \frac{q2v \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^4}{24} \right) - vv \cdot \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} - vv \\
& \left. \cdot \frac{\left(x - 3 \cdot \frac{L}{4}\right)^2}{2} - H_{4\ 1} \cdot x \right),
\end{aligned} \tag{4.84}$$

kde $H_{1\ 1} - H_{4\ 1}$ jsou odkazy na příčné hodnoty vektoru H .

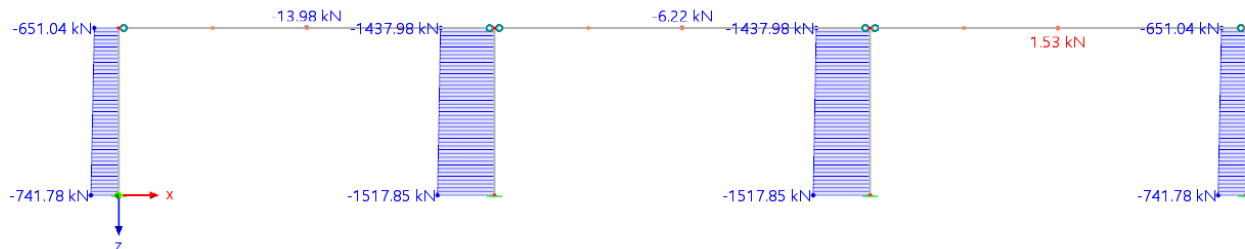
5 Porovnání výsledků

Následující kapitola bude věnována prezentování výsledků vlastních výpočtů a jejich porovnáváním s výsledky konvenčního softwaru RFEM 6.02 od společnosti Dlubal.

5.1 Normálové síly rámu

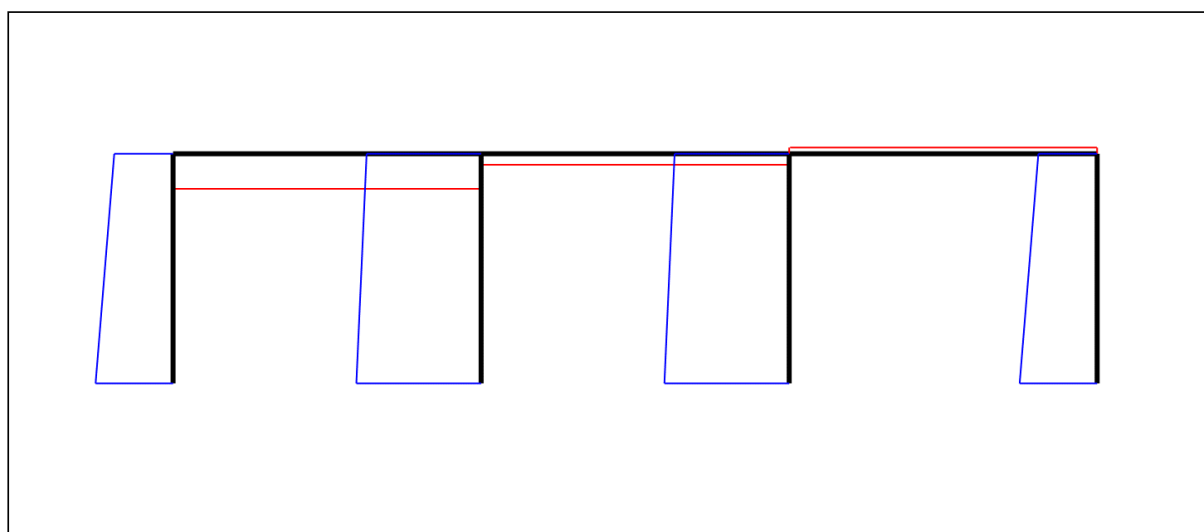


Obrázek 27: Normálové síly, model s náběhy



Obrázek 28: Normálové síly, model s průřezem průměrné výšky

Normálové síly



```
{ Print_Nvazník
{ Print_Nsloup
```

Obrázek 29: Normálové síly rámu, vlastní graf

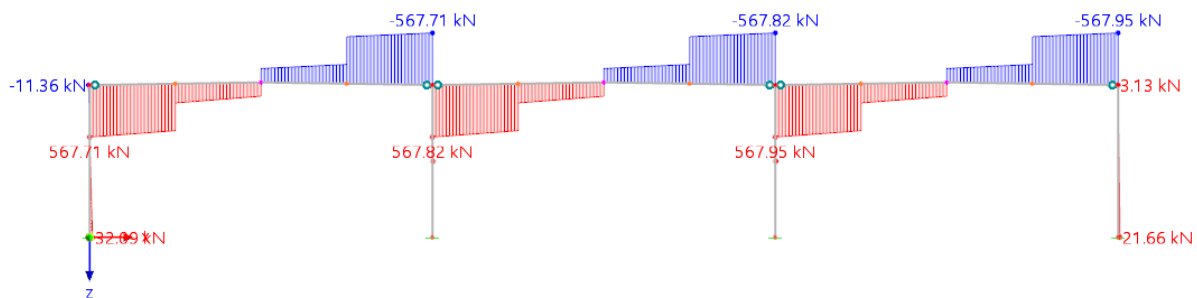
Tabulka 2: Porovnání normálových sil, hlavy sloupů a minima na vaznících

PRVEK	N _{min} VYPOČTENÁ [kN]	N _{min} MODEL S NÁBĚHY [kN]	ODCHYLKA [%]	N _{min} MODEL BEZ NÁBĚHŮ [kN]	ODCHYLKA [%]
SLOUP 1	-647,235	-651,45	0,65	-651,04	0,59
SLOUP 2	-1430,36	-1438,78	0,59	-1437,98	0,53
SLOUP 3	-1430,36	-1438,78	0,59	-1437,98	0,53
SLOUP 4	-647,235	-641,45	0,89	-651,04	0,59
VAZNÍK 1	-13,996	-18,79	34,25	-13,98	0,11
VAZNÍK 2	-6,238	-11,86	90,13	-6,22	0,29
VAZNÍK3	1,52	-3,28	315,79	1,53	0,66

