VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA VYBRANÉ KONSTRUKCE

STATIC ANALYSIS OF CHOSEN STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE / AUTHOR: Kamil Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE / SUPERVISOR: Ing. JOSEF MARTINÁSEK, Ph.D.

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA VYBRANÉ KONSTRUKCE

STATIC ANALYSIS OF CHOSEN STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Kamil Dvořák

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JOSEF MARTINÁSEK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Kamil Dvořák
Název	Statická analýza vybrané konstrukce
Vedoucí práce	Ing. Josef Martinásek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Kadlčák, J., Kytýr, J.:. Statika stavebních konstrukcí II. Brno : VUTITUM, 2004

Normy:ČSN EN 1991-1-3, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem

ČSN EN 1991-1-4, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem

ČSN EN 1991-2, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou

Internetové zdroje

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce je statická analýza konstrukce lávky. V programu RFEM bude vytvořen MKP model konstrukce lávky. Na něm se budou stanovovat vnitřní síly a vybrané deformace od různých druhů zatěžování. Vybrané výsledky budou porovnány s ručním výpočtem.

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. Josef Martinásek, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá statickou analýzou konstrukce. Řešená konstrukce je lávka, která bude stát na vlakovém nádraží v Adamově.
Statický výpočet bude proveden pomocí programu. Zvolený výpočetní model bude následně porovnán s ručním výpočtem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lávka
RFEM
Statika
Metoda konečných prvků
Vnitřní síly

ABSTRACT

This thesis deal with static analysis of structure. The solution construction is a footbridge. The footbridge will be bult in the train station Adamov. Structural design will be done using software. The chosen computioal model will be compared with hand calculation.

KEYWORDS

Footbridge
RFEM
Statics
Finite Element Method (FEM)
Internal forces

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Kamil Dvořák *Statická analýza vybrané konstrukce.* Brno, 2021. 70 s., 74 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Josef Martinásek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

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

V Brně dne 28. 5. 2021

Kamil Dvořák
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

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

V Brně dne 28. 5. 2021

Kamil Dvořák
autor práce

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA VYBRANÉ KONSTRUKCE
STATIC ANALYSIS OF CHOSEN STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Kamil Dvořák
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JOSEF MARTINÁSEK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA VYBRANÉ KONSTRUKCE

STATIC ANALYSIS OF CHOSEN STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Kamil Dvořák

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JOSEF MARTINÁSEK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2021

Obsah

1. Úvod

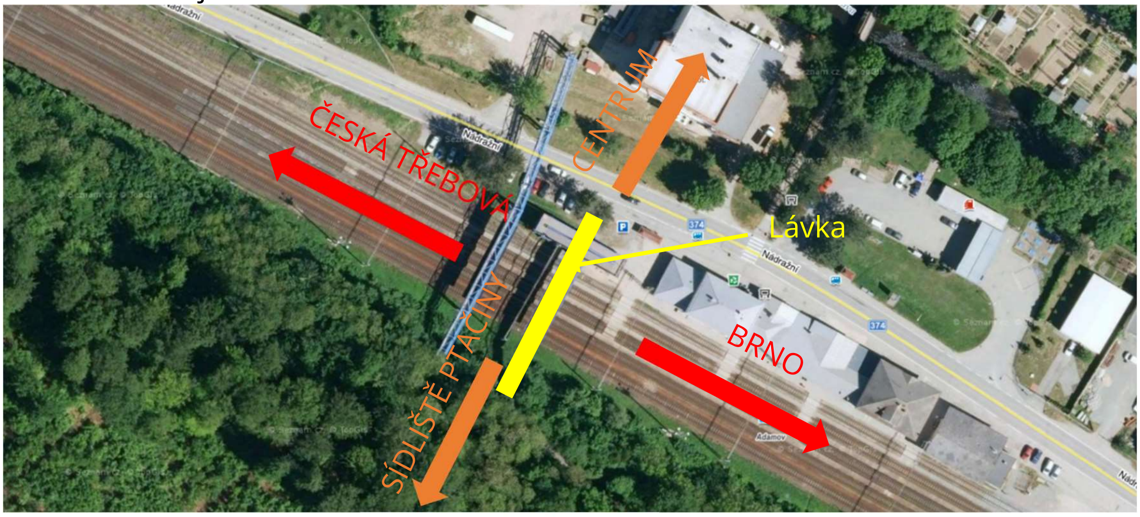
Tato závěrečná práce se zabývá statickou analýzou lávky pro pěší. Geometrie a materiálové složení lávky vychází z projektu lávky, která má být vybudována v železniční stanici Adamov.

Cílem práce je zjistit, jakým způsobem a jakou intenzitou je konstrukce namáhána. K tomu použijeme vnitřní síly. Ty na konstrukci vyvodíme pro různé typy statického zatěžování. V našem případě použijeme zatížení od vlastní tíhy, zatížení sněhem, zatížení větrem a zatížení pěší dopravou. K výpočtu bude použita metoda konečných prvků, která bude realizována pomocí programu RFEM 5.24. Výsledky z programu porovnáme s ručním výpočtem. V něm bude použita metoda třímomentových rovnic, deformační metoda, metoda jednotkových sil a výpočet pořadnic příčinkové čáry na staticky neurčité konstrukci.

2. Informace o lávce

2.1. Poloha

Lávka bude umístěna v železniční stanici Adamov – nádraží, která leží na železniční trati Brno-Česká Třebová. Lávka spojuje sídliště Ptačina s centrem Adamova a výstražní budovou. (obrázek 1). Toto spojení je totiž kromě lávky realizováno jen silničním podjezdem pod železniční tratí. Při plánované rekonstrukci nádraží má nahradit stávající lávku.



Obr. 1 Umístění lávky na nádraží [1]

2.2. Konstrukční systém

Lávka je navržena jako dvojice kosočtverečných příhradových pásů, které jsou navzájem spojeny spřaženou ocelobetonovou deskou.
Délka lávky je 50,4 m. Osová vzdálenost horního a dolního pásu činí 3,0 m. Osová vzdálenost dvojice příhradových pásů činí 3 m. Průchozí prostor je 2,5 m na šířku a 2,5 m na výšku.

2.2.1. Příhradový pás

Je tvořen dolním a horním pásem v délce 50,4 m, oba pásy jsou tvořeny uzavřenými obdélníkovými profily RHS 300/150/8. Osová vzdálenost mezi diagonálami je jak u horního, tak dolního pásu 1,2 m. Diagonály jsou průřezu uzavřeného obdélníku RHS 100/50/4. Diagonály jsou excentricky umístěné od osy spojující horní a dolní pás o 0,02 m směrem vně lávky. Základní osová délka diagonál je 3,231 m. Zkrácená diagonála, která má délku 1,616 m, je koutovým svarem přivařena ke standardní diagonále v půlce rozpětí. Orientace krátkých a dlouhých diagonál se pravidelně mění.

Sloupky se nachází jen na koncích příhradových pásů a jsou z uzavřeného plnostěnného čtvercového profilu SHS 150/6,3. Nachází se na začátku a na konci lávky, ohraničují vstupní otvory na lávku.

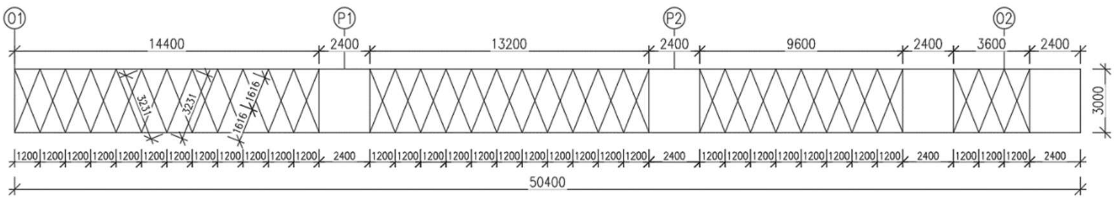
Ve směru Česká Třebová je členění příhrady směrem od sídliště Ptačiny následující:

Příhradový pás	dl. 14,4 m
Otvor vzniklý vynecháním příhradového pásu	dl. 2,4 m
Příhradový pás	dl. 13,2 m
Otvor vzniklý vynecháním příhradového pásu	dl. 2,4 m
Příhradový pás	dl. 9,6 m
Otvor vzniklý vynecháním příhradového pásu	dl. 2,4 m
Příhradový pás	dl. 3,6 m
Otvor vzniklý vynecháním příhradového pásu	dl. 2,4 m

Ve směru Brno je členění příhrady směrem od výpravní budovy následující:

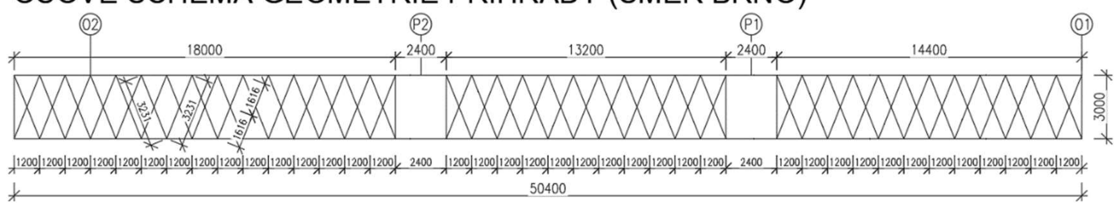
Příhradový pás	dl. 18,0 m
Otvor vzniklý vynecháním příhradového pásu	dl. 2,4 m
Příhradový pás	dl. 13,2 m
Otvor vzniklý vynecháním příhradového pásu	dl. 2,4 m
Příhradový pás	dl. 14,4 m

OSOVÉ SCHÉMA GEOMETRIE PŘÍHRADY (SMĚR Č.T.)



Obr. 2 Osové Schéma geometrie směrem od České Třebové

OSOVÉ SCHÉMA GEOMETRIE PŘÍHRADY (SMĚR BRNO)



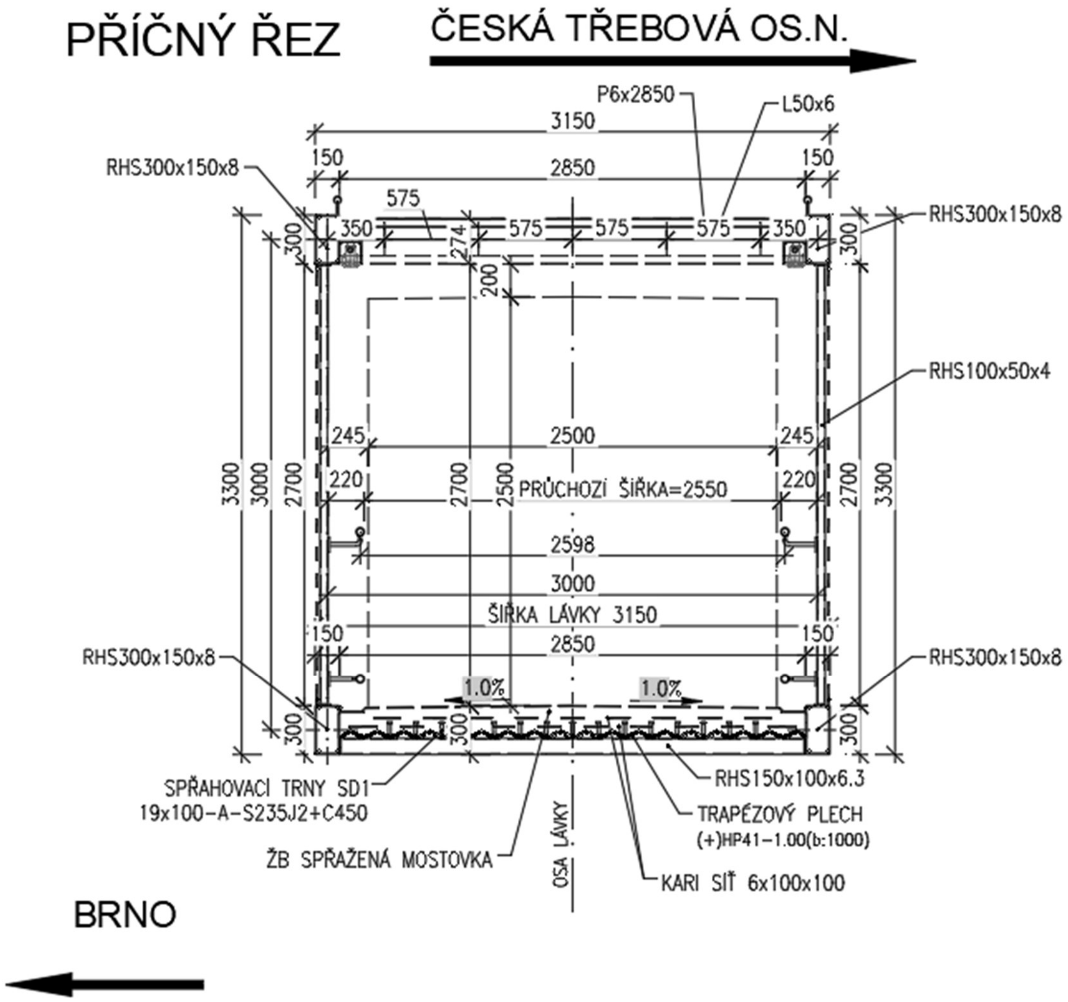
Obr. 3 Osové Schéma geometrie směrem od Brna

2.2.2. Mostovka

Mostovka je tvořena spřaženou ocelobetonovou deskou. Ta se skládá z uzavřených válcovaných profilů RHS 150/100/6.3, které jsou pomocí koutových svarů připojeny k dolnímu pásu. Excentricita os dolního pásu prutů mostovky je Z = + 0,100 m, kde Z je osa kladně směřující dolů. Osová vzdálenost mostnic v podélném směru je 1,2 m. Délka prutů mostovky činí 2,85 m. Na pruty RHS 150/100/6,3 je pomocí spřahovacích trnů SD1 19/100 připevněn trapézový plech +HP41-1,00 (b: 1000) v normální poloze. Na trapézovém plechu je betonová deska průměrné tloušťky 0,1615 m. Betonová deska je v podélném směru ve spádu 2 % a v příčném směru spád činí 1 %.

2.2.3. Zastřešení

Zastřešení je provedeno pomocí úhelníků L 50/6, které jsou umístěny excentricky k styčníku horního pásu s diagonálou. Excentricita ve vodorovném směru je 0,010 m a ve svislém směru od +0,086 do -0,020 m. Na koncích lávky je úhelník nahrazen profilem RHS 300/150/8. Na L nosnících a RHS profilech je ocelový plech P 6/2850, který je v podélném spádu 0,8 %. V nejnižším místě se nachází příčný žlab.



Obr. 4 Příčný řez lávkou

2.2.4. Materiálová skladba lávky

Všechny jmenované ocelové průřezy kromě trapézového plechu a spřahovacích trnů jsou z oceli S 355. Mez kluzu je tedy f_y = 355 MPa, modul pružnosti je E = 210 GPa. Trapézový plech je z oceli S 235. Jelikož ho zanedbáme, tak nemusíme jeho materiálové vlastnosti brát v úvahu.

Beton na betonovou desku bude třídy C 30/37, kde je charakteristická pevnost v tlaku f_{ck} = 30 MPa a sečnový modul pružnosti E_{cm} = 33 GPa.

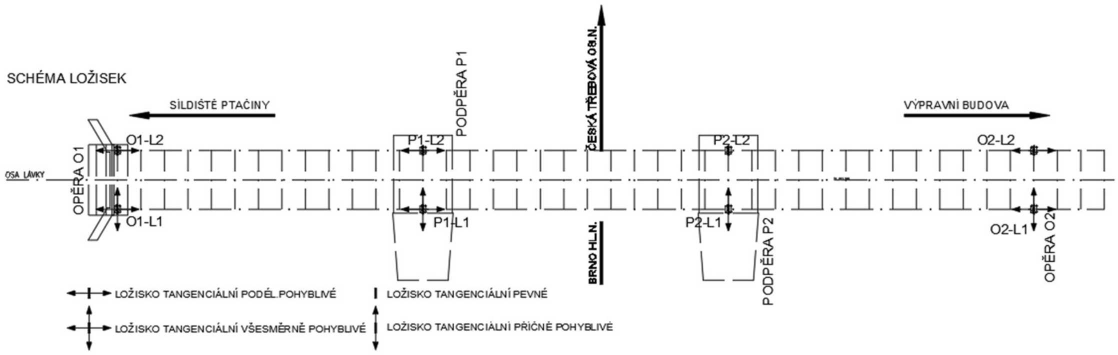
2.2.5. Uložení

Lávka je provedena jako spojitý nosník o třech polích s převislým koncem. Rozpětí všech polí je 15,6 m. Délka převislého konce je 3,675 m. Uložení je provedeno pomocí tangenciálních ložisek. Ta jsou všesměrně, příčně nebo podélně pohyblivá (viz obrázek 5). Příčná osová vzdálenost ložisek je 3 m. V podélném směru jsou vzdálenosti ložisek stejné a jejich poloha je podle podélné osy symetrická.

Podélná vzdálenost ložisek je směrem od sídliště Ptačina následující:

O1-P1	15,6m
P1-P2	15,6m
P2-O2	15,6m

Následuje pak převislý konec délky 3,6 m.



Obr. 5 Rozmístění a druh ložisek lávky

3. Zatížení

3.1. Vlastní tíha

Bude uvažována jako plošné spojité zatížení. Bude se skládat z vlastní tíhy prutů, které jsou vyjmenovány v kapitole 2.2 Konstrukční systém.