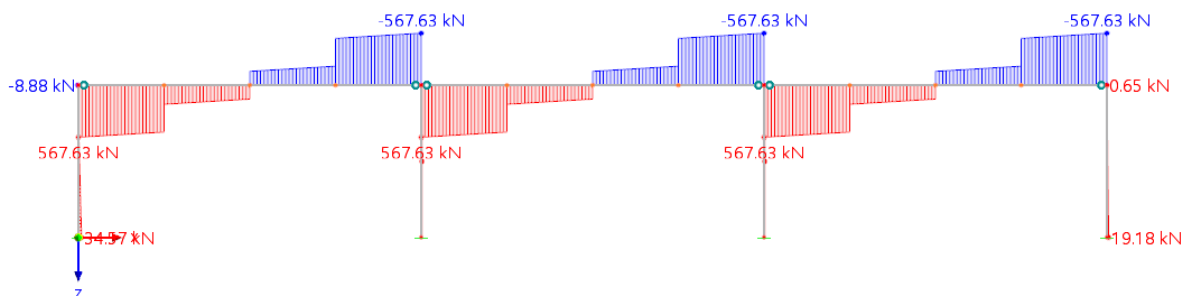
Tabulka 3: Porovnání normálových sil, paty sloupů a maxima na vaznících

PRVEK	N _{max} VYPOČTENÁ [kN]	N _{max} MODEL S NÁBĚHY [kN]	ODCHYLKA [%]	N _{max} MODEL BEZ NÁBĚHŮ [kN]	ODCHYLKA [%]
SLOUP 1	-737,973	-742,18	0,57	-741,78	0,52
SLOUP 2	-1510,235	-1518,66	0,56	-1517,85	0,50
SLOUP 3	-1510,235	-1518,66	0,56	-1517,85	0,50
SLOUP 4	-737,937	-742,18	0,57	-741,78	0,52
VAZNÍK 1	-13,996	-25,19	79,98	-13,98	0,11
VAZNÍK 2	-6,238	-18,26	192,72	-6,22	0,29
VAZNÍK3	1,52	-9,69	737,50	1,53	0,66

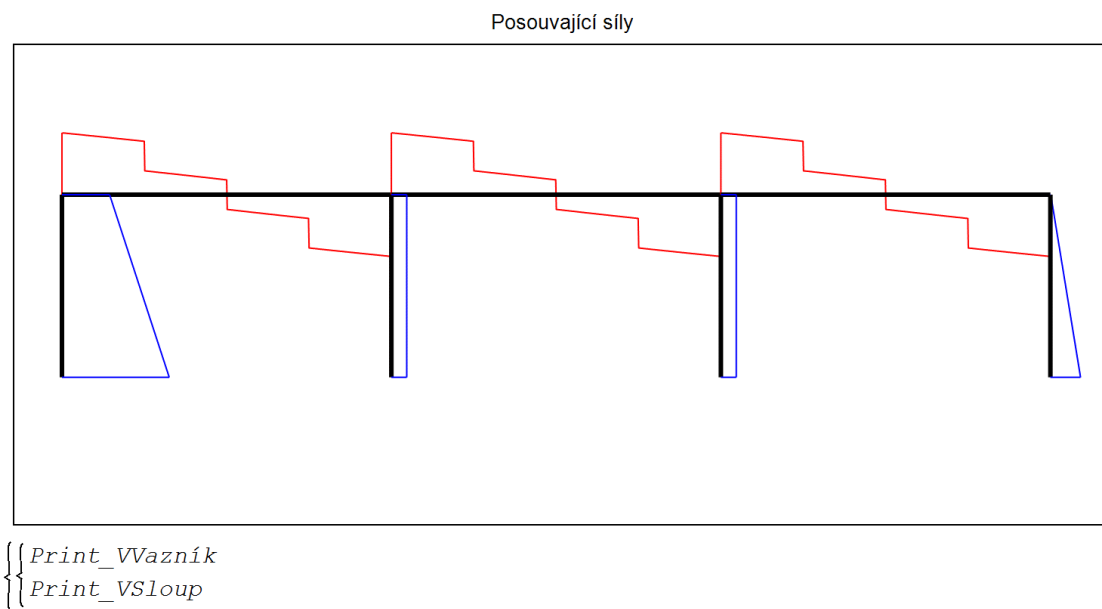
5.2 Posouvající síly rámu



Obrázek 30: Posouvající síly, model s náběhy



Obrázek 31: Posouvající síly, model s průřezem průměrné výšky



Obrázek 32: Posouvající síly, vlastní graf

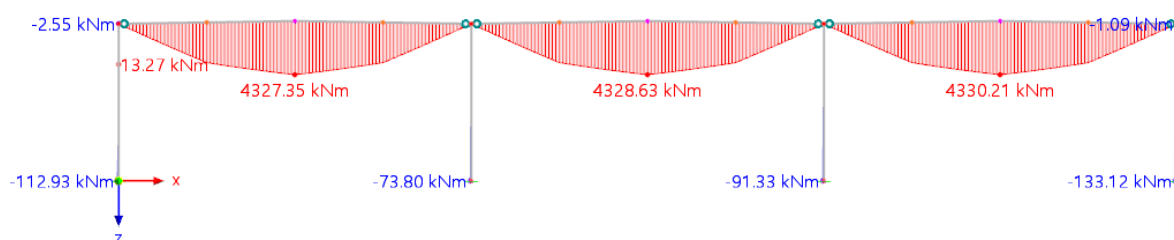
Tabulka 4: Porovnání posouvajících sil, paty sloupů a maxima na vaznících