U mostovky bude trapézový plech přepočítán na část betonové desky. A to z důvodu, aby šel vytvořit v RFEMu prutový model spřažené desky [2].

$$t_{plech} = \frac{\gamma_{plech}\, b_{plech}}{\gamma_{bet}\, b_{bet}} = \frac{0{,}121 \cdot 2{,}8}{25 \cdot 2{,}85} = 0{,}005 \text{ m}$$

$t_{deska} = t_{plech} + t_{beton} = 0{,}005 + 0{,}1615 = 0{,}1665$ m

$g = 2\, A_{s,horní\ pás}\, \mu_s + 2\, A_{s,dolní\ pás}\, \mu_s + A_c\, \mu_c + 4\, A_{s,diagonála}\, \mu_s + A_{s,plechu}\, \mu_s +$

$+ A_{s,nosník\ mostovky}\, b\, \mu_s / l_1 + A_{s,nosník\ zastřešení}\, b\, \mu_s / l_2 =$

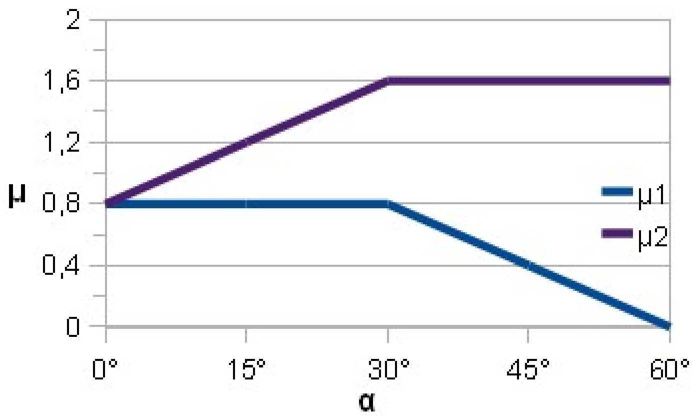
$g = 2 \cdot 6{,}724 \cdot 10^{-3} \cdot 78{,}5 + 2 \cdot 6{,}724 \cdot 10^{-3} \cdot 78{,}5 + 2{,}85 \cdot 0{,}1665 \cdot 25 + 4 \cdot 1{,}09 \cdot 10^{-3} \cdot$
$78{,}5 + 2{,}85 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 78{,}5 + 2{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}85 \cdot 78{,}5/1{,}2 + 5{,}69 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}85 \cdot 78{,}5/0{,}4 =$
$= 16{,}54 \text{ kNm}^{-1}$

3.2.Sněhem

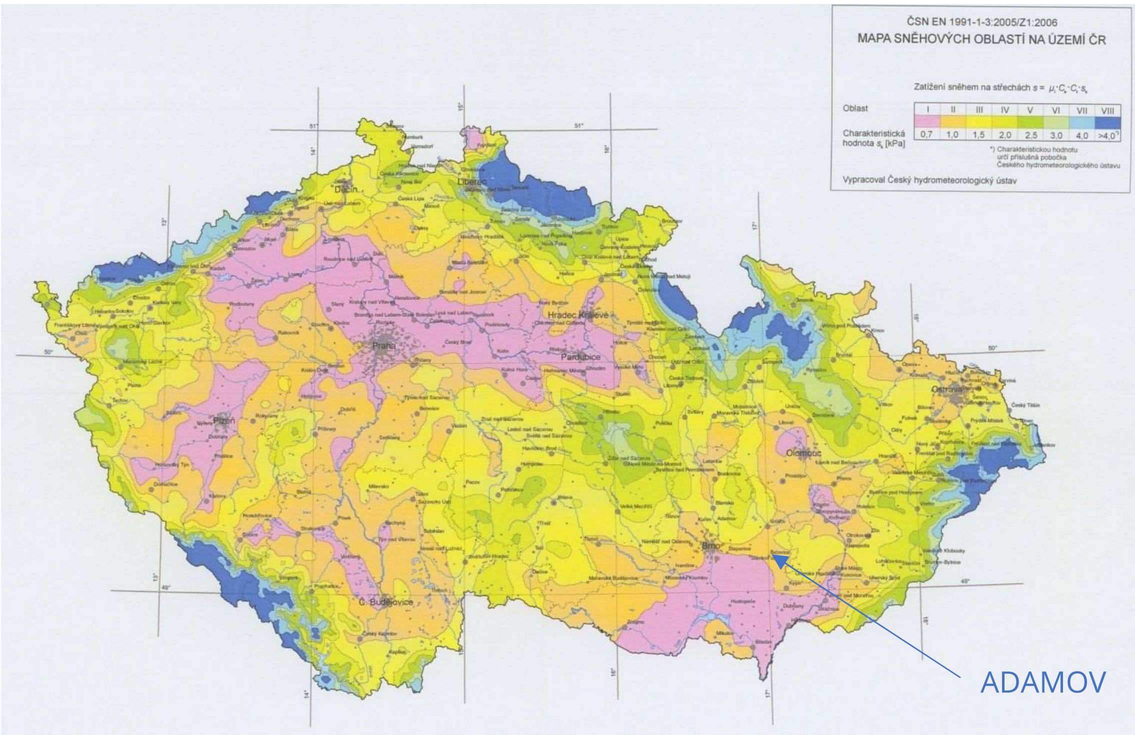
Bude počítáno jako rovnoměrné spojité plošné zatížení s konstantní velikostí po celé délce lávky. Zatížení sněhem bude počítáno podle normy [3].

Bude uvažována sněhová oblast III. (obrázek 6 a 7) se základním zatížením sněhem $s_k = 1{,}50 \text{ kNm}^{-2}$. Typ krajiny bude uvažován normální, součinitel expozice tedy bude $C_e = 1{,}0$. Tepelný součinitel jsem stanovil $C_t = 1{,}0$. Tvarový součinitel zatížení sněhem pro pultové střechy dosahuje v našem případě hodnoty $\mu_1 = 0{,}8$ (graf 1).

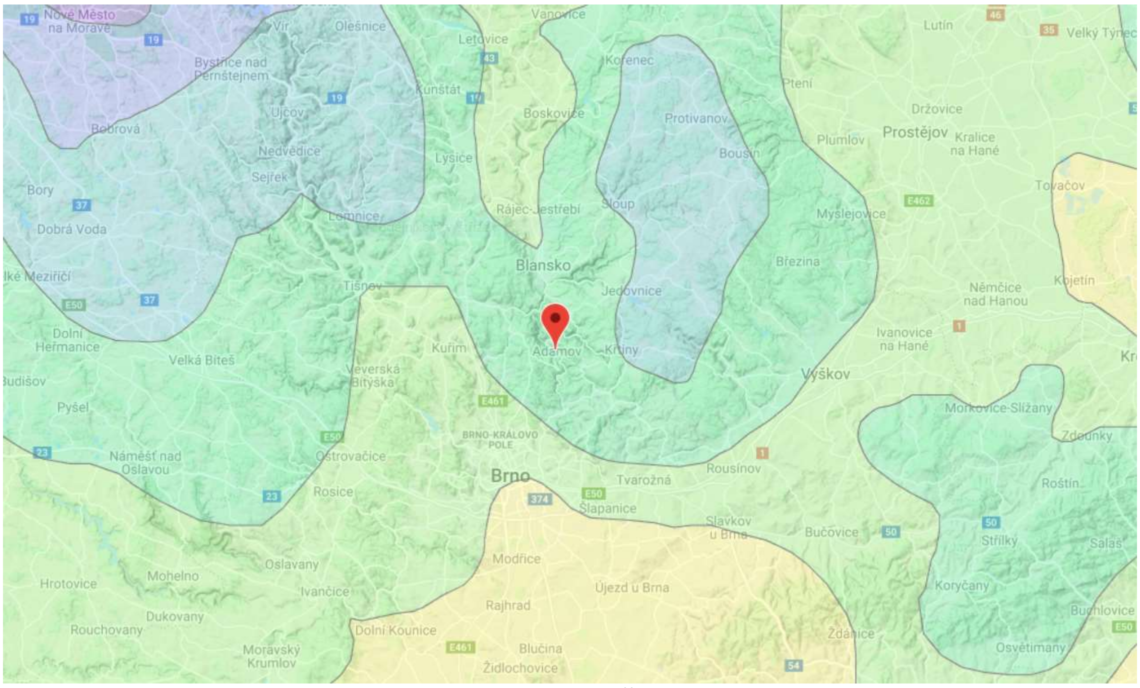
$s = s_k\, \mu_1\, C_e\, C_t = 1{,}5 \cdot 0{,}8 \cdot 1 \cdot 1 = 1{,}2 \text{ kNm}^{-2}$.
Plocha střechy je $A = 151{,}2 \text{ m}^2$



graf. 1 Závislost Součinitele μ_1 na sklonu střechy [4]

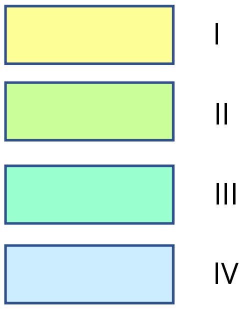


Obr. 6 Mapa sněhových oblastí ČR [5]



Obr. 7 Detail mapy sněhových oblastí ČR s pohledem na Adamov [6]

Sněhová oblast:



3.3. Větrem

Výpočet bude proveden podle normy [7].
Zatížení větrem bude uvažováno pouze v příčném směru. Budou zvoleny dva zatěžovací stavy – zatěžovací stav větru z jedné strany a zatěžovací stav větru z druhé strany. Větrná oblast bude určená z mapy větrných oblastí pro ČR. Adamov náleží do II. větrné oblasti (obrázek 8) kde $v_{b,o}$ = 25 ms^{-1}. Kategorie terénu je III.

Základní rychlost větru se vypočte ze vztahu:
$v_b = c_{dir}\, c_{season}\, v_{b,o}$

Kde $c_{dir} = 1$
$c_{season} = 1$

$v_b = 1 \cdot 1 \cdot 25 = 25$ ms^{-1}

Charakteristická střední rychlost větru je
$v_m(z) = c_r(z)\, c_0(z)\, v_b$
$c_0(z) = 1$
$c_r(z) = k_r ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ pro $z_{min} < z < z_{max}$

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,215$$

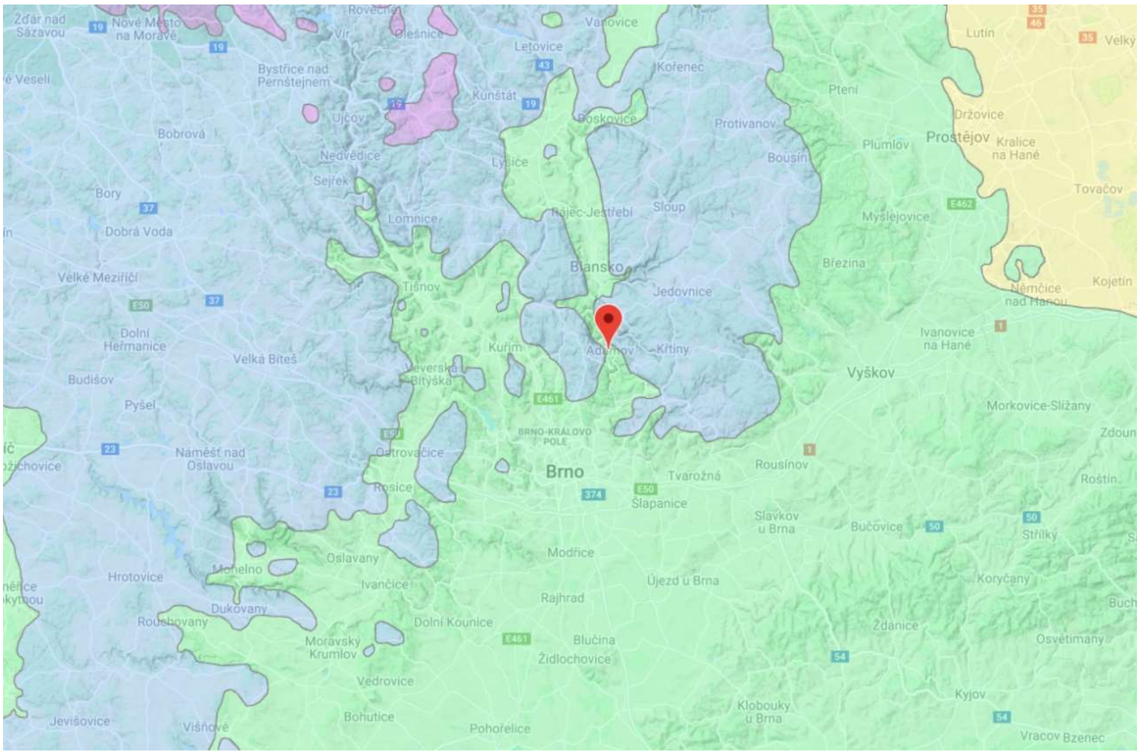
$$c_r(z) = 0,215 \cdot \ln\left(\frac{10}{0,3}\right) = 0,754$$

$v_m(z) = 0754 \cdot 1 \cdot 25 = 18,85$ ms^{-1}

Maximální charakteristický tlak větru:
$q_p(z) = [1+7I_v(z)]\ 0,5\ \rho\ v_m^2(z) = c_e(z)\ q_b$

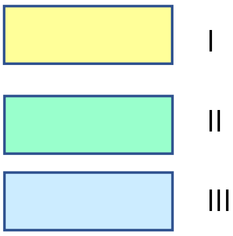
$$I_V(z) = \frac{K_I}{c_0(z)\ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{10}{0,3}\right)} = 28,5179 \cdot 10^{-2}$$

$q_p(z)= [1+7 \cdot 28,5179 \cdot 10^{-2}] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 18,85^2 = 665,39$ Nm^{-2} ≐ 665 kNm^{-2}



Obr. 8 Detail mapy větrových oblastí s pohledem na Adamov [6]

Větrová oblast:

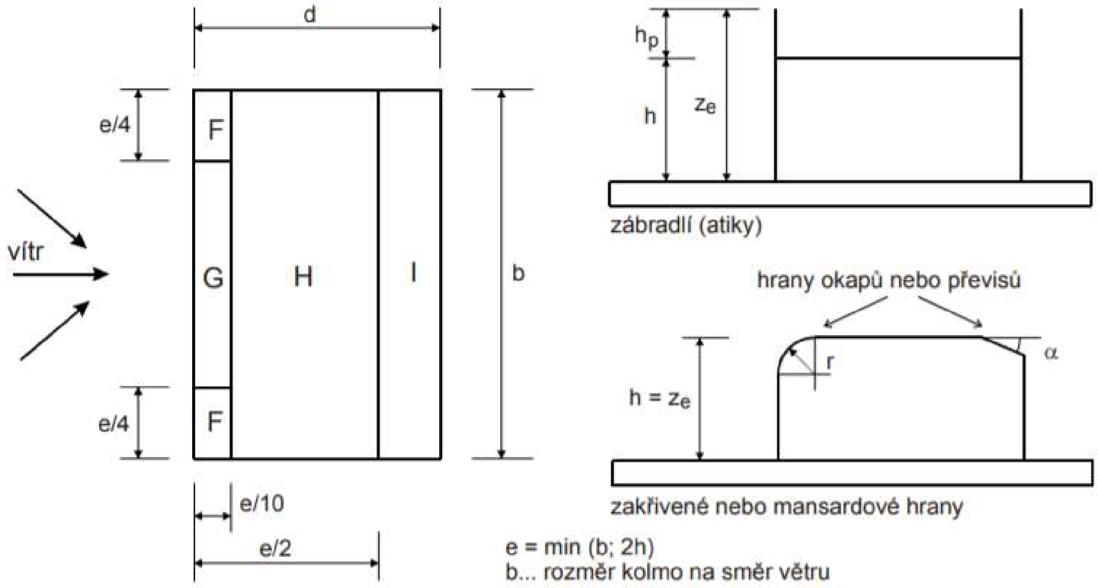


Zatížení větrem budeme uvažovat jako rovnoměrné plošné spojité zatížení, které se dále bude roznášet na jednotlivé pruty. Výjimku tvoří otvory pro schodiště a výtahové šachty. Zde vzhledem k odstínění od přímých účinků zatížení větrem by se mělo uvažovat se zatížením vyvolaným reakcí od konstrukce ramene a zastřešení schodiště a účinky od tělesa výtahové šachty. Zjednodušeně budu uvažovat účinky větru jako charakteristický tlak větru, působící na horní a dolní pás.

Hodnotu spojitého zatížení vypočítáme podle vztahu:
$w_e = q_p(z)\, c_{pe,10}\, h$ = 0,665 · 0,8 · 0,3 = 0,16 kNm^{-1}

Dále u vodorovné zábrany proti nebezpečí dotyku bude počítáno s náhradním břemenem. Plocha jedné zábrany je A = 6,15 m^2. Součinitele vnějších tlaků budou uvažovány, jako kdyby šlo o plochou střechu.
Na návětrné straně se uvažuje se součinitelem vnějších tlaků $C_{pe,10}$ = 1,2. Platí pro oblast G (obrázek 9).
$F = A\, c_{pe,10}\, q_p(z)$ = 6,15 · 1,2 · 0,665 = 4,91 kN
Na závětrné straně se uvažuje se součinitelem vnějších tlaků $C_{pe,10}$= -0,2. Platí pro oblast G (obrázek 9).

F=$A\ c_{pe,10}\ q_p(z)$ = 6,15 · (-0,2) · 0,655 = -0,82 kN
Výpočet pro oblast G je přibližný, protože by se měl brát v úvahu vliv příhradových pásů.



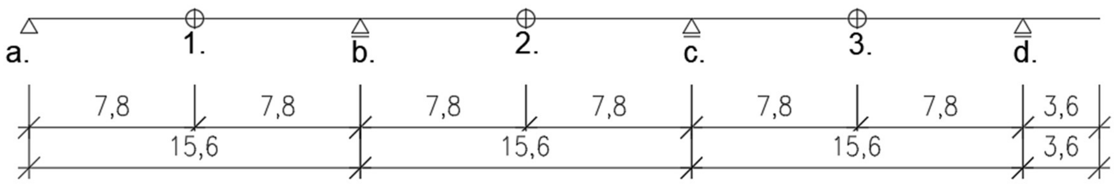
Obr. 9 Rozdělení oblastí pro ploché střechy [8]

3.4. Zatížení chodci – LM4

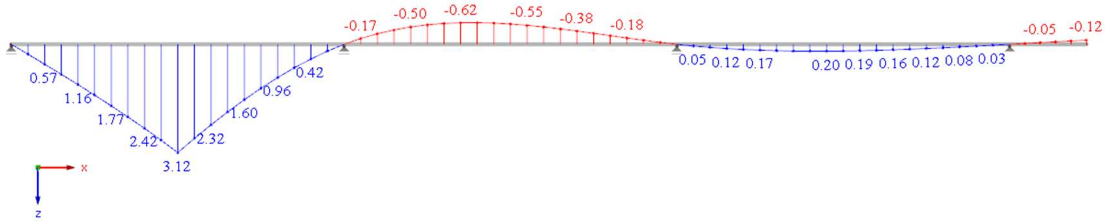
Bude uvažováno jako spojité zatížení podle normy [9] – LM4, které má intenzitu 5 kNm^{-2}.

V rámci lávky bude umístěno v podélném směru podle tvaru příčinkových čar. Tak bude vyvozen maximální ohybový moment nad jednotlivými určenými body (obrázky 10, 11, 12, 13, 14, 15). Statické řešení bude kvůli vykreslení a výpočtu příčinkových čar zjednodušeno na spojitý nosník o třech polích a jednom převislém konci.

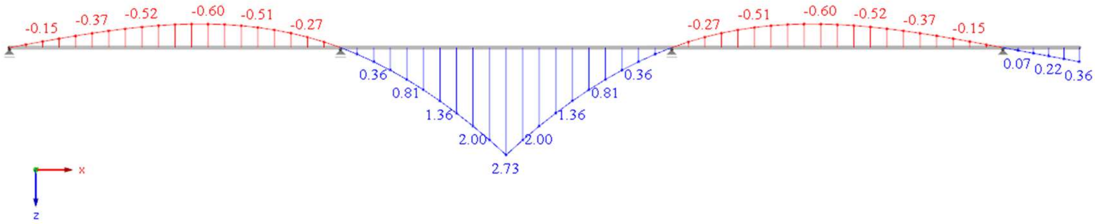
V příčném směru bude uvažováno zatížení chodci v šířce 2,5 m, tj. šířka průchozího profilu.



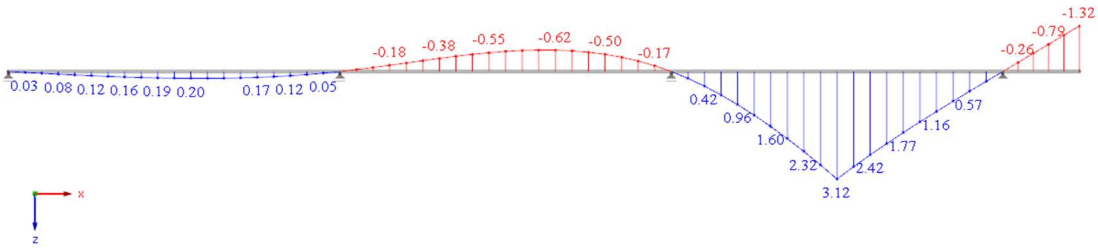
Obr. 10 Umístění vyšetřovaných bodů na spojitém nosníku



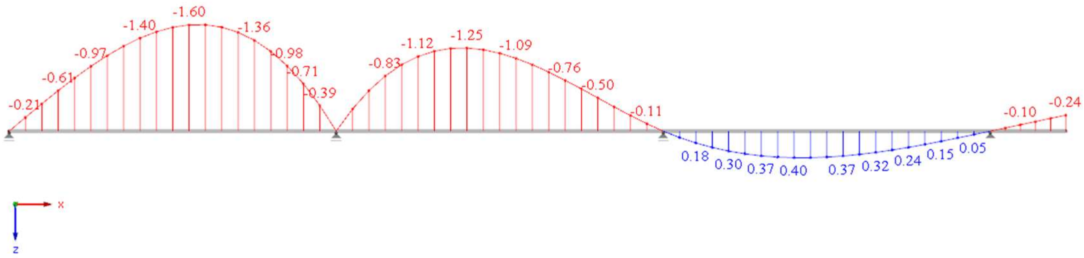
Obr. 11 Příčinková čárá vygenerovaná v RFEMu pro maximální moment v bodě 1



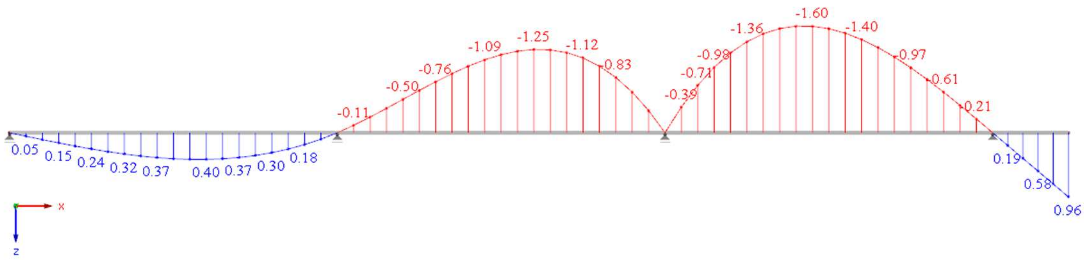
Obr. 12 Příčinková čárá vygenerovaná v RFEMu pro maximální moment v bodě 2



Obr. 13 Příčinková čárá vygenerovaná v RFEMu pro maximální moment v bodě 3



Obr. 14 Příčinková čárá vygenerovaná v RFEMu pro maximální moment v podpoře b



Obr. 15 Příčinková čárá vygenerovaná v RFEMu pro maximální moment v podpoře c

4. Ověření ručním výpočtem

Pro prokázání správnosti výstupů z modelu v RFEM bude spočítán ruční výpočet. Na výpočet použijeme statické tabulky a příslušné vzorce [10].

V rámci zjednodušení se nebude počítat s momentem setrvačnosti závislém na vzdálenosti x – $I(x)$, ale jen s konstantním momentem setrvačnosti – I. Takový výpočet by byl matematicky velmi složitý, mohla by vzniknout situace, kde je proměnná jak v čitateli, tak ve jmenovateli.

$$\delta = \int_0^l \frac{M(x)\overline{M}(x)}{EI(x)} dx$$

Toto zjednodušení by nemělo mít velký vliv na výsledek.

Nejdříve je potřeba si stanovit náhradní ohybovou tuhost EI. Jelikož je součástí lávky i spřažená betonová deska, není snadné určit moment setrvačnosti od diagonál vzhledem k jejich výškovému průběhu. Dále by bylo potřeba vzít v úvahu přerušení příhradového pásu z důvodu učinění místa pro výtah a schodiště, spojující mostovku lávky a nástupiště, popřípadě výpravní budovu. Náhradní ohybová tuhost bude stanovena ze vzorce pro průhyb. Pro tento účel bude lávka uvažována jako prostý nosník, na který působí spojité zatížení. Hodnota průhybu bude vypočítána pomocí programu RFEM.

Vzorec průhybu:

$$w = \frac{5}{384}\frac{ql^4}{EI}$$

Z tohoto vzorce si vyjádříme EI:

$$EI = \frac{5}{384}\frac{ql^4}{w}$$

Kde jedinou neznámou zůstává spojité zatížení q, to si ale můžeme spočítat. Více v kapitole – 3.1 Vlastní tíha.

$g = 16{,}54\ \mathrm{kNm^{-1}}$

Hodnotu průhybu odečteme z RFEM (obrázek 203):

$w = 254{,}5\ \mathrm{mm}$

$$(EI) = \frac{5}{384}\cdot\frac{16{,}54\cdot 10^3\cdot 50{,}4^4}{254{,}5\cdot 10^{-3}} = 546{,}20\cdot 10^7\ \mathrm{Pa\cdot m^4} = 546{,}20\cdot 10^4\ \mathrm{kPa\cdot m^4}$$

Pro lepší kontrolu v RFEMu budeme uvažovat ohybovou tuhost, u které je Youngův modul pružnosti větší než u námi navržené konstrukce. Budeme uvažovat, že průřez je obdélníkový. Průřez má rozměry 0,1 · 0,2 m.

Moment setrvačnosti k ose y je tedy:

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

Kde je:

$b = 0{,}1\ \mathrm{m}$

$h = 0{,}2\ \mathrm{m}$

$$I = \frac{1}{12}\cdot 0{,}1\cdot 0{,}2^3 = 6{,}666\cdot 10^{-5}\ \mathrm{m^4}$$

Youngův modul pružnosti budeme uvažovat tak, aby byla výsledná tuhost rovna (EI).

$(EI)=E\frac{1}{12}bh^3$

$$E=\frac{(EI)}{\frac{1}{12}bh^3}=\frac{546{,}20\cdot10^7}{\frac{1}{12}\cdot0{,}1\cdot0{,}2^3}=8{,}19\cdot10^{13}\text{ Pa}=8{,}19\cdot10^7\text{ MPa}$$

Použijeme metodu jednotkových sil

$$\delta=\int_0^l\frac{N(x)\bar{N}(x)}{EA}\,dx+\int_0^l\frac{V(x)\bar{V}(x)}{GA}\,dx+\int_0^l\frac{M(x)\bar{M}(x)}{EI}\,dx+\int_0^l\bar{N}(x)\alpha_t\Delta t\,dx+$$
$$+\int_0^l\bar{M}(x)\alpha_t\frac{\Delta t_i}{h}\,dx-\sum\bar{R}\delta_r$$

Jelikož je nosník namáhaný převážně na ohyb, tak můžeme zanedbat virtuální práce od posouvajících a normálových sil.
Budeme tedy počítat se vzorcem:

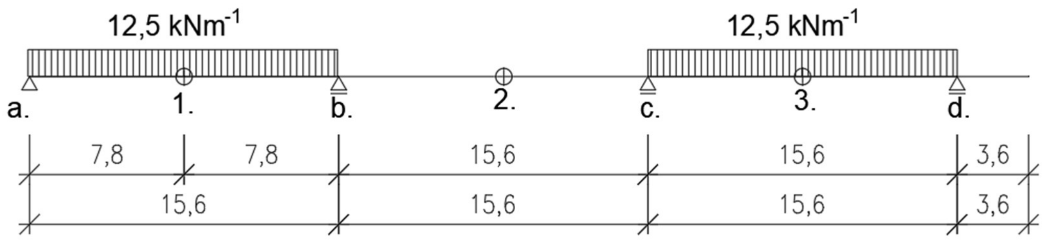
$$\delta=\int_0^l\frac{M(x)\bar{M}(x)}{EI}dx$$

Na výpočet použijeme Vereščaginovo pravidlo.

4.1. Posunutí v bodě 1 od zatížení chodci

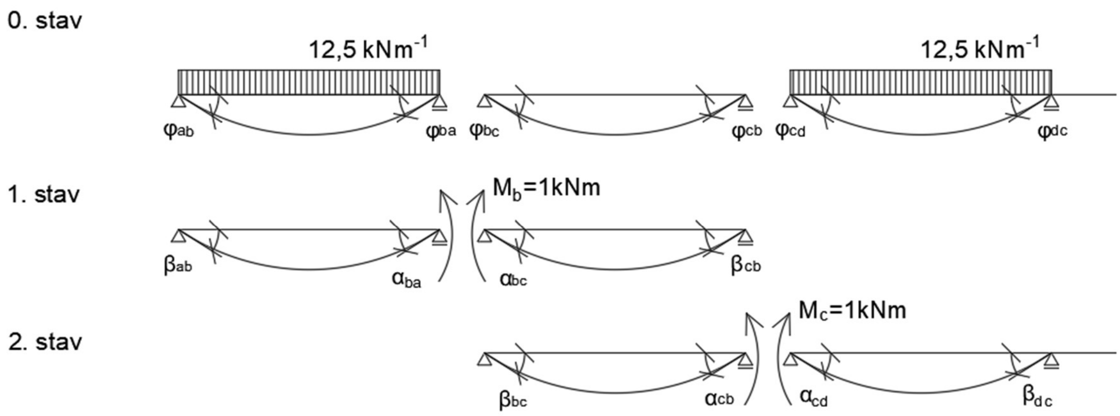
Pomocí metody jednotkových sil vypočítáme příslušnou hodnotu maximálního posunutí v bodě 1. Na to budeme potřebovat dva zatěžovací stavy. Od zatížení chodci umístěného tak, aby vyvozovalo maximální moment v bodě 1 (obrázek 11, 16). A od jednotkové síly v bodě 1 (obrázek 19). Na výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení a od zatížení chodci použijeme soustavu třímomentových rovnic.

4.1.1. Zatížení chodci



Obr. 16 Umístění zatížení tak, aby byl vyvozen největší moment v bodě 1.

Zatížení si přepočítáme z plošného zatížení na liniové zatížení:
$q = q_{plošné}\, b_{průch} = 5 \cdot 2{,}5 = 12{,}5$ kNm^{-1}
Dále uvažujeme konstantní ohybovou tuhost po celé délce:
EI=konst.



Obr. 17 Základní soustava pro max. M_1, nultý stav je od spojitého zatížení

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 17). Jelikož je M_a = 0 kNm a M_d = 0 kNm, tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S nultým stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba} M_a + M_b (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc} M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb} M_b + M_c (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd} M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3} \cdot 15{,}6 = 5{,}2$

$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6} \cdot 15{,}6 = 2{,}6$

$\varphi_{ba} = \varphi_{cd} = \frac{1}{24}\frac{q}{EI} l^3 = \frac{1}{24} \cdot 12{,}5 \cdot 15{,}6^3 = 1977{,}3$

$\varphi_{bc} = \varphi_{cb} = 0$

$M_a = 0$ kNm

$M_d = 0$ kNm

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 \cdot 5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 1977{,}3 + 0 \qquad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0 + 0 + 1977{,}3 \qquad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0 - 27{,}04 \cdot M_b - 6{,}76 \cdot M_c - 5140{,}98$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b + 108{,}16 \cdot M_c + 20563{,}92}$

$0 = 0 + 101{,}4 \cdot M_c + 15422{,}94$

$M_c = \frac{-15422{,}94}{101{,}4} = -152{,}1$ kNm

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot (-152{,}1) + 1977{,}3 + 0$

$M_b = \frac{-1581{,}84}{10{,}4} = -152{,}1$ kNm

R_a: $\Sigma M_b=0$

$$R_a l-\frac{1}{2}ql^2+M_b=0$$

$$R_a=\frac{\frac{1}{2}ql^2-M_b}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2-152{,}1}{15{,}6}=87{,}75\text{ kN}$$

R_b^L: $\Sigma M_a=0$

$$R_b^L l-\frac{1}{2}ql^2-M_b=0$$

$$R_b^L=\frac{\frac{1}{2}ql^2+M_b}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2+152{,}1}{15{,}6}=107{,}25\text{ kN}$$

R_b^P: $\Sigma M_c=0$

$$R_b^P l-M_b+M_c=0$$

$$R_b^P=\frac{M_b-M_c}{l}=\frac{152{,}1-152{,}1}{15{,}6}=0\text{ kN}$$

R_c^L: $\Sigma M_b=0$

$$R_c^L l+M_b-M_c=0$$

$$R_c^L=\frac{-M_b+M_c}{l}=\frac{-152{,}1+152{,}1}{15{,}6}=0\text{ kN}$$

R_c^P: $\Sigma M_d=0$

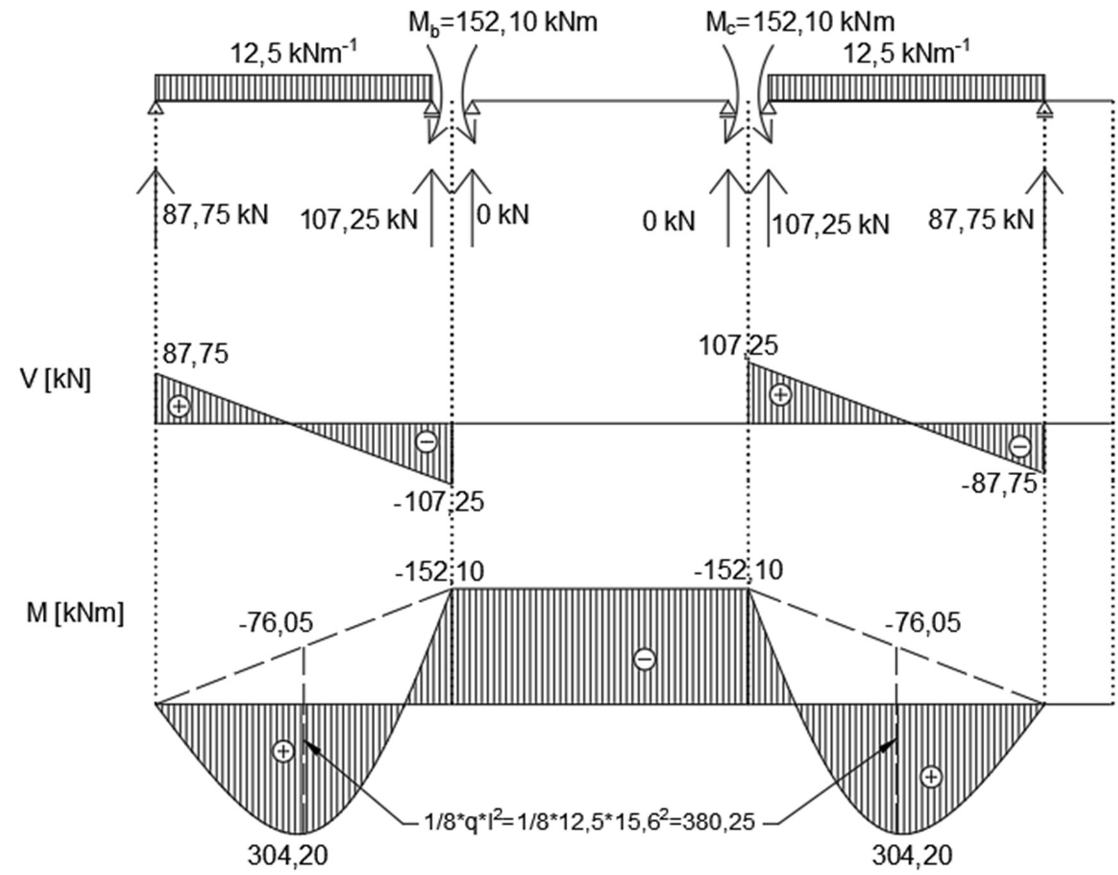
$$R_c^P l-\frac{1}{2}ql^2-M_c=0$$

$$R_c^P=\frac{\frac{1}{2}ql^2+M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2+152{,}1}{15{,}6}=107{,}25\text{ kN}$$

R_d: $\Sigma M_c=0$

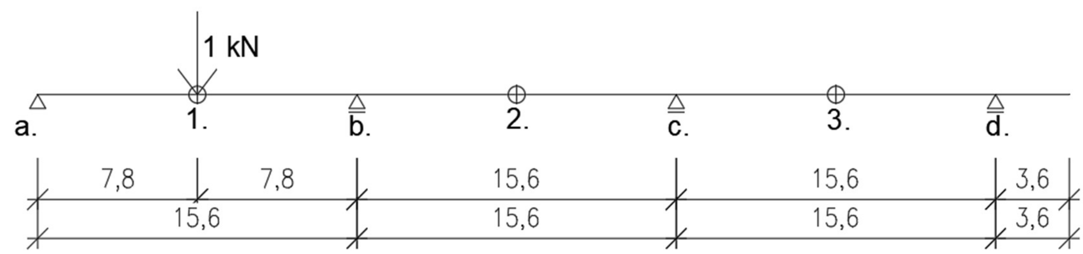
$$R_d l-\frac{1}{2}ql^2+M_c=0$$

$$R_d=\frac{\frac{1}{2}ql^2-M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2-152{,}1}{15{,}6}=87{,}75\text{ kN}$$

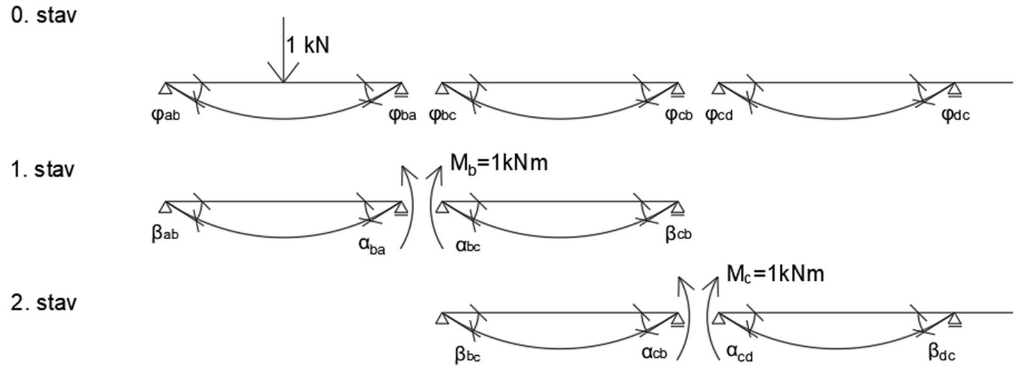


Obr. 18 Průběhy vnitřních sil od spojitého zatížení, které vyvozuje maximální moment v bodě 1

4.1.2. Od jednotkové síly



Obr. 19 Umístění jednotkové síly tak, aby byl vyvozen největší moment v bodě 1.