PRVEK	$V_{\max}$ VYPOČTENÁ [kN]	$V_{\max}$ MODEL S NÁBĚHY [kN]	ODCHYLKA [%]	$V_{\max}$ MODEL BEZ NÁBĚHŮ [kN]	ODCHYLKA [%]
SLOUP 1	34,556	32,09	7,14	34,57	0,04
SLOUP 2	7,758	6,93	10,67	7,76	0,03
SLOUP 3	7,758	8,58	10,60	7,75	0,10
SLOUP 4	19,186	21,66	12,89	19,18	0,03
VAZNÍK 1	563,82	567,71	0,69	567,63	0,68
VAZNÍK 2	563,82	567,82	0,71	567,63	0,68
VAZNÍK3	563,82	567,95	0,73	567,63	0,68

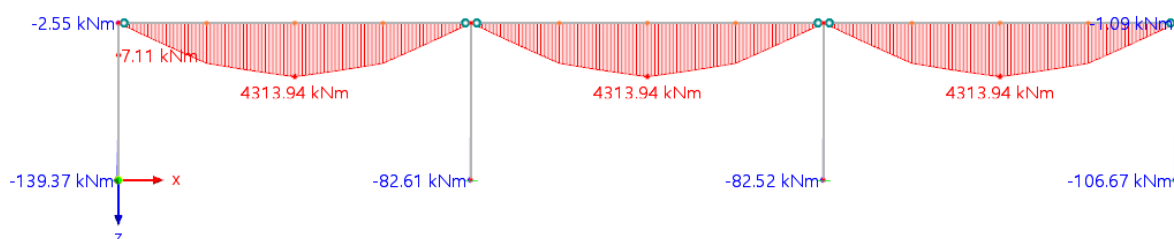
Tabulka 5: Porovnání posouvajících sil, hlavy sloupů

PRVEK	$V_{\min}$ VYPOČTENÁ [kN]	$V_{\min}$ MODEL S NÁBĚHY [kN]	ODCHYLKA [%]	$V_{\min}$ MODEL BEZ NÁBĚHŮ [kN]	ODCHYLKA [%]
SLOUP 1	-8,896	-11,36	27,70	-8,88	0,18
SLOUP 2	7,758	6,93	10,67	7,76	0,03
SLOUP 3	7,758	8,58	10,60	7,75	0,10
SLOUP 4	0,655	3,13	377,86	0,65	0,76