Obr. 20 Základní soustava pro max. M_1, nultý stav je od jednotkové síly

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 20). Jelikož je M_a = 0 kNm a M_d = 0 kNm, tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S nultým stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba}\, M_a + M_b\, (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc}\, M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb}\, M_b + M_c\, (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd}\, M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3}\cdot 15{,}6 = 5{,}2$$

$$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\ \frac{l}{EI} = \frac{1}{6}\cdot 15{,}6 = 2{,}6$$

$$\varphi_{ba} = \frac{1}{16}\frac{F}{EI}l^2 = \frac{1}{16}\cdot 1\cdot 15{,}6^2 = 15{,}21$$

$\varphi_{bc}=\varphi_{cb}=\varphi_{cd}=0$

M_a=0 kNm

M_d=0 kNm

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 15{,}21 + 0 \qquad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2+5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0 + 0 + 0 \qquad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0-27{,}04 \cdot M_b-6{,}76 \cdot M_c-39{,}55$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b+108{,}16 \cdot M_c+0}$

$0 = 0+101{,}4 \cdot M_c-39{,}55$

$$M_c = \frac{+39{,}55}{101{,}4} = +0{,}39 \text{ kNm}$$

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) +2{,}6 \cdot (+0{,}39) + 15{,}21 + 0$

$$M_b = \frac{-16{,}22}{10{,}4} = -1{,}56 \text{ kNm}$$

R_a: $\Sigma M_b=0$

$$R_a l - F\frac{1}{2}l + M_b = 0$$

$$R_a = \frac{F\frac{1}{2}l - M_b}{l} = \frac{1\cdot\frac{1}{2}\cdot 15{,}6 - 1{,}56}{15{,}6} = 0{,}4\text{ kN}$$

R_b^L: $\Sigma M_a=0$

$$R_b^L l - F\frac{1}{2}l - M_b = 0$$

$$R_b^L = \frac{F\frac{1}{2}l + M_b}{l} = \frac{1\cdot\frac{1}{2}\cdot 15{,}6 + 1{,}56}{15{,}6} = 0{,}6\text{ kN}$$

R_b^P: $\Sigma M_c=0$

$$R_b^P l - M_b - M_c = 0$$

$$R_b^P = \frac{M_b + M_c}{l} = \frac{1{,}56 + 0{,}39}{15{,}6} = 0{,}125\text{ kN}$$

R_c^L: $\Sigma M_b=0$

$$R_c^L l + M_b + M_c = 0$$

$$R_c^L = \frac{-M_b - M_c}{l} = \frac{-1{,}56 - 0{,}39}{15{,}6} = -0{,}125\text{ kN}$$

R_c^P: $\Sigma M_d=0$

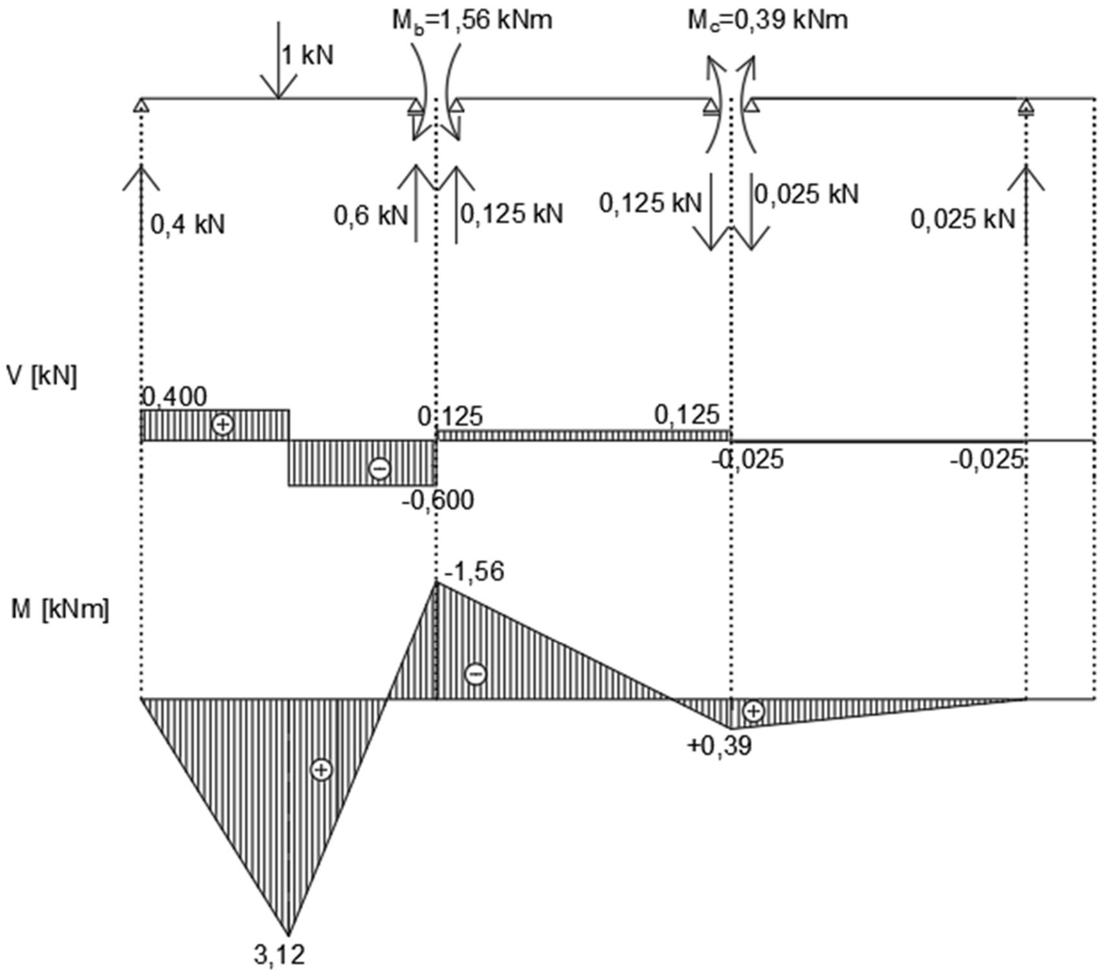
$$R_c^P l + M_c = 0$$

$$R_c^P = \frac{-M_c}{l} = \frac{-0{,}39}{15{,}6} = -0{,}025\text{kN}$$

R_d: $\Sigma M_c=0$

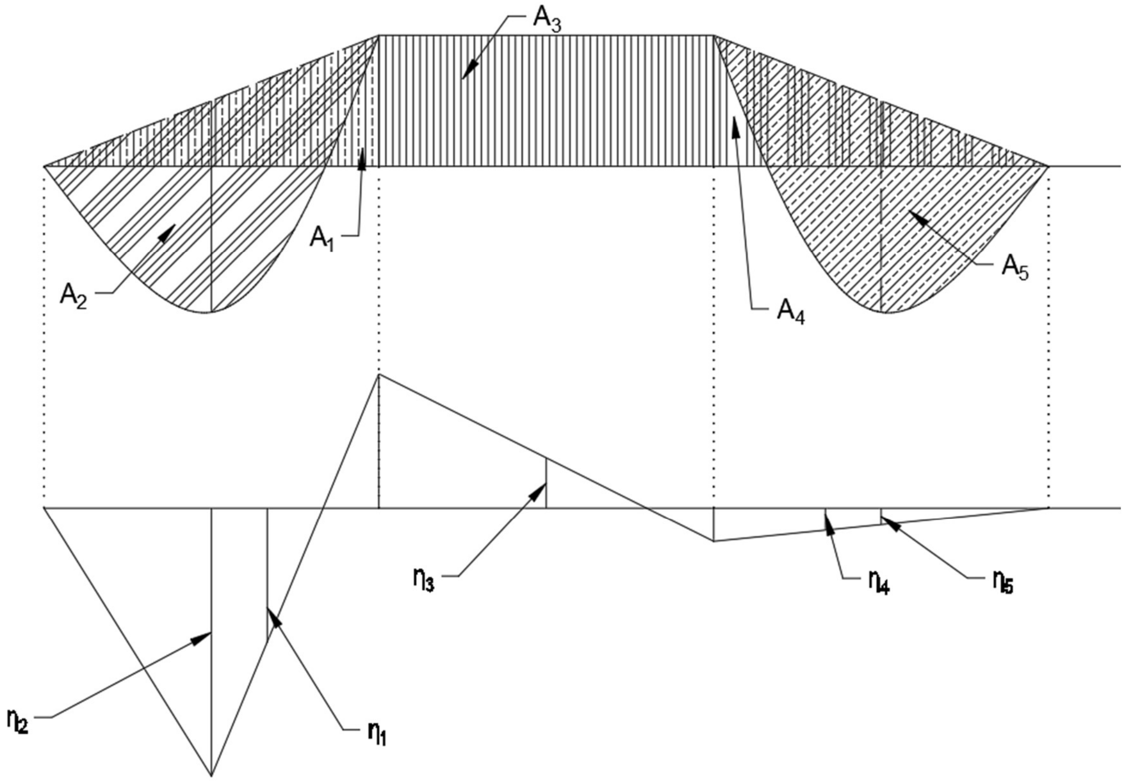
$$R_d l - M_c = 0$$

$$R_d = \frac{M_c}{l} = \frac{0{,}39}{15{,}6} = 0{,}025\text{kN}$$



Obr. 21 Průběhy vnitřních sil od jednotkové síly, která vyvozuje maximální moment v bodě 1.

4.1.3. Vlastní výpočet posunutí



Obr. 22 Rozdělení obsahu momentového obrazce a jejich pořadnice potřebného pro stanovení maximálního posunu v bodě 1

Výpočet posunutí metodou jednotkových sil bude proveden integrací součinu momentů od zatížení chodci (obrázek 18) a momentů od jednotkových sil (obrázek 21). Z ohybových momentů od zatížení chodci si vezmeme plochu a momentů od jednotkové síly příslušné pořadnice (obrázek 22).

$$\delta=\int_0^l \frac{M(x)\bar{M}(x)}{EI}dx=\frac{1}{EI}\left[A_1\ \eta_1+A_2\ \eta_2+A_3\ \eta_3+A_4\ \eta_4+A_5\ \eta_5\right]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot\left[\frac{1}{2}\cdot(-152{,}10)\cdot 15{,}6\cdot(-1{,}56+\frac{1{,}56+3{,}12}{7{,}8}\cdot 5{,}2)+\frac{2}{3}\cdot 380{,}25\cdot 15{,}6\cdot 3{,}12+\right.$$

$$\left.+(-152{,}10)\cdot 15{,}6\cdot\frac{-1{,}56+0{,}39}{2}+\frac{1}{2}\cdot(-152{,}10)\cdot 15{,}6\cdot\frac{2}{3}\cdot 0{,}39+\frac{2}{3}\cdot 380{,}25\cdot 15{,}6\cdot\frac{1}{2}\cdot 0{,}39\right]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot[-1850{,}75+12338{,}35+1388{,}06-308{,}46+771{,}15]$$

$$=\frac{1}{546{,}20\cdot 10^4}\cdot[12338{,}35]=2{,}26\cdot 10^{-3}\ \text{m}$$

Odečtená hodnota posunutí z modelu v RFEMu nacházející se uprostřed pole č. 1 činí $2{,}11\cdot 10^{-3}$ m pro jeden pás a $2{,}09\cdot 10^{-3}$ m pro druhý pás (obrázek 204).

Číselný rozdíl pro větší hodnotu z RFEMU činí:

$2{,}09\cdot 10^{-3}-2{,}26\cdot 10^{-3}=-0{,}17\cdot 10^{-3}$ m

V procentech je to:

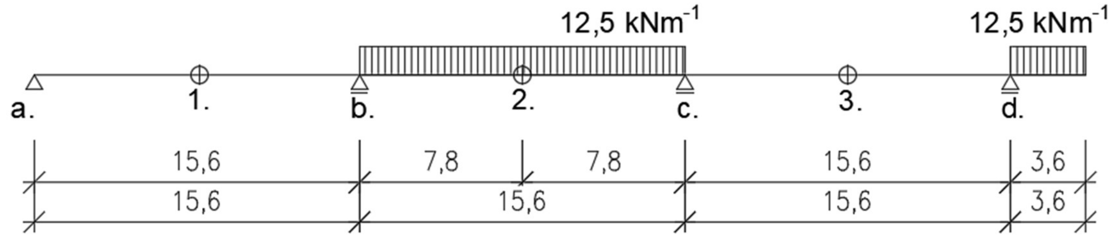
$$\frac{2{,}09\cdot 10^{-3}\cdot 100}{2{,}26\cdot 10^{-3}}=92{,}48\ \%$$

Poměr vyjádřený v procentech mezi posunutím z ručního výpočtu a posunutím z modelu v RFEM je 92,48 %

4.2. Posunutí v bodě 2 od zatížení chodci

Pomocí metody jednotkových sil vypočítáme příslušnou hodnotu maximálního posunutí v bodě 2. Na to budeme potřebovat dva zatěžovací stavy. Od zatížení chodci umístěného tak, aby vyvozovalo maximální moment v bodě 2 (obrázek 12, 23). A od jednotkové síly v bodě 2 (obrázek 28). Na výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení a od zatížení chodci použijeme soustavu třímomentových rovnic.

4.2.1. Zatížení chodci



Obr. 23 Umístění zatížení tak, aby byl vyvozen největší moment v bodě 2.

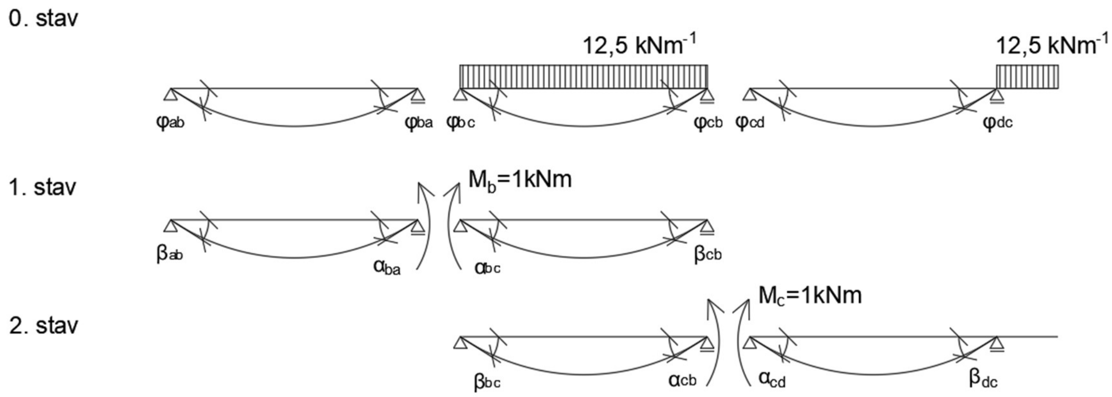
Zatížení si přepočítáme z plošného zatížení na liniové zatížení:

$q = q_{plošné}\, b_{průch} = 5 \cdot 2{,}5 = 12{,}5\ \text{kNm}^{-1}$

Dále uvažujeme konstantní ohybovou tuhost po celé délce spojitého nosníku:

EI=konst.

Nemusíme tedy počítat s *EI*.



Obr. 24 Základní soustava pro max. M_2, nultý stav je od spojitého zatížení

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 24). Jelikož je $M_a = 0$ kNm a $M_d = -81$ kNm (moment od zatížení na převislém konci), tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S nultým stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba} M_a + M_b (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc} M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb} M_b + M_c (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd} M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3} \cdot 15,6 = 5,2$$

$$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6} \cdot 15,6 = 2,6$$

$$\varphi_{bc} = \varphi_{cb} = \frac{1}{24}\frac{q}{EI} l^3 = \frac{1}{24} \cdot 12,5 \cdot 15,6^3 = 1977,30$$

$$\varphi_{ba} = \varphi_{cd} = 0$$

$$M_a = 0 \text{ kNm}$$

$$M_d = -\frac{1}{2} q l^2 = -\frac{1}{2} \cdot 12,5 \cdot 3,6^2 = -81 \text{ kNm}$$

$0 = 2,6 \cdot 0 + M_b \cdot (5,2 + 5,2) + 2,6 \cdot M_c + 0 + 1977,30 \qquad \cdot (-2,6)$

$\underline{0 = 2,6 \cdot M_b + M_c \cdot (5,2 + 5,2) + 2,6 \cdot (-81) + 1977,30 + 0 \qquad \cdot (10,4)}$

$0 = 0 - 27,04 \cdot M_b - 6,76 \cdot M_c - 5140,98$

$\underline{0 = 27,04 \cdot M_b + 108,16 \cdot M_c + 18373,68}$

$0 = 0 + 101,4 \cdot M_c + 13232,70$

$$M_c = \frac{-13232,70}{101,4} = -130,50 \text{ kNm}$$

M_b:

$0 = 2,6 \cdot 0 + M_b \cdot (5,2 + 5,2) + 2,6 \cdot (-130,50) + 1977,3 + 0$

$$M_b = \frac{-1638,0}{10,4} = -157,50 \text{ kNm}$$

R_a: $\Sigma M_b = 0$

$R_a l + M_b = 0$

$$R_a = \frac{M_b}{l} = \frac{-157,50}{15,6} = -10,10 \text{ kN}$$

R_b^L: $\Sigma M_a = 0$

$R_b^L l - M_b = 0$

$$R_b^L = \frac{-M_b}{l} = \frac{+157,50}{15,6} = 10,10 \text{ kN}$$

R_b^P: $\Sigma M_c = 0$

$$R_b^P l - \frac{1}{2} q l^2 - M_b + M_c = 0$$

$$R_b^P = \frac{\frac{1}{2} q l^2 + M_b - M_c}{l} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 12,5 \cdot 15,6^2 + 157,50 - 130,50}{15,6} = 99,23 \text{ kN}$$

R_c^L: $\Sigma M_b=0$

$$R_c^L l-\frac{1}{2}ql^2+M_b-M_c=0$$

$$R_c^L=\frac{\frac{1}{2}ql^2-M_b+M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2-157{,}50+130{,}50}{15{,}6}=95{,}77\ \text{kN}$$

R_c^P: $\Sigma M_d=0$

$$R_c^P l-M_c+M_d=0$$

$$R_c^P=\frac{M_c-M_d}{l}=\frac{130{,}50-81}{15{,}6}=3{,}17\ \text{kN}$$

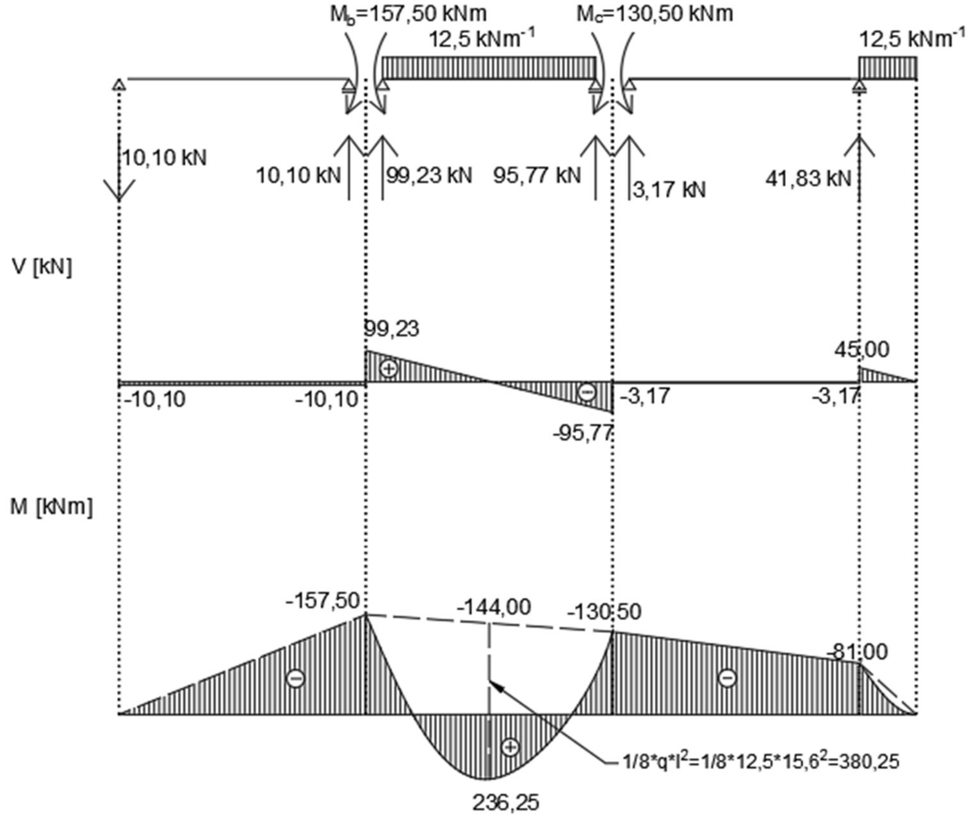
R_d: $\Sigma M_c=0$

$$R_d l+M_c-ql_1\left(l+\frac{1}{2}l_1\right)=0$$

$$R_d=\frac{-M_c+ql_1\left(l+\frac{1}{2}l_1\right)}{l}=\frac{-130{,}50+12{,}5\cdot 3{,}6\cdot\left(15{,}6+\frac{1}{2}\cdot 3{,}6\right)}{15{,}6}=41{,}83\ \text{kN}$$

l je délka pole

l_1 je délka převislého konce



Obr. 25 Průběhy vnitřních sil od spojitého zatížení, které vyvozuje maximální moment v bodě 2

4.2.2. Ověření vnitřních sil od zatížení chodci pomocí deformační metody

K ověření výsledků vnitřních sil použijeme ještě deformační metodu. Budeme k výpočtu potřebovat tabulky pro stanovení matic tuhosti a zatěžovacích vektorů [10]. Výpočtový model (obrázek 26) budeme uvažovat, že prut a-b je levostranně kloubově připojený, prut b–c je oboustranně monoliticky připojen a prut c-d je pravostranně kloubově připojen.

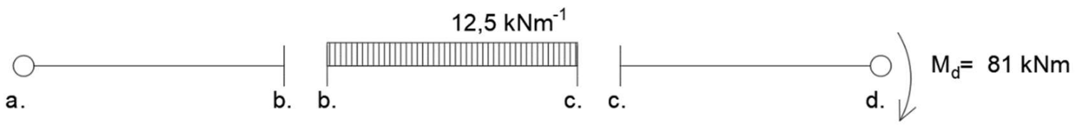
Jelikož je nosník zatěžován pouze příčným zatížením, tak nedojde v podporách b, c, d k vodorovnému posunu. Jediné neznámé tedy budou pootočení φ_b a φ_c.

Stupeň přetvárné neurčitosti je tedy: n_p = 2.

Souřadnicový systém prutu je shodný s globálním, není třeba geometrická transformace. Totéž platí u primárních vektorů koncových sil.

Pomlčka u matic tuhosti znamená, že dané sloupce nejsou důležité k výpočtu.

$M_d = \frac{1}{2} q l^2 = \frac{1}{2} \cdot 12{,}5 \cdot 3{,}6^2 = 81 \text{ kNm}$



Obr. 26 výpočtový model pro deformační metodu – zatížení od pěší dopravy

$$[K_{a,b}] = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & -67{,}33 \\ - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & 67{,}333 \\ - & - & - & - & - & 1050{,}38 \end{bmatrix} \cdot 10^6$$

$$[K_{b,c}] = \begin{bmatrix} - & - & 0 & - & - & 0 \\ - & - & -134{,}66 & - & - & -134{,}66 \\ - & - & 1400{,}51 & - & - & 700{,}26 \\ - & - & 0 & - & - & 0 \\ - & - & 134{,}66 & - & - & 134{,}66 \\ - & - & 700{,}26 & - & - & 1400{,}51 \end{bmatrix} \cdot 10^6$$

$$[K_{c,d}] = \begin{bmatrix} - & - & 0 & - & - & - \\ - & - & -67{,}33 & - & - & - \\ - & - & 1050{,}38 & - & - & - \\ - & - & 0 & - & - & - \\ - & - & 67{,}33 & - & - & - \\ - & - & 0 & - & - & - \end{bmatrix} \cdot 10^6$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 1050{,}38+1400{,}51 & 700{,}26 \\ 700{,}26 & 1400{,}51+1050{,}38 \end{bmatrix} \cdot 10^6 = \begin{bmatrix} 2450{,}89 & 700{,}26 \\ 700{,}26 & 2450{,}89 \end{bmatrix} \cdot 10^6$$

$$\{\overline{R}_{a,b}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot 10^3$$

$$\{\overline{R}_{b,c}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ -97,5 \\ 253,5 \\ 0 \\ -97,5 \\ -253.5 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{\overline{R}_{c,d}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 7,79 \\ -40,5 \\ 0 \\ -7,79 \\ -81 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{\overline{R}\}=\begin{Bmatrix} 0+253,5 \\ -253,5-40,5 \end{Bmatrix}\cdot 10^3=\begin{Bmatrix} 253,5 \\ -294,0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{F\}=\{S\}-\{\overline{R}\}$$
$$\{F\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3-\begin{Bmatrix} 253,5 \\ -294,0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3=\begin{Bmatrix} -253,5 \\ 294,0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$[K]\,\{r\}=\{F\}$$
$$\begin{bmatrix} 2450,89 & 700,26 \\ 700,26 & 2450,89 \end{bmatrix}\cdot 10^6\ \begin{Bmatrix} \varphi_b \\ \varphi_c \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} -253,5 \\ 294,0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$\varphi_b = -0,150 \cdot 10^{-3}$ rad
$\varphi_c = 0,163 \cdot 10^{-3}$ rad

$$\{R\}=\{\overline{R}\}+\{\widehat{R}\}=\{\overline{R}\}+[K]\,\{r\}$$

$$\{r_{a,b}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,150 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}$$

$$\{R_{a,b}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}+\begin{bmatrix} - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & -67,33 \\ - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & 67,333 \\ - & - & - & - & - & 1050,38 \end{bmatrix}\cdot 10^6\cdot\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,150 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}=$$

$$=\begin{Bmatrix} 0 \\ -10,10 \\ 0 \\ 0 \\ -10,10 \\ -157,50 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{r_{b,c}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0{,}150 \\ 0 \\ 0 \\ 0{,}163 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}$$

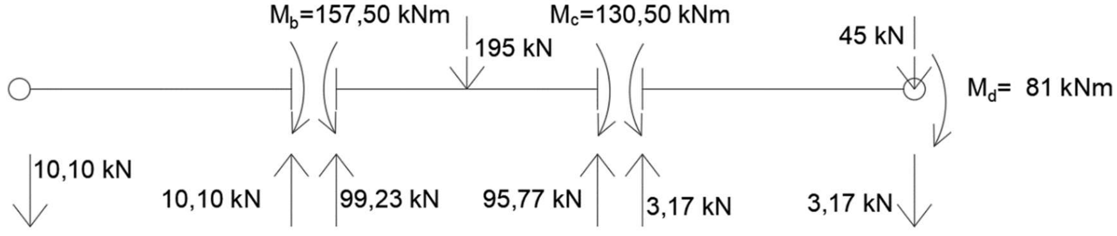
$$\{R_{b,c}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ -97{,}5 \\ 253{,}5 \\ 0 \\ -97{,}5 \\ -253.5 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}+\begin{bmatrix} - & - & 0 & - & - & 0 \\ - & - & -134{,}66 & - & - & -134{,}66 \\ - & - & 1400{,}51 & - & - & 700{,}26 \\ - & - & 0 & - & - & 0 \\ - & - & 134{,}66 & - & - & 134{,}66 \\ - & - & 700{,}26 & - & - & 1400{,}51 \end{bmatrix}\cdot 10^{6}\cdot\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0{,}150 \\ 0 \\ 0 \\ 0{,}163 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}=$$

$$=\begin{Bmatrix} 0 \\ -99{,}23 \\ 157{,}5 \\ 0 \\ -95{,}77 \\ -130{,}5 \end{Bmatrix}\cdot 10^{3}$$

$$\{r_{c,d}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0{,}163 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}$$

$$\{R_{c,d}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 7{,}79 \\ -40{,}5 \\ 0 \\ -7{,}79 \\ -81 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}+\begin{bmatrix} - & - & 0 & - & - & - \\ - & - & -67{,}33 & - & - & - \\ - & - & 1050{,}38 & - & - & - \\ - & - & 0 & - & - & - \\ - & - & 67{,}33 & - & - & - \\ - & - & 0 & - & - & - \end{bmatrix}\cdot 10^{6}\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0{,}163 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}=$$

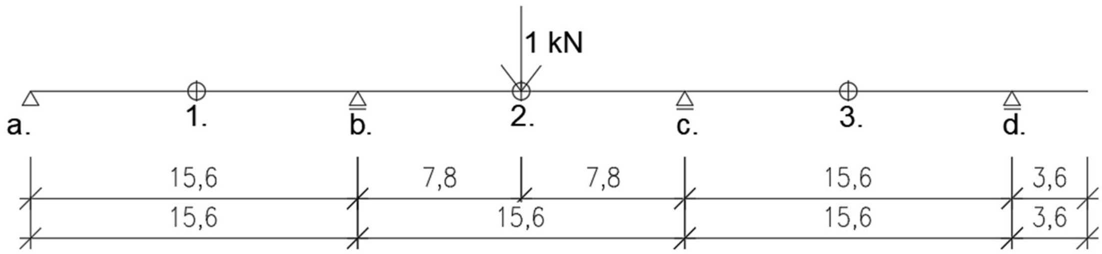
$$=\begin{Bmatrix} 0 \\ -3{,}17 \\ 130{,}5 \\ 0 \\ 3{,}17 \\ -81 \end{Bmatrix}\cdot 10^{3}$$



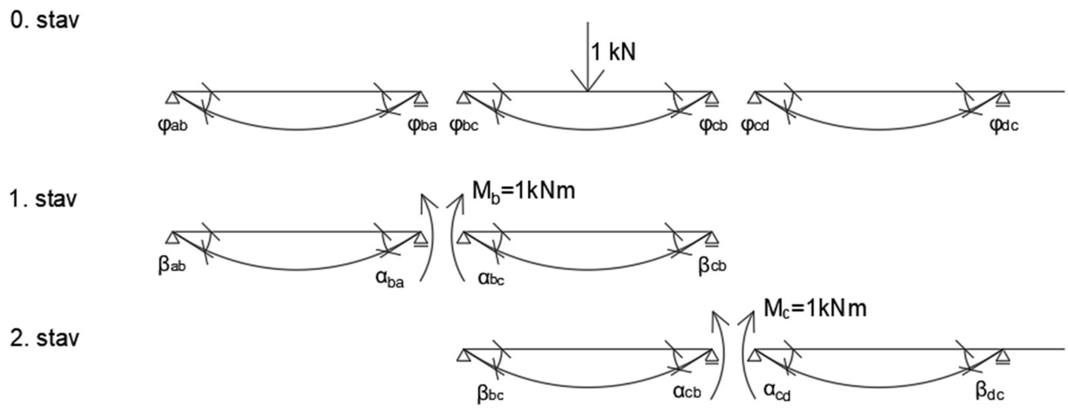
Obr. 27 Koncové síly na spojitém nosníku

Z vypočtených hodnot koncových sil (obrázek 27) vyplývá, že vnitřní síly jsou totožné jako u výpočtu pomocí třímomentových rovnic (obrázek 25).

4.2.3. Od jednotkové síly



Obr. 28 Umístění jednotkové síly tak aby byl vyvozen největší moment v bodě 2.



Obr. 29 Základní soustava pro max. M_2, nultý stav je od jednotkové síly

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 29). Jelikož je M_a = 0 kNm a M_d = 0 kNm, tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S nultým stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba} M_a + M_b (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc} M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb} M_b + M_c (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd} M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3}\cdot 15{,}6 = 5{,}2$$

$$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6}\cdot 15{,}6 = 2{,}6$$

$$\varphi_{bc} = \varphi_{cb} = \frac{1}{16}\frac{F}{EI}l^3 = \frac{1}{16}\cdot 1\cdot 15{,}6^2 = 15{,}21$$

$\varphi_{ba} = \varphi_{cd} = 0$

$M_a = 0$ kNm

$M_d = 0$ kNm

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2+5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 0 + 15{,}21 \qquad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2+5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0 + 15{,}21 + 0 \qquad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0 - 27{,}04 \cdot M_b - 6{,}76 \cdot M_c - 39{,}55$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b + 108{,}16 \cdot M_c + 158{,}18}$

$0 = 0 + 101{,}4 \cdot M_c + 118{,}63$

$$M_c = \frac{-118{,}63}{101{,}4} = -1{,}17 \text{ kNm}$$

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2+5{,}2) + 2{,}6 \cdot (-1{,}17) + 0 + 15{,}21$

$$M_b = \frac{-12{,}17}{10{,}4} = -1{,}17 \text{ kNm}$$

R_a: $\Sigma M_b = 0$

$R_a l - M_b = 0$

$$R_a = \frac{M_b}{l} = \frac{1{,}17}{15{,}6} = 0{,}075 \text{ kN}$$

R_b^L: $\Sigma M_a = 0$

$R_b^L l + M_b = 0$

$$R_b^L = \frac{-M_b}{l} = \frac{-1{,}17}{15{,}6} = -0{,}075 \text{ kN}$$

R_b^P: $\Sigma M_c = 0$

$R_b^P l - M_b + M_c - F\frac{1}{2}l = 0$

$$R_b^P = \frac{+M_b - M_c + F\frac{1}{2}l}{l} = \frac{+1{,}17 - 1{,}17 + 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 15{,}6}{15{,}6} = 0{,}5 \text{ kN}$$

R_c^L: $\Sigma M_b = 0$

$R_c^L l + M_b - M_c - F\frac{1}{2}l = 0$

$$R_c^L = \frac{-M_b + M_c + F\frac{1}{2}l}{l} = \frac{-1{,}17 + 1{,}17 + 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 15{,}6}{15{,}6} = 0{,}5 \text{ kN}$$

R_c^P: $\Sigma M_d = 0$

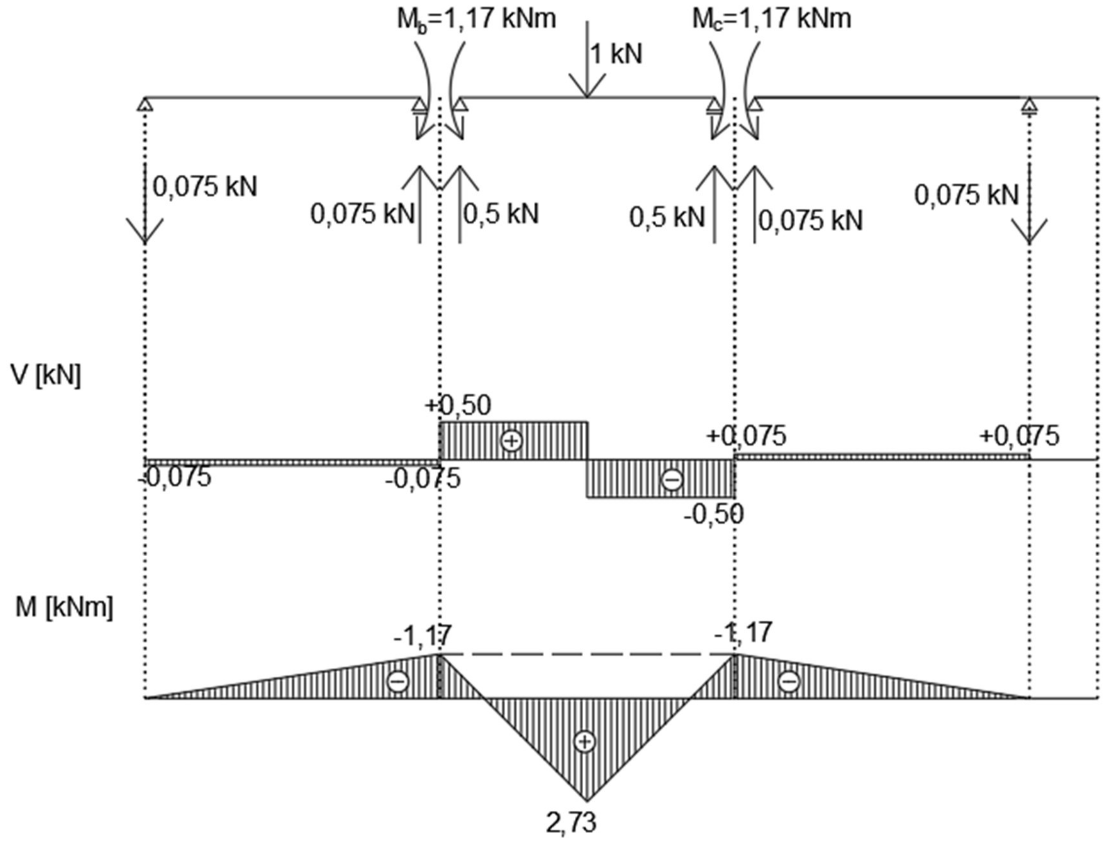
$R_c^P l - M_c = 0$

$$R_c^P = \frac{+M_b}{l} = \frac{+1{,}17}{15{,}6} = +0{,}075 \text{ kN}$$

R_d: $\Sigma M_c = 0$

$R_d l + M_c = 0$

$$R_d = \frac{M_b}{l} = \frac{-1{,}17}{15{,}6} = -0{,}075 \text{ kN}$$



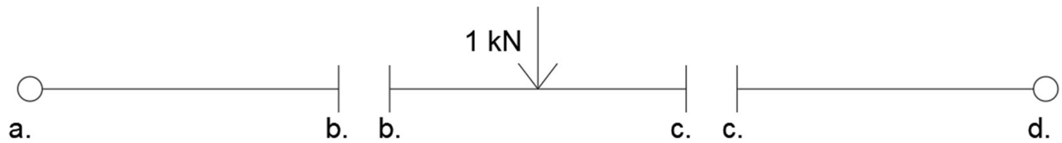
Obr. 30 Průběhy vnitřních sil od jednotkové síly, která vyvozuje maximální moment v bodě 2.