5.3 Ohybové momenty na rámu

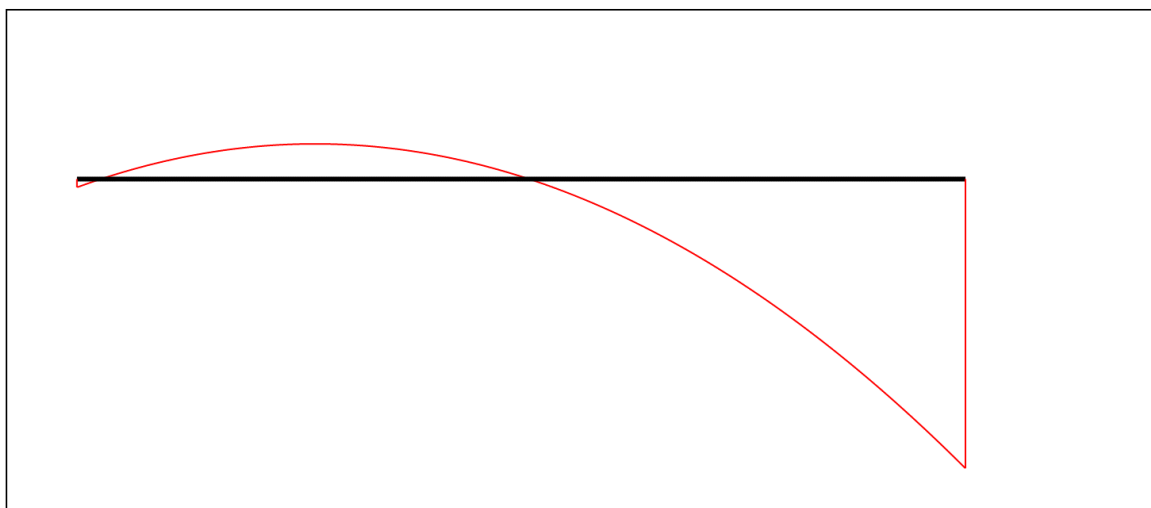


Obrázek 33: Ohybové momenty rámu, model s náběhy



Obrázek 34: Ohybové momenty rámu, model s průřezem průměrné výšky

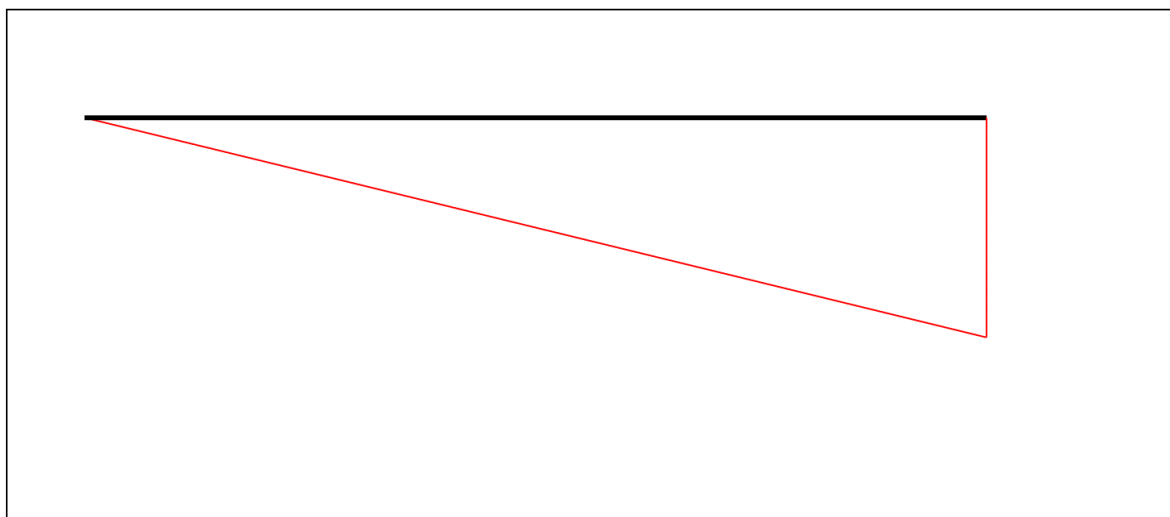
Moment na sloupu 1



{MSloup1

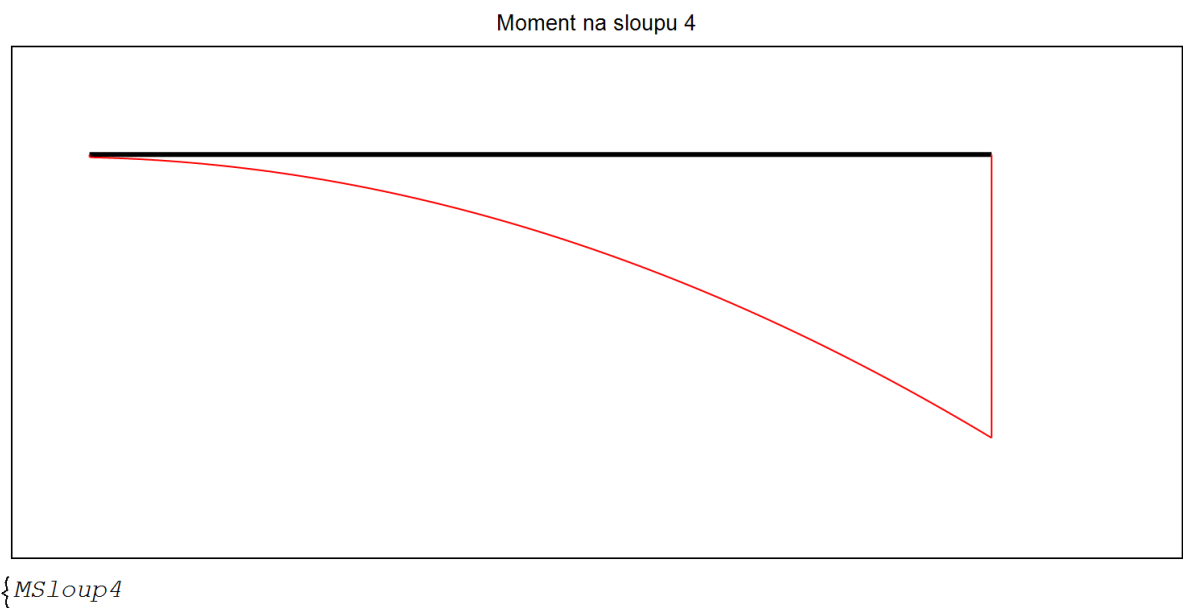
Obrázek 35: Ohybový moment na sloupu 1

Moment na sloupu 2

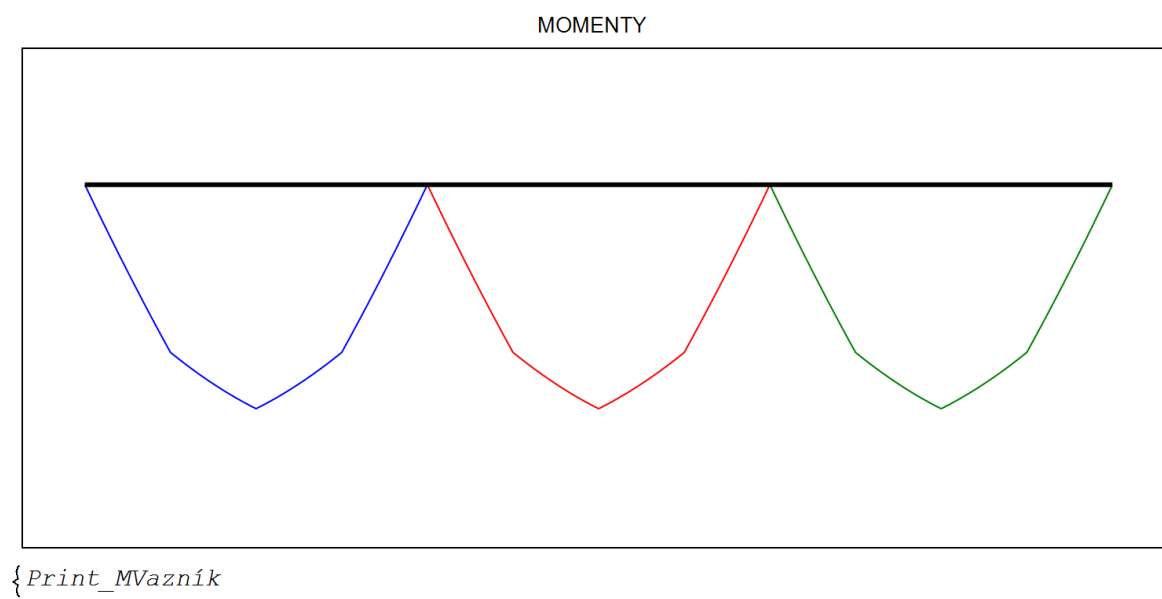


{MSloup2

Obrázek 36: Ohybový moment na sloupech 2 a 3



Obrázek 37: Ohybový moment na sloupu 4

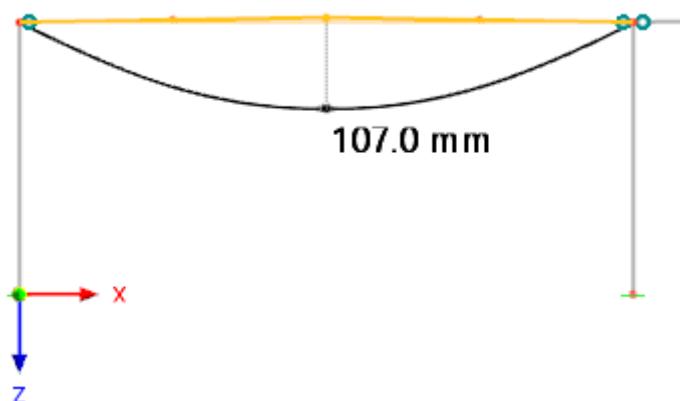


Obrázek 38: Ohybové momenty na vaznících

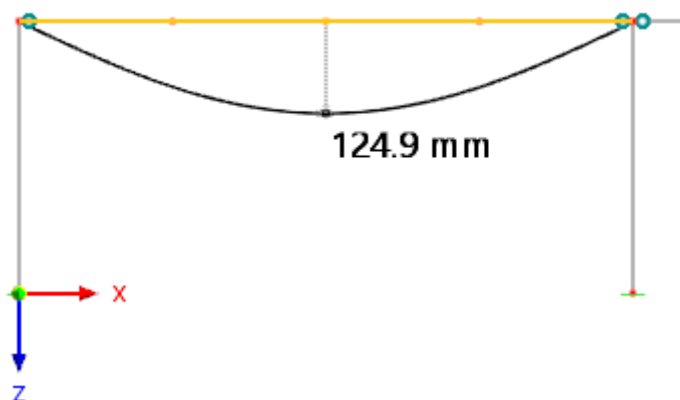