4.2.4. Ověření vnitřních sil od jednotkové síly pomocí deformační metody

Postup výpočtu je totožný jako u kapitoly 4.2.2. Ověření vnitřních sil od zatížení chodci pomocí deformační metody.

Výpočtový model je znázorněn na obrázku 31.

Pomlčka u matic tuhosti znamená, že dané sloupce nejsou důležité k výpočtu.



Obr. 31 Výpočtový model pro deformační metodu – jednotková síla

$$[K_{a,b}]=\begin{bmatrix} - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & -67{,}33 \\ - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & 0 \\ - & - & - & - & - & 67{,}333 \\ - & - & - & - & - & 1050{,}38 \end{bmatrix}\cdot 10^{6}$$

$$[K_{b,c}]=\begin{bmatrix} - & - & 0 & - & - & 0 \\ - & - & -134,66 & - & - & -134,66 \\ - & - & 1400,51 & - & - & 700,26 \\ - & - & 0 & - & - & 0 \\ - & - & 134,66 & - & - & 134,66 \\ - & - & 700,26 & - & - & 1400,51 \end{bmatrix}\cdot 10^6$$

$$[K_{c,d}]=\begin{bmatrix} - & - & 0 & - & - & - \\ - & - & -67,33 & - & - & - \\ - & - & 1050,38 & - & - & - \\ - & - & 0 & - & - & - \\ - & - & 67,33 & - & - & - \\ - & - & 0 & - & - & - \end{bmatrix}\cdot 10^6$$

$$[K]=\begin{bmatrix} 1050,38+1400,51 & 700,26 \\ 700,26 & 1400,51+1050,38 \end{bmatrix}\cdot 10^6=\begin{bmatrix} 2450,89 & 700,26 \\ 700,26 & 2450,89 \end{bmatrix}\cdot 10^6$$

$$\{\overline{R}_{a,b}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{\overline{R}_{b,c}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ -0,5 \\ 1,95 \\ 0 \\ -0,5 \\ -1,95 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{\overline{R}_{c,d}\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{\overline{R}\}=\begin{Bmatrix} 0+1,95 \\ -1,95+0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3=\begin{Bmatrix} 1,95 \\ -1,95 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$\{F\}=\{S\}-\{\overline{R}\}$$
$$\{F\}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\cdot 10^3-\begin{Bmatrix} 1,95 \\ -1,95 \end{Bmatrix}\cdot 10^3=\begin{Bmatrix} -1,95 \\ 1,95 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

$$[K]\ \{r\}=\{F\}$$
$$\begin{bmatrix} 2450,89 & 700,26 \\ 700,26 & 2450,89 \end{bmatrix}\cdot 10^6\ \begin{Bmatrix} \varphi_b \\ \varphi_c \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} -1,95 \\ 1,95 \end{Bmatrix}\cdot 10^3$$

φ_b = - 0,0011 · 10^{-3} rad
φ_c =   0,0011 · 10^{-3} rad

$$\{R\}=\{\overline{R}\}+\{\widehat{R}\}=\{\overline{R}\}+[\mathrm{K}]\ \{r\}$$

$$\{r_{a,b}\}=\begin{Bmatrix}0\\0\\0\\0\\0\\-0{,}0011\end{Bmatrix}\cdot10^{-3}$$

$$\{R_{a,b}\}=\begin{Bmatrix}0\\0\\0\\0\\0\\0\end{Bmatrix}\cdot10^{-3}+\begin{bmatrix}- & - & - & - & - & 0\\- & - & - & - & - & -67{,}33\\- & - & - & - & - & 0\\- & - & - & - & - & 0\\- & - & - & - & - & 67{,}333\\- & - & - & - & - & 1050{,}38\end{bmatrix}\cdot10^{6}\begin{Bmatrix}0\\0\\0\\0\\0\\-0{,}0011\end{Bmatrix}\cdot10^{-3}=$$

$$=\begin{Bmatrix}0\\0{,}075\\0\\0\\-0{,}075\\-1{,}17\end{Bmatrix}\cdot10^{3}$$

$$\{r_{b,c}\}=\begin{Bmatrix}0\\0\\-0{,}0011\\0\\0\\0{,}0011\end{Bmatrix}\cdot10^{-3}$$

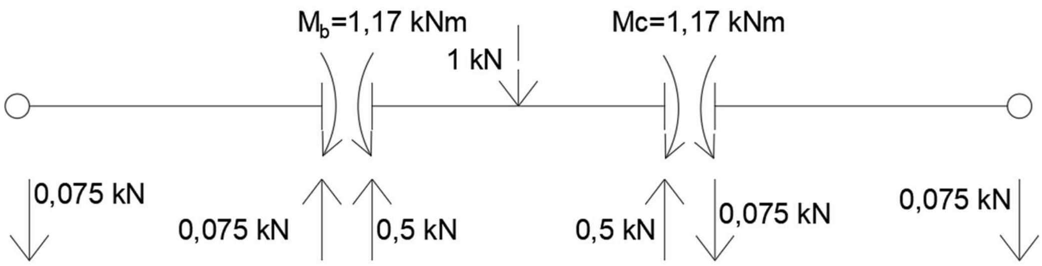
$$\{R_{b,c}\}=\begin{Bmatrix}0\\-0{,}5\\1{,}95\\0\\-0{,}5\\-1{,}95\end{Bmatrix}\cdot10^{-3}+\begin{bmatrix}- & - & 0 & - & - & 0\\- & - & -134{,}66 & - & - & -134{,}66\\- & - & 1400{,}51 & - & - & 700{,}26\\- & - & 0 & - & - & 0\\- & - & 134{,}66 & - & - & 134{,}66\\- & - & 700{,}26 & - & - & 1400{,}51\end{bmatrix}\cdot10^{6}\cdot\begin{Bmatrix}0\\0\\-0{,}0011\\0\\0\\0{,}0011\end{Bmatrix}\cdot10^{-3}=$$

$$=\begin{Bmatrix}0\\-0{,}5\\1{,}17\\0\\-0{,}5\\-1{,}17\end{Bmatrix}\cdot10^{3}$$

$$\{r_{c,d}\}=\begin{Bmatrix}0\\0\\0{,}0011\\0\\0\\0\end{Bmatrix}\cdot10^{-3}$$

$$\{R_{c,d}\}=\begin{Bmatrix}0\\0\\0\\0\\0\\0\end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}+\begin{bmatrix}- & - & 0 & - & - & -\\ - & - & -67{,}34 & - & - & -\\ - & - & 1050{,}44 & - & - & -\\ - & - & 0 & - & - & -\\ - & - & 67{,}34 & - & - & -\\ - & - & 0 & - & - & -\end{bmatrix}\cdot 10^{6}\cdot\begin{Bmatrix}0\\0\\0{,}0011\\0\\0\\0\end{Bmatrix}\cdot 10^{-3}=$$

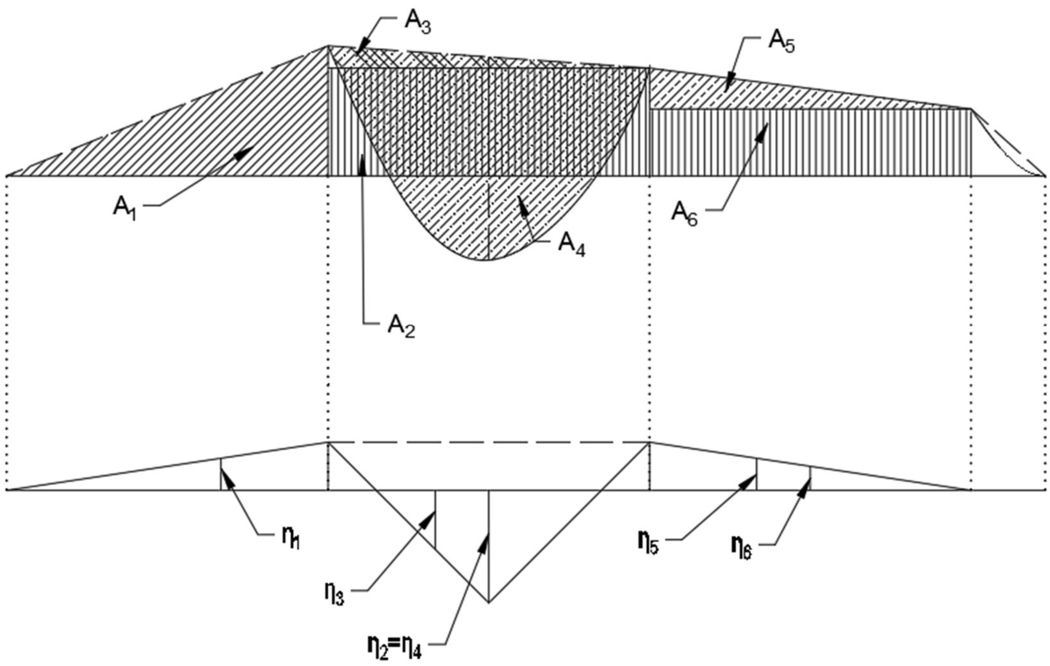
$$=\begin{Bmatrix}0\\-0{,}075\\1{,}17\\0\\0{,}075\\0\end{Bmatrix}\cdot 10^{3}$$



Obr. 32 Koncové síly na spojitém nosníku

Z vypočtených hodnot koncových sil (obrázek 32) vyplývá, že vnitřní síly jsou totožné jako u výpočtu pomocí třímomentových rovnic (obrázek 30).

4.2.5. Vlastní výpočet posunutí



Obr. 33 Rozdělení obsahu momentového obrazce a jejich pořadnice potřebného pro stanovení maximálního posunu v bodě 2

Výpočet posunutí metodou jednotkových sil bude proveden integrací součinu momentů od zatížení chodci (obrázek 25) a momentů od jednotkového zatížení (obrázek 30). Z ohybových momentů od zatížení chodci si vezmeme plochu a momentů od jednotkové síly příslušné pořadnice (obrázek 33).

$$\delta=\int_0^l \frac{M(x)\overline{M}(x)}{EI}dx=\frac{1}{EI}\left[A_1\,\eta_1+A_2\,\eta_2+A_3\,\eta_3+A_4\,\eta_4+A_5\,\eta_5+A_6\,\eta_6\right]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot\Big[\frac{1}{2}\cdot(-157{,}50)\cdot 15{,}6\cdot\frac{2}{3}\cdot(-1{,}17)+(-130{,}50)\cdot 15{,}6\cdot 2{,}73+\frac{1}{2}\cdot(-27{,}00)\cdot 15{,}6\cdot$$

$$\cdot(-1{,}17+\frac{1{,}17+2{,}73}{7{,}8}\cdot 5{,}2)+\frac{2}{3}\cdot 380{,}25\cdot 15{,}6\cdot 2{,}73+\frac{1}{2}\cdot(-49{,}5)\cdot 15{,}6\cdot\frac{2}{3}\cdot(-1{,}17)+$$

$$+(-81{,}0)\cdot 15{,}6\cdot\frac{1}{2}\cdot(-1{,}17)\Big]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot[958{,}23-5557{,}73-301{,}16+10796{,}06+301{,}16+739{,}21]=$$

$$=\frac{1}{546{,}20\cdot 10^4}\cdot[6935{,}77]=1{,}27\cdot 10^{-3}\text{ m}$$

Odečtená hodnota posunutí z modelu v RFEMu nacházející se uprostřed pole č. 2 činí $2{,}50\cdot 10^{-3}$ m pro jeden pás a $2{,}46\cdot 10^{-3}$ m pro druhý pás (obrázek 205).
Číselný rozdíl pro větší hodnotu z RFEMU činí:
$2{,}50\cdot 10^{-3}-1{,}27\cdot 10^{-3}=1{,}23\cdot 10^{-3}$ m
V procentech je to:

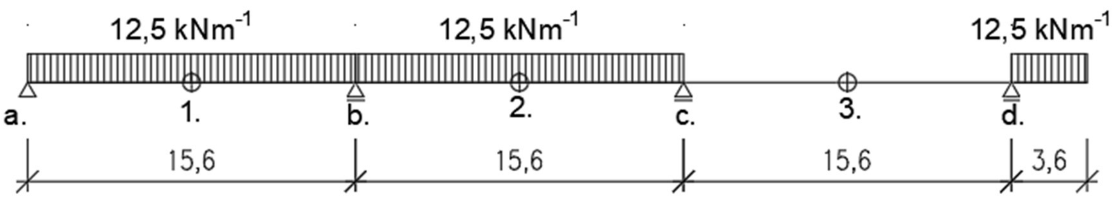
$$\frac{2{,}50\cdot 10^{-3}\cdot 100}{1{,}27\cdot 10^{-3}}=196{,}85\ \%$$

Poměr vyjádřený v procentech mezi posunutím z ručního výpočtu a posunutím z modelu v RFEM je 196,85 %

4.3. Pootočení nad podporou b od zatížení chodci

Pomocí metody jednotkových sil vypočítáme příslušnou hodnotu maximálního pootočení nad podporou b. Na to budeme potřebovat dva zatěžovací stavy. Od zatížení chodci umístěného tak, aby vyvozovalo maximální moment nad podporou b (obrázek 14, 34). A od jednotkového momentu působícího v podpoře b (obrázek 37). Na výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení a od zatížení chodci použijeme soustavu třímomentových rovnic.

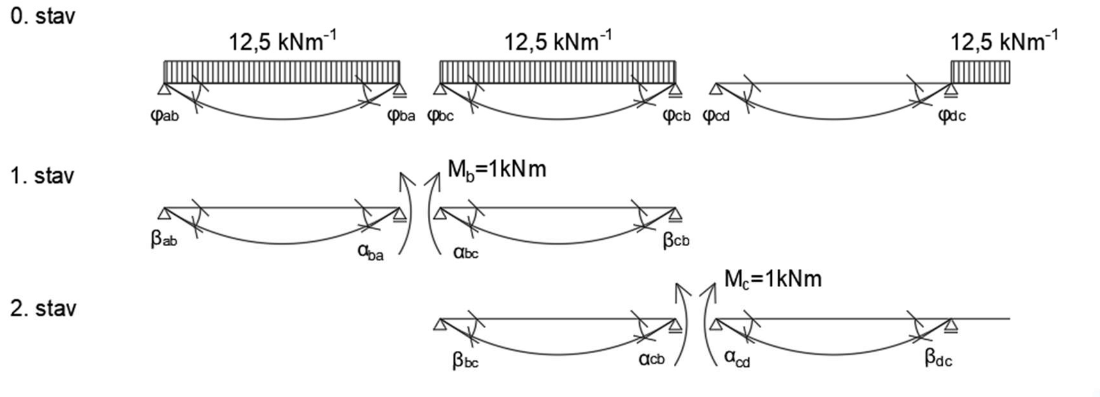
4.3.1. Zatížení chodci



Obr. 34 Umístění zatížení tak aby byl vyvozen největší moment v podpoře b.

Zatížení si přepočítáme z plošného zatížení na liniové zatížení:
$q = q_{plošné}\,b_{průch} = 5\cdot 2{,}5 = 12{,}5$ kNm^{-1}

Dále uvažujeme konstantní ohybovou tuhost po celé délce:
EI=konst.



Obr. 35 Základní soustava pro max. M_b, nultý stav je od spojitého zatížení

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 35). Jelikož je M_a = 0 kNm a M_d = -81 kNm (moment od zatížení na převislém konci), tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S nultým stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba} M_a + M_b (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc} M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb} M_b + M_c (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd} M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3}\cdot 15{,}6 = 5{,}2$$

$$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6}\cdot 15{,}6 = 2{,}6$$

$$\varphi_{ba} = \varphi_{bc} = \varphi_{cb} = \frac{1}{24}\frac{q}{EI}l^3 = \frac{1}{24}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^3 = 1977{,}3$$

$\varphi_{cd}=0$

$M_a=0$ kNm

$$M_d = -\frac{1}{2}ql^2 = -\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 3{,}6^2 = -81 \text{ kNm}$$

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2+5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 1977{,}3 \cdot 1977{,}3 \qquad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot (-81) + 1977{,}3 + 0 \qquad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0-27{,}04 \cdot M_b-6{,}76 \cdot M_c-10281{,}96$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b + 108{,}16 \cdot M_c + 18373{,}68}$

$0 = 0 + 101{,}4 \cdot M_c + 8091{,}72$

$$M_c=\frac{-8091{,}72}{101{,}4}= -79{,}80\text{kNm}$$

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot (-79{,}8) + 1977{,}3 + 1977{,}3$

$$M_b=\frac{-3747{,}12}{10{,}4}=-360{,}30 \text{ kNm}$$

R_a: $\Sigma M_b=0$

$$R_a l-\frac{1}{2}ql^2+M_b=0$$

$$R_a=\frac{\frac{1}{2}ql^2-M_b}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2-360{,}30}{15{,}6}= 74{,}40\text{ kN}$$

R_b^L: $\Sigma M_a=0$

$$R_b^L l-\frac{1}{2}ql^2-M_b=0$$

$$R_b^L=\frac{\frac{1}{2}ql^2+M_b}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2+360{,}30}{15{,}6}= 120{,}60\text{ kN}$$

R_b^P: $\Sigma M_c=0$

$$R_b^P l-\frac{1}{2}ql^2-M_b+M_c=0$$

$$R_b^P=\frac{\frac{1}{2}ql^2+M_b-M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2+360{,}30-79{,}80}{15{,}6}= 115{,}48\text{ kN}$$

R_c^L: $\Sigma M_b=0$

$$R_c^L l-\frac{1}{2}ql^2+M_b-M_c=0$$

$$R_c^L=\frac{\frac{1}{2}ql^2-M_b+M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2-360{,}30+79{,}80}{15{,}6}= 79{,}52\text{ kN}$$

R_c^P: $\Sigma M_d=0$

$$R_c^P l-M_c+M_d=0$$

$$R_c^P=\frac{M_c-M_d}{l}=\frac{79{,}80-81}{15{,}6}= -0{,}08\text{ kN}$$

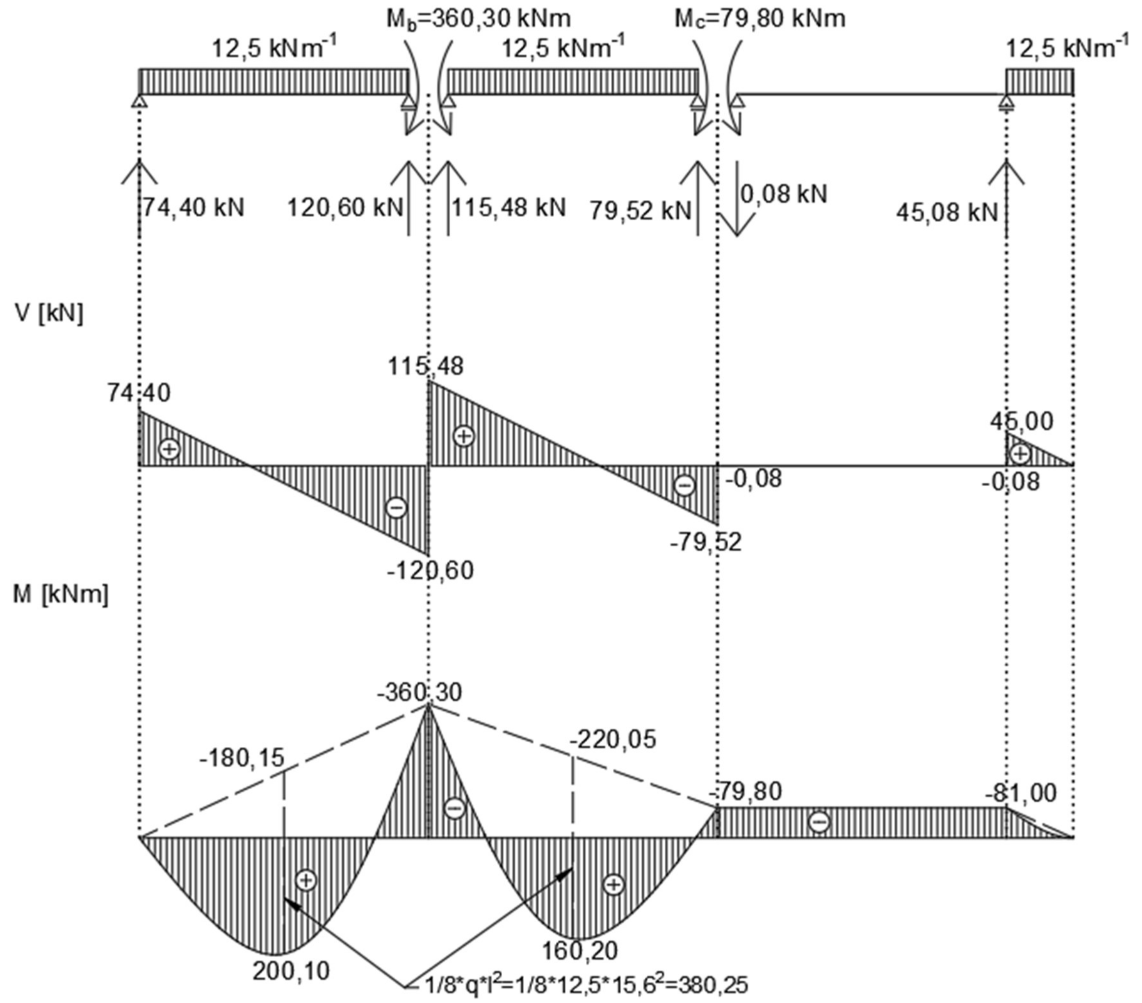
R_d: $\Sigma M_c=0$

$$R_d+M_c-ql_1(l+\frac{1}{2}l_1)=0$$

$$R_d=\frac{-M_c+ql_1(l+\frac{1}{2}l_1)=}{l}=\frac{-79{,}80+12{,}5\cdot 3{,}6\cdot(15{,}6+\frac{1}{2}\cdot 3{,}6)}{15{,}6}= 45{,}08\text{ kN}$$

l je délka pole

l_1 je délka převislého konce



Obr. 36 Průběhy vnitřních sil od spojitého zatížení, které vyvozuje maximální moment v podpoře b.

4.3.2. Ověření momentu nad podporou b pomocí příčinkových čar. Pořadnice budou brány z RFEMu

Použijeme pořadnice příčinkových čar pro max. M nad podporou b (obrázek 14).

l je délka pole

l_1 je délka převislého konce

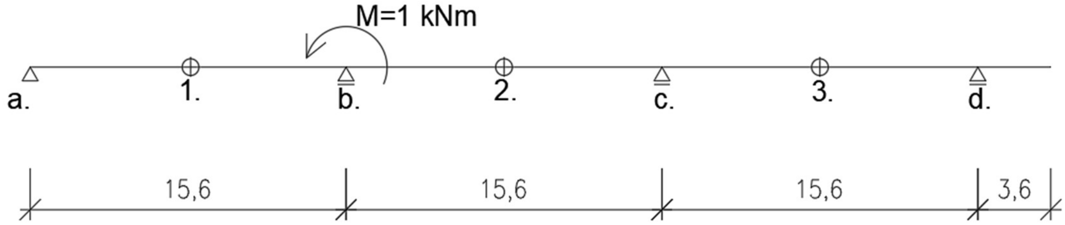
$$M_b=\frac{2}{3}\eta_1 ql+\frac{2}{3}\eta_2 ql+\frac{1}{3}\eta_3 ql_1$$

$$M_b=\frac{2}{3}\cdot(-1{,}56)\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6+\frac{2}{3}\cdot(-1{,}17)\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6+\frac{1}{3}\cdot(-0{,}24)\cdot 12{,}5\cdot 3{,}6$$

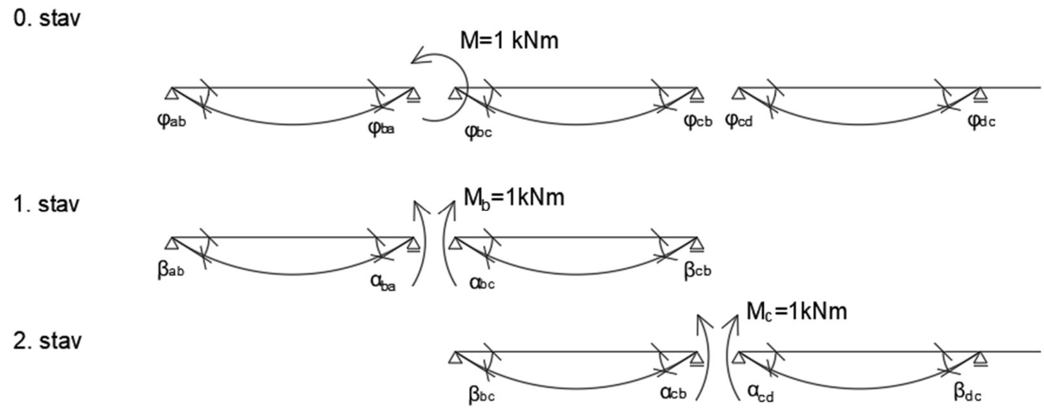
M_b= -358,5 kNm

Momenty jsou prakticky shodné.

4.3.3. Od jednotkové síly



Obr. 37 Umístění jednotkového momentu tak, aby byl vyvozen největší moment v podpoře b.



Obr. 38 Základní soustava pro max. M_b, nultý stav je od jednotkové síly

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 38). Jelikož je M_a = 0 kNm a M_d = 0 kNm, tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S prvním stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba} M_a + M_b (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc} M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb} M_b + M_c (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd} M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3}\cdot 15{,}6 = 5{,}2$

$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6}\cdot 15{,}6 = 2{,}6$

$\varphi_{bc} = \frac{1}{3}\frac{M}{EI} l = \frac{1}{3}\cdot(-1)\cdot 15{,}6 = -5{,}2$

$\varphi_{cb} = \frac{1}{6}\frac{M}{EI} l = \frac{1}{6}\cdot(-1)\cdot 15{,}6 = -2{,}6$

$\varphi_{ba} = \varphi_{cd} = 0$

$M_a = 0$ kNm

$M_d = 0$ kNm

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 0 - 5{,}2 \qquad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0 - 2{,}6 + 0 \qquad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0 - 27{,}04 \cdot M_b - 6{,}76 \cdot M_c + 13{,}52$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b + 108{,}16 \cdot M_c - 27{,}04}$

$0 + 101{,}4 \cdot M_c - 13{,}52$

$$M_c = \frac{13{,}52}{101{,}4} = 0{,}133 \text{ kNm}$$

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2+5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0{,}133 + 0 - 5{,}2$

$$M_b = \frac{+4{,}85}{10{,}4} = 0{,}467 \text{ kNm}$$

R_a: $\Sigma M_b = 0$

$R_a l - M_b = 0$

$$R_a = \frac{+M_b}{l} = \frac{0{,}467}{15{,}6} = 0{,}03 \text{ kN}$$

R_b^L: $\Sigma M_a = 0$

$R_b^L l + M_b = 0$

$$R_b^L = \frac{-M_c}{l} = \frac{-0{,}467}{15{,}6} = -0{,}03 \text{ kN}$$

R_b^P: $\Sigma M_c = 0$

$R_b^P l + M_b - M_c - M = 0$

$$R_b^P = \frac{-M_b + M_c + M}{l} = \frac{-0{,}467 + 0{,}133 + 1}{15{,}6} = 0{,}043 \text{ kN}$$

R_c^L: $\Sigma M_b = 0$

$R_c^L l - M_b + M_c + M = 0$

$$R_c^L = \frac{+M_b - M_c - M}{l} = \frac{+0{,}467 - 0{,}133 - 1}{15{,}6} = -0{,}043 \text{ kN}$$

R_c^P: $\Sigma M_d = 0$

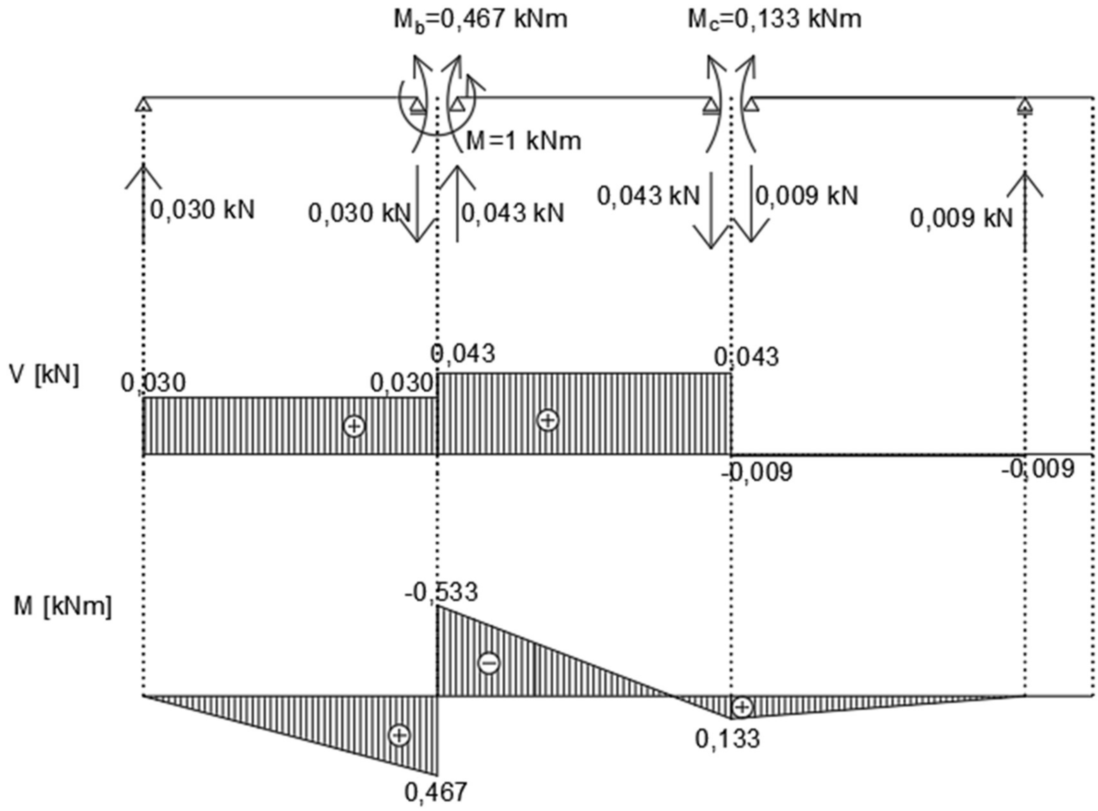
$R_c^P l + M_c = 0$

$$R_c^P = \frac{-\mathrm{M_c}}{\mathrm{l}} = \frac{-0{,}133}{15{,}6} = -0{,}009 \text{ kN}$$

R_d: $\Sigma M_c = 0$

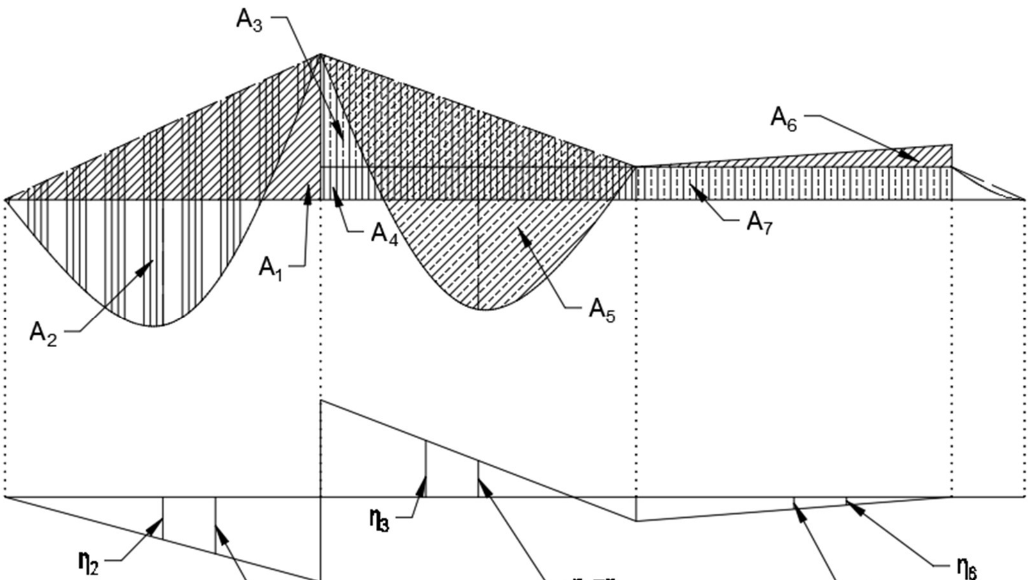
$R_d l - M_c = 0$

$$R_d = \frac{M_c}{l} = \frac{0{,}133}{15{,}6} = 0{,}009 \text{ kN}$$



Obr. 39 Průběhy vnitřních sil od jednotkového momentu, který vyvozuje maximální moment v podpoře b.

4.3.4. Vlastní výpočet pootočení



Obr. 40 Rozdělení obsahu momentového obrazce a jejich pořadnice potřebného pro stanovení maximálního posunu v podpoře b.

Výpočet pootočení metodou jednotkových sil bude proveden integrací součinu momentů od zatížení chodci (obrázek 36) a momentů vyvolaných jednotkovým momentem v podpoře b (obrázek 39). Z ohybových momentů od zatížení chodci si vezmeme plochu a od jednotkového momentu příslušné pořadnice (obrázek 40).

$$\delta=\int_0^l \frac{M(x)\overline{M}(x)}{EI}dx=\frac{1}{EI}\left[A_1\,\eta_1+A_2\,\eta_2+A_3\,\eta_3+A_4\,\eta_4+A_5\,\eta_5+A_6\,\eta_6+A_7\,\eta_7\right]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot\Big[(-360{,}30)\cdot\frac{1}{2}\cdot 15{,}6\cdot\frac{2}{3}\cdot 0{,}467+\frac{2}{3}\cdot 380{,}25\cdot 15{,}6\cdot\frac{0{,}467}{2}+\frac{1}{2}\cdot(-280{,}5)\cdot 15{,}6\cdot$$

$$\cdot\left(-0{,}533+\frac{1}{3}\cdot 0{,}666\right)+(-79{,}8)\cdot 15{,}6\cdot\frac{-0{,}533+0{,}133}{2}\frac{1}{2}\cdot(-1{,}2)\cdot 15{,}6\cdot\frac{1}{3}\cdot 0{,}133+$$

$$+(-79{,}8)\cdot 15{,}6\cdot\frac{0{,}133}{2}\Big]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot[-874{,}953+923{,}399+680{,}437+248{,}976-790{,}92-0{,}415-82{,}785]=$$

$$=\frac{1}{546{,}20\cdot 10^4}\cdot[103{,}74]=1{,}90\cdot 10^{-5}\ \text{rad}$$

Odečtená hodnota z RFEMu nad podporou b činí $2{,}00\cdot 10^{-4}$ rad pro jeden pás a $-2{,}00\cdot 10^{-4}$ pro druhý pás (obrázek 206).
Číselný rozdíl pro větší hodnotu z RFEMU činí:
$2{,}00\cdot 10^{-4} - 1{,}90\cdot 10^{-5} = 1{,}81\cdot 10^{-4}$ rad
V procentech je to:

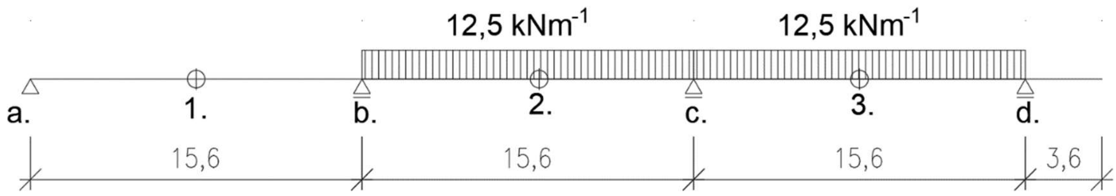
$$\frac{2{,}00\cdot 10^{-4}\cdot 100}{1{,}90\cdot 10^{-5}}=1052{,}63\ \%$$

Poměr vyjádřený v procentech mezi pootočením z ručního výpočtu a pootočením z modelu v RFEM je 1052,63 %

4.4. Pootočení nad podporou c od zatížení chodci

Pomocí metody jednotkových sil vypočítáme příslušnou hodnotu maximálního pootočení nad podporou c. Na to budeme potřebovat dva zatěžovací stavy.
Od zatížení chodci umístěného tak, aby vyvozovalo maximální moment nad podporou b (obrázek 15, 41) a od jednotkového momentu působícího v podpoře c (obrázek 46). Na výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení a od zatížení chodci použijeme soustavu třímomentových rovnic.