Tabulka 6: Porovnání ohybových momentů

PRVEK	$M_{\max}$ VYPOČTENÁ [kNm]	$M_{\max}$ MODEL S NÁBĚHY [kNm]	ODCHYLKA [%]	$M_{\max}$ MODEL BEZ NÁBĚHŮ [kNm]	ODCHYLKA [%]
SLOUP 1	-139,191	-112,93	18,87	-139,37	0,13
SLOUP 2	-82,621	-73,8	10,68	-82,61	0,01
SLOUP 3	-82,621	-91,33	10,54	-82,52	0,12
SLOUP 4	-106,745	-133,12	24,71	-106,67	0,07
VAZNÍK 1	4313,52	4327,35	0,32	4313,94	0,01
VAZNÍK 2	4313,52	4328,63	0,35	4313,94	0,01
VAZNÍK3	4313,52	4330,21	0,39	4313,94	0,01

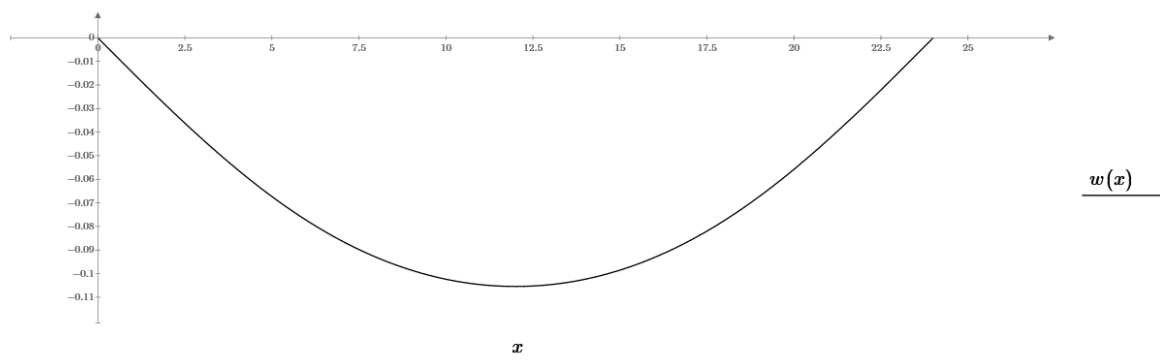
5.4 Deformace vazníku



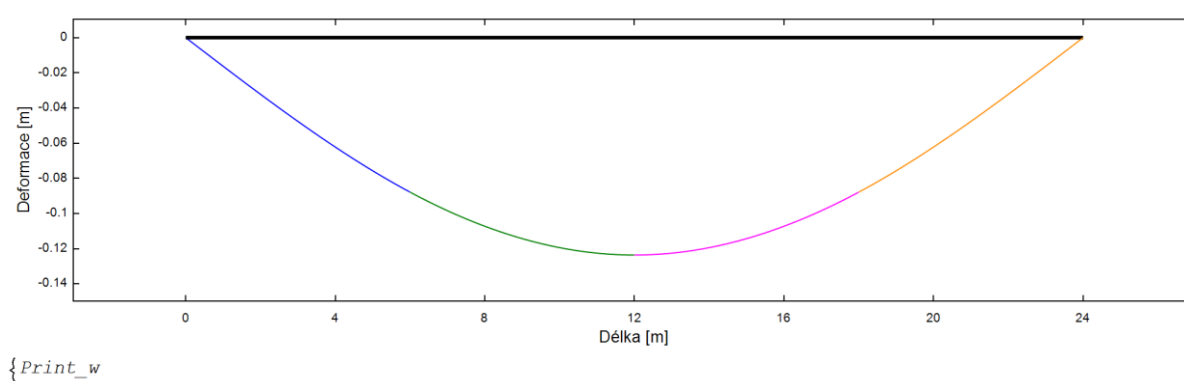
Obrázek 39: Deformace vazníku 1, model s náběhy