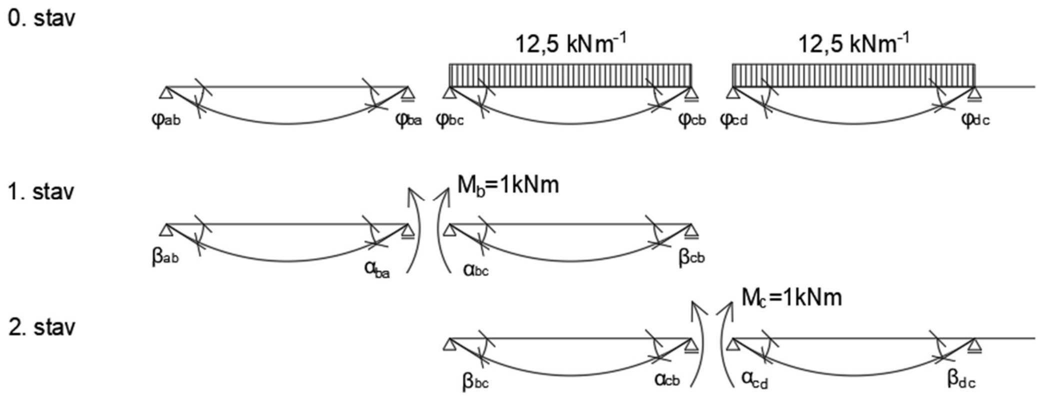
4.4.1. Zatížení chodci



Obr. 41 Umístění zatížení tak aby byl vyvozen největší moment v podpoře c.

Zatížení si přepočítáme s z plošného zatížení na liniové zatížení:
$q = q_{plošné}\, b_{průch} = 5\cdot 2{,}5 = 12{,}5\ \text{kNm}^{-1}$

Dále uvažujeme konstantní ohybovou tuhost po celé délce:
EI=konst.



Obr. 42 Základní soustava pro max. M_c, nultý stav je od spojitého zatížení

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 42). Jelikož je M_a = 0 kNm a M_d = 0 kNm, tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S nultým stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba}\, M_a + M_b\, (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc}\, M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb}\, M_b + M_c\, (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd}\, M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3}\cdot 15{,}6 = 5{,}2$$

$$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6}\cdot 15{,}6 = 2{,}6$$

$$\varphi_{bc} = \varphi_{cb} = \varphi_{cd} = \frac{1}{24}\frac{q}{EI}l^3 = \frac{1}{24}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^3 = 1977{,}3$$

$\varphi_{ba}=0$

$M_a=0$ kNm

$M_d=0$ kNm

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 0 + 1977{,}3 \qquad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0 + 1977{,}3 + 1977{,}3 \qquad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0-27{,}04 \cdot M_b-6{,}76 \cdot M_c-5140{,}98$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b + 108{,}16 \cdot M_c + 41127{,}84}$

$0 = 0 + 101{,}4 \cdot M_c + 35986{,}86$

$$M_c=\frac{-35986{,}86}{101{,}4} = -354{,}90\text{kNm}$$

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot (-354{,}9) + 0 + 1977{,}3$

$$M_b=\frac{-1054{,}56}{10{,}4} = -101{,}40 \text{ kNm}$$

R_a: $\Sigma M_b=0$

$R_a l+M_b=0$

$$R_a=\frac{-M_b}{l}=\frac{-101{,}40}{15{,}6}=-6{,}50\text{ kN}$$

$R_b{}^L$: $\Sigma M_a=0$

$R_b{}^L l-M_b=0$

$$R_b{}^L=\frac{+M_b}{l}=\frac{+101{,}40}{15{,}6}=6{,}50\text{ kN}$$

$R_b{}^P$: $\Sigma M_c=0$

$$R_b{}^P l-\frac{1}{2}ql^2-M_b+M_c=0$$

$$R_b{}^P=\frac{\frac{1}{2}ql^2+M_b-M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2+101{,}40-354{,}90}{15{,}6}=81{,}25\text{ kN}$$

$R_c{}^L$: $\Sigma M_b=0$

$$R_c{}^L l-\frac{1}{2}ql^2+M_b-M_c=0$$

$$R_c{}^L=\frac{\frac{1}{2}ql^2-M_b+M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2-101{,}40+354{,}90}{15{,}6}=113{,}75\text{ kN}$$

$R_c{}^P$: $\Sigma M_d=0$

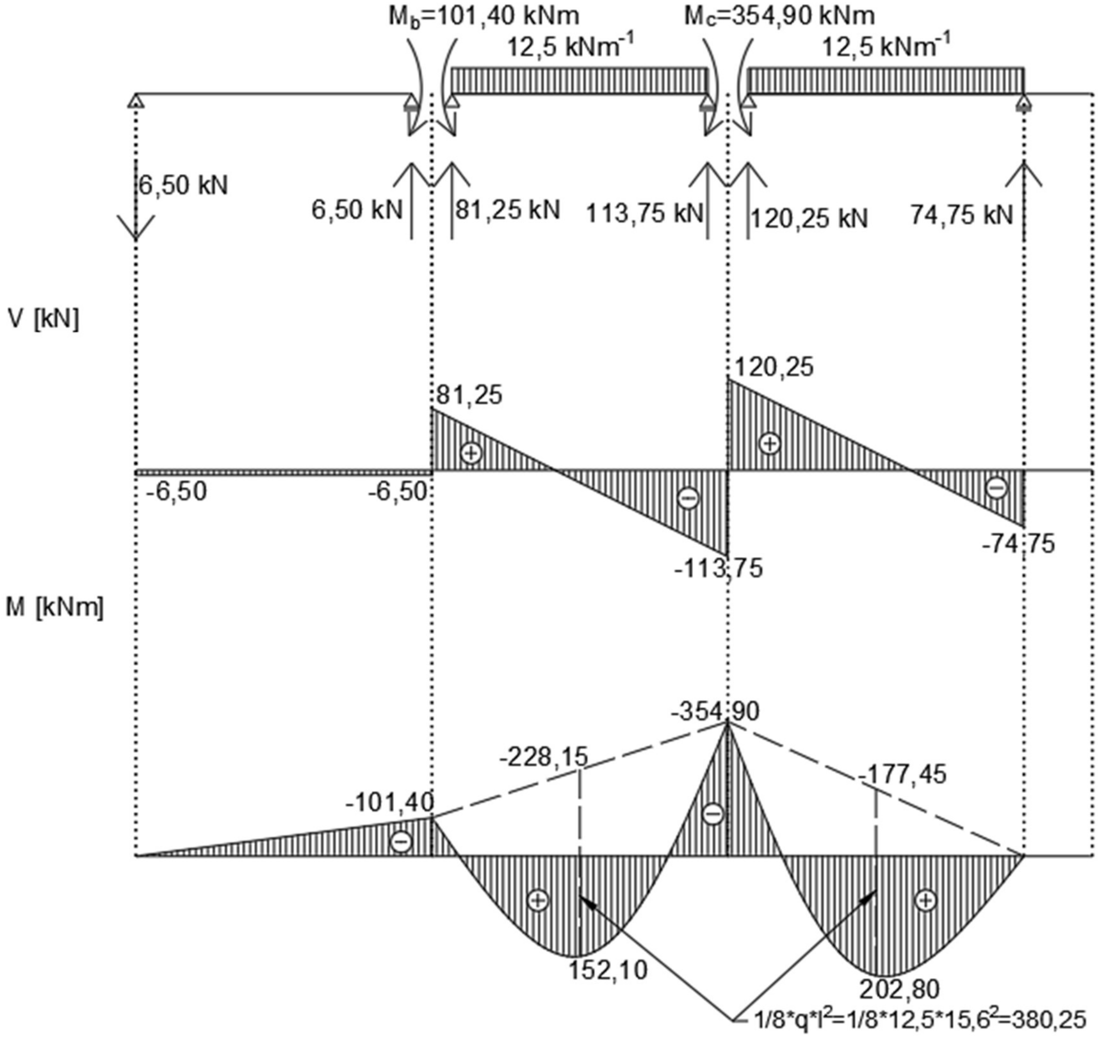
$$R_c{}^P l-\frac{1}{2}ql^2-M_c=0$$

$$R_c{}^P=\frac{\frac{1}{2}ql^2+M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2+354{,}90}{15{,}6}=120{,}25\text{ kN}$$

R_d: $\Sigma M_c=0$

$$R_d l-\frac{1}{2}ql^2+M_c=0$$

$$R_d=\frac{\frac{1}{2}ql^2-M_c}{l}=\frac{\frac{1}{2}\cdot 12{,}5\cdot 15{,}6^2-354{,}90}{15{,}6}=74{,}75\text{ kN}$$



Obr. 43 Průběhy vnitřních sil od spojitého zatížení, které vyvozuje maximální moment v podpoře c.

4.4.2. Ověření velikosti momentu nad podporou b pomocí ručního výpočtu příčinkové čáry

Použijeme třímomentovou rovnici, kde je pootočení rovno jedné. Z té si vyjádříme momenty M_b a M_c. A pak si vypočítáme pořadnici pomocí vztahů uvedených v [10].

$0 = B_{ba}\, M_a + M_b\, (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc}\, M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb}\, M_b + M_c\, (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd}\, M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3}\cdot 15{,}6 = 5{,}2$$

$$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6}\cdot 15{,}6 = 2{,}6$$

$\varphi_{ba} = \varphi_{bd} = \varphi_{bc} = 0$

$\varphi_{cb} = 1$

$M_d = 0$ kNm

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 0 + 0 \qquad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0 + 1 \qquad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0 - 27{,}04 \cdot M_b - 6{,}76 \cdot M_c + 0$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b + 108{,}16 \cdot M_c - 20{,}8}$

$0 = 0 + 101{,}4 \cdot M_c + 10{,}4$

$M_c = \frac{-10{,}4}{101{,}4}\frac{EI}{1} = -0{,}10256 \cdot \frac{EI}{1}$ kNm

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot (-0{,}10256) + 0 + 0$

$M_b = \frac{0{,}26666}{10{,}4}\frac{EI}{1} = 0{,}02564 \cdot \frac{EI}{1}$ kNm

b-c:

$\eta_{Mc} = M_b\, \varphi_{bd}{}^F(x = kl) + M_c\, \varphi_{cd}{}^F(x' = l - x)$

$\eta_{Mc}(x=0{,}5l) = (M_b + M_c)\frac{1}{16}\frac{l^2}{EI} = (0{,}02564 \cdot \frac{EI}{1} + (-0{,}10256) \cdot \frac{EI}{1}) \cdot \frac{1}{16} \cdot \frac{15{,}6^2}{EI} = -1{,}17$

$\eta_{Mc}(x=0{,}25l) = (M_b(l + b) + M_c(l + a))\frac{1}{6}\frac{ab}{l}\frac{1}{EI} =$

$= (0{,}02564 \cdot \frac{EI}{1} \cdot (15{,}6+11{,}7) + (-0{,}10256) \cdot \frac{EI}{1} \cdot (15{,}6+3{,}9)) \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{3{,}9 \cdot 11{,}7}{15{,}6} \cdot \frac{1}{EI} = -0{,}63$

$\eta_{Mc}(x=0{,}75l) = (M_b(l + b) + M_c(l + a))\frac{1}{6}\frac{ab}{l}\frac{1}{EI} =$

$= (0{,}02564 \cdot \frac{EI}{1} \cdot (15{,}6+3{,}9) + (-0{,}10256) \cdot \frac{EI}{1} \cdot (15{,}6+11{,}7)) \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{11{,}7 \cdot 3{,}9}{15{,}6} \cdot \frac{1}{EI} = -1{,}12$

c-d:

$\eta_{Mc} = M_c\, \varphi_{cd}{}^F(x = kl)$

$\eta_{Mc}(x=0{,}5l) = M_c\frac{1}{16}\frac{l^2}{EI} = (-0{,}10256) \cdot \frac{EI}{1} \cdot \frac{1}{16} \cdot \frac{15{,}6^2}{EI} = -1{,}56$

$\eta_{Mc}(x=0{,}25l) = M_c(l + a)\frac{1}{6}\frac{ab}{l}\frac{1}{EI} = (-0{,}10256) \cdot \frac{EI}{1} \cdot (15{,}6+3{,}9)) \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{11{,}7 \cdot 3{,}9}{15{,}6} \cdot \frac{1}{EI} = -0{,}97$

$\eta_{Mc}(x=0{,}75l) = M_c(l + a)\frac{1}{6}\frac{ab}{l}\frac{1}{EI} = (-0{,}10256) \cdot \frac{EI}{1} \cdot (15{,}6+11{,}7)) \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{3{,}9 \cdot 11{,}7}{15{,}6} \cdot \frac{1}{EI} = -1{,}36$

Kde a je vzdálenost podpory, ke které stanovujeme příčinkovou čáru pro maximální moment a osamělého břemena.

Kde b je vzdálenost podpory, na které působí jenom moment, a osamělého břemena.

Jelikož jsou velikosti pořadnice η jak u ručního výpočtu (obrázek 45), tak i u výsledků z RFEMu shodné (obrázek 44), tak můžeme brát hodnoty pořadnic z RFEMu.

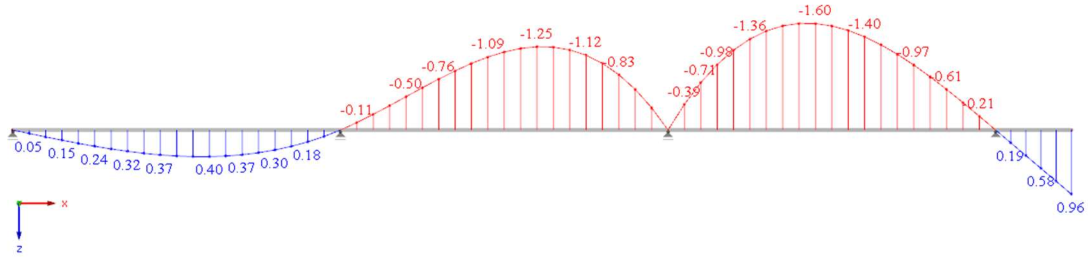
l je délka pole

l_1 je délka převislého konce

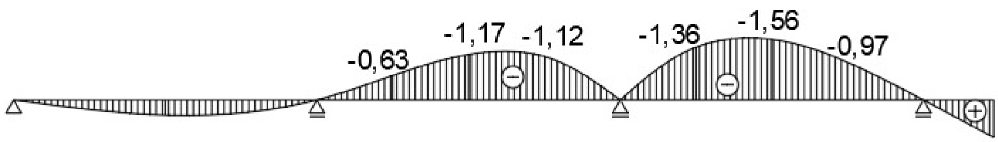
$M_b = \frac{2}{3}\eta_1 ql + \frac{2}{3}\eta_2 ql + \frac{1}{3}\eta_3 ql_1$

$M_b = \frac{2}{3} \cdot (-1{,}17) \cdot 12{,}5 \cdot 15{,}6 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}56) \cdot 12{,}5 \cdot 15{,}6$

$M_b = -354{,}9$ kNm

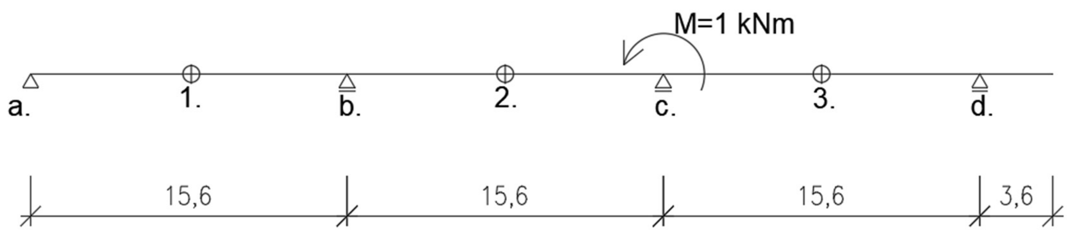


Obr. 44 Příčinkové čáry pro max. M_c z RFEMu

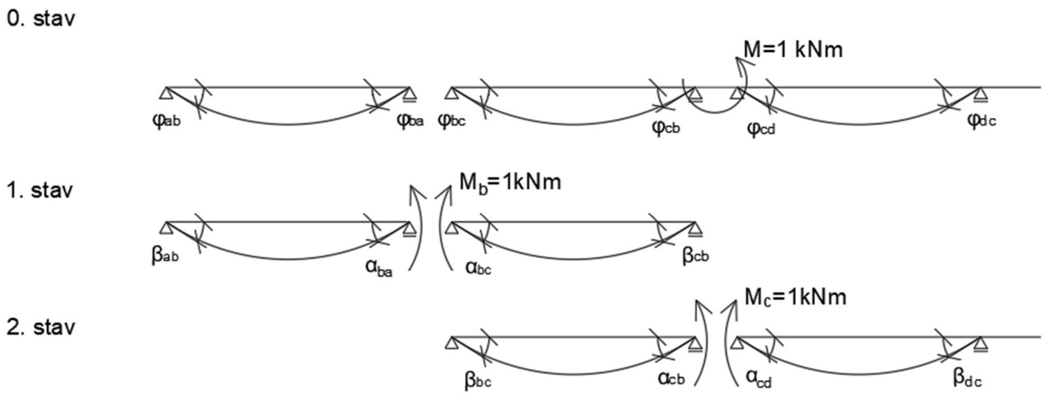


Obr. 45 Příčinkové čáry pro max. M_c vypočítané pomocí ručního výpočtu

4.4.3. Od jednotkové síly



Obr. 46 Umístění jednotkového momentu tak aby byl vyvozen největší moment v podpoře c.



Obr. 47 Základní soustava pro max. M_c, nultý stav je od jednotkové síly

Rozdělíme spojitý