Obrázek 40: Deformace vazníku 1, model s průměrnou výškou průřezu



Obrázek 41: Vlastní graf deformací vazníku Mohrovou metodou

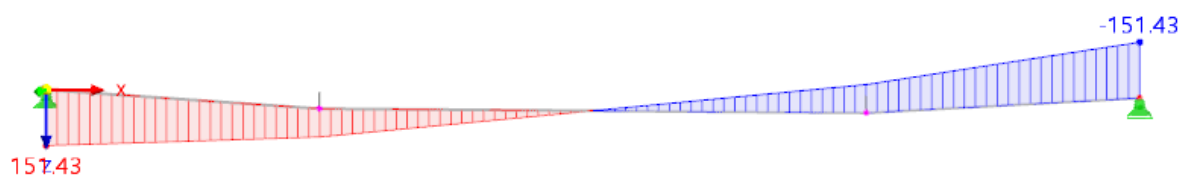


Obrázek 42: Vlastní graf deformací vazníku, metoda diferenciálních rovnic ohybové čáry

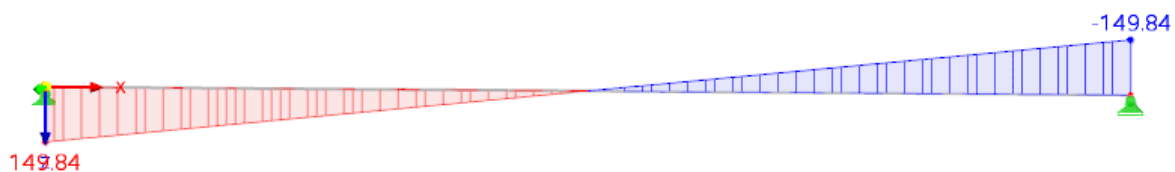
Tabulka 7: Porovnání deformací vazníku 1

PRVEK	$w_{\max}$ VYPOČTENÁ [mm]	$w_{\max}$ MODEL S NÁBĚHY [mm]	ODCHYLKA [%]	$w_{\max}$ MODEL BEZ NÁBĚHŮ [mm]	ODCHYLKA [%]
VAZNÍK-Mohr.	105,43	107	1,49	124,9	18,47
VAZNÍK-Dif.	123,6	107	13,43	124,9	1,05

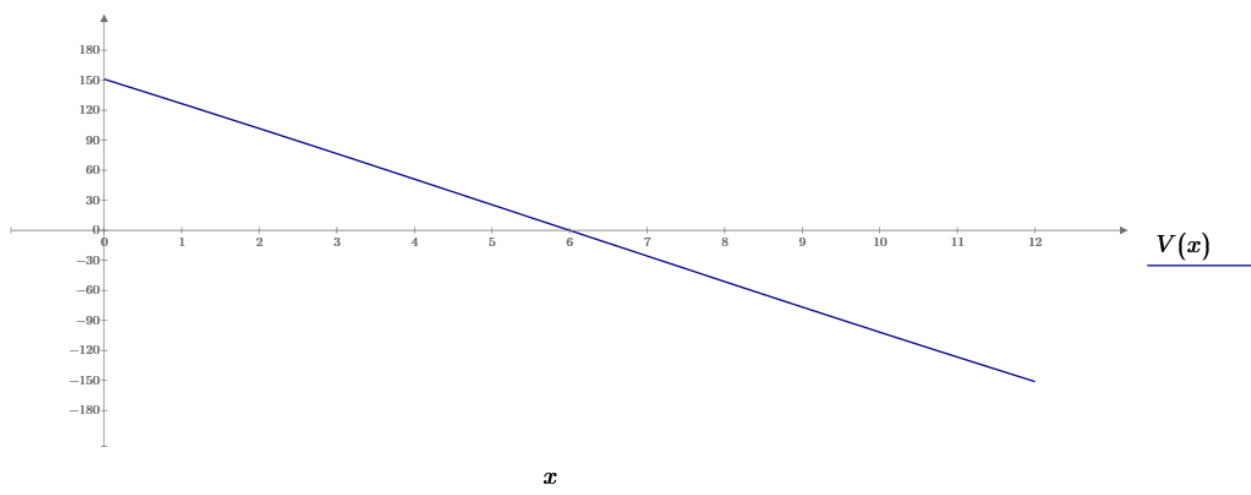
5.5 Statické veličiny vaznice



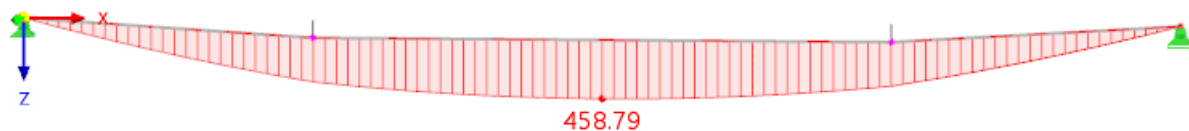
Obrázek 43: Posouvající síly vaznice, model s náběhy



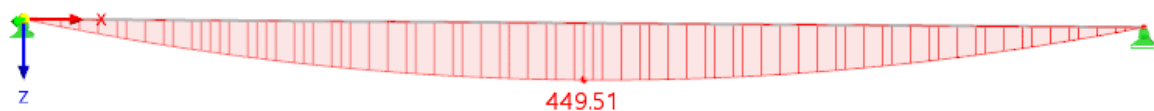
Obrázek 44: Posouvající síly vaznice, model s průměrným průřezem



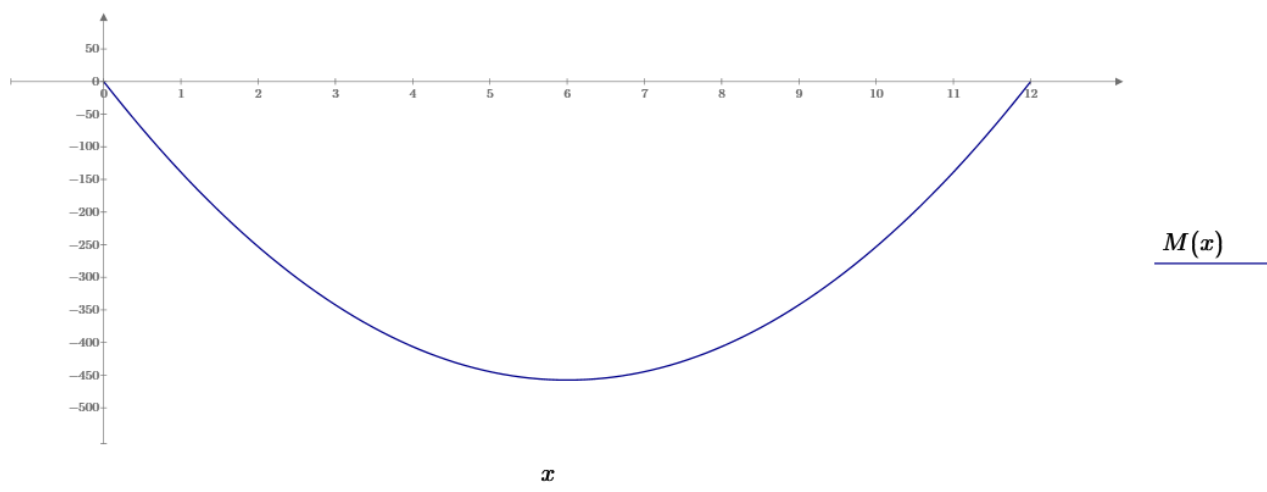
Obrázek 45: Vlastní graf posouvajících sil vaznice



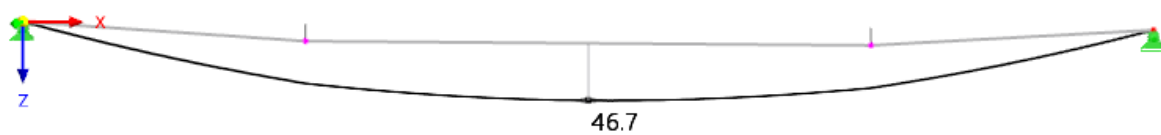
Obrázek 46: Ohybové momenty vaznice, model s náběhy



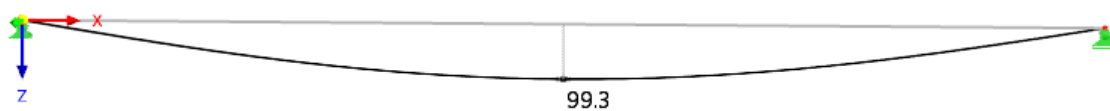
Obrázek 47: Ohybové momenty vaznice, model s průměrným průřezem



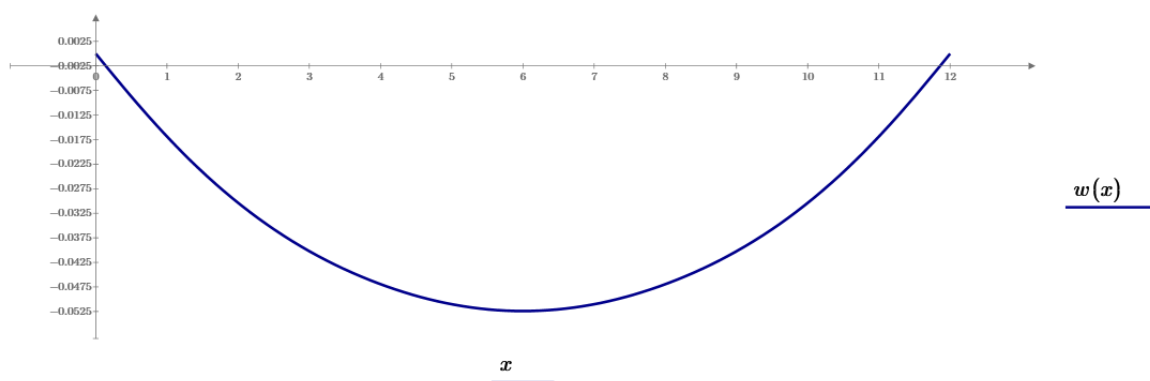
Obrázek 48: Vlastní graf ohybových momentů vaznice



Obrázek 49: Deformace vaznice, model s náběhy



Obrázek 50: Deformace vaznice, průměrný průřez



Obrázek 51: Deformace vaznice, vlastní graf

Tabulka 8: Statická analýza vaznice, porovnání výsledků

PRVEK	HODNOTA VYPOČTENÁ	HODNOTA Z MODELU S NÁBĚHY	ODCHYLKA [%]	HODNOTA Z MODELU BEZ NÁBĚHŮ	ODCHYLKA [%]
$V_{\max}$ [kN]	151,07	151,43	0,24	149,84	0,81
$M_{\max}$ [kNm]	457,33	458,79	0,32	449,51	1,71
$w_{\max}$ [mm]	52,39	46	12,20	99,3	89,54

6 Závěr

Porovnáním výsledků výpočetních metod bylo zjištěno, že nosníky s náběhy vykazují menší hodnoty deformací ve svislém směru než nosníky průměrného konstantního průřezu při zachování stejných, nebo velmi podobných, průběhů ostatních statických veličin. Můžeme tedy prohlásit, že při stejné stejné množství použitého materiálu se dá realizací náběhů dosáhnout staticky výhodnějších vlastností.

Při statické analýze normálových sil vazníku a následně posouvajících sil a ohybových momentů sloupů jsou zřejmé značné odchylky mezi výpočetním modelem uvažujícím náběhy, ručním výpočtem a modelem uvažujícím konstantní průběh průřezu konstrukčního prvku. Tato chyba je způsobena uvažováním rovinné střednice prvku při odvozování funkcí. Statický model s náběhy v programu RFEM uvažuje střednici nakloněnou. Odchylka nemá vliv na zjištěné závěry práce.

Velký rozdíl výsledných deformací lze i přes prakticky stejné průběhy posouvajících sil a ohybových momentů pozorovat u posuzované vaznice. Odchylka mezi modelem

s náběhy a ručním výpočtem není zanedbatelná i přes použití stejné metody výpočtu jako u analýzy vazníku, kde se vlastní výsledky s modelem shodují. Rozdíl mohl být způsoben nepřesností použité metody při řešení geometricky složitějších prvků, nebo numerickou chybou programu Mathcad při složitějších integracích. Tvrzení, že nosníky s náběhy vykazují při stejné hmotnosti menší hodnoty deformací než nosníky stejného průřezu s jeho průměrnou výškou, však nepřesnost nevyvrací.

Literatura

- [1] KADLČÁK, J. a J. KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí II*. V Brně: VUTIUM, 2004 [i.e. 2007]. ISBN 978-80-214-3428-8.
- [2] Bažant Z., Čírtek L., Štěpánek P. *Betonové konstrukce II - Modul M06*. Studijní opory. VUT FAST, 2006
- [3] ČSN EN 1991-1-1: *EUROKÓD 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [4] ČSN EN 1991-1-3: *EUROKÓD 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [5] ČSN EN 1991-1-4: *EUROKÓD 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [6] ČSN EN 1990: *EUROKÓD: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [7] Kytýr J., Keršner Z., Zídek R., Vlk Z. *Základy stavební mechaniky – Modul BD01-M02, Průřezové charakteristiky*. Studijní opory. VUT FAST, 2004

Seznam obrázků

Obrázek 1: Příčný řez halou	15
Obrázek 2: Vazník, vaznice, ztužidlo	16
Obrázek 3: Schéma zatížení první lodě haly	21
Obrázek 4: Zatížení vlastní tíhou na rámu	22
Obrázek 5: Zatížení sněhem na rámu	23
Obrázek 6: Zatížení větrem na rámu	23
Obrázek 7: Posun hlav sloupů u modelu s konstantním průřezem	24
Obrázek 8: Posun hlav sloupů u modelu s náběhy na vaznicích	24
Obrázek 9: Schéma výpočtu neznámých sil x pro jednolodní halu [2]	25
Obrázek 10: Schéma pro výpočet neznámých sil x vícelodních hal [2]	26
Obrázek 11: Graf normálových sil funkce $N1(x)$ bez úprav	28
Obrázek 12: Graf normálových sil $N1(x)$, s grafickými úpravami	28
Obrázek 13: Geometrie a zatížení vaznice	30
Obrázek 14: Schéma zatížení vaznice	30
Obrázek 15: Funkce spojitého zatížení vaznice	31
Obrázek 16: Schéma zatížení vazníku	32
Obrázek 17: Schéma průřezu vaznice	38
Obrázek 18: Moment setrvačnosti u vaznice	39
Obrázek 19: Rozdělení profilu vazníku do zjednodušených obrazců	40
Obrázek 20: Symbolické popisy rozměrů profilu vazníku	41
Obrázek 21: Značení vzdálenosti jednotlivých těžišť obrazců od počátku	41
Obrázek 22: Moment setrvačnosti na vazníku	42
Obrázek 23: Graf zatížení na fiktivním nosníku vaznice	43
Obrázek 24: Posouvající síly na fiktivním nosníku vaznice	43
Obrázek 25: Zatížení na fiktivní nosník u vazníku	44
Obrázek 26: Posouvající síly na fiktivním nosníku vazníku	45
Obrázek 27: Normálové síly, model s náběhy	51
Obrázek 28: Normálové síly, model s průřezem průměrné výšky	51
Obrázek 29: Normálové síly rámu, vlastní graf	52
Obrázek 30: Posouvající síly, model s náběhy	53

Obrázek 31: Posouvající síly, model s průřezem průměrné výšky	53
Obrázek 32: Posouvající síly, vlastní graf	53
Obrázek 33: Ohybové momenty rámu, model s náběhy	54
Obrázek 34: Ohybové momenty rámu, model s průřezem průměrné výšky	54
Obrázek 35: Ohybový moment na sloupu 1	55
Obrázek 36: Ohybový moment na sloupech 2 a 3	55
Obrázek 37: Ohybový moment na sloupu 4	56
Obrázek 38: Ohybové momenty na vaznících	56
Obrázek 39: Deformace vazníku 1, model s náběhy	57
Obrázek 40: Deformace vazníku 1, model s průměrnou výškou průřezu	57
Obrázek 41: Vlastní graf deformací vazníku Mohrovou metodou	58
Obrázek 42: Vlastní graf deformací vazníku, metoda diferenciálních rovnic ohybové čáry	58
Obrázek 43: Posouvající síly vaznice, model s náběhy	58
Obrázek 44: Posouvající síly vaznice, model s průměrným průřezem "	59
Obrázek 45: Vlastní graf posouvajících sil vaznice	59
Obrázek 46: Ohybové momenty vaznice, model s náběhy	59
Obrázek 47: Ohybové momenty vaznice, model s průměrným průřezem	59
Obrázek 48: Vlastní graf ohybových momentů vaznice	60
Obrázek 49: Deformace vaznice, model s náběhy	60
Obrázek 50: Deformace vaznice, průměrný průřez	60
Obrázek 51: Deformace vaznice, vlastní graf	61

Seznam tabulek

Tabulka 1: Kategorie terénu [4].....	18
Tabulka 2: Porovnání normálových sil, hlavy sloupů a minima na vaznících	52
Tabulka 3: Porovnání normálových sil, paty sloupů a maxima na vaznících	52
Tabulka 4: Porovnání posouvajících sil, paty sloupů a maxima na vaznících.....	54
Tabulka 5: Porovnání posouvajících sil, hlavy sloupů	54
Tabulka 6: Porovnání ohybových momentů.....	57
Tabulka 7: Porovnání deformací vazníku 1	58
Tabulka 8: Statická analýza vaznice, porovnání výsledků.....	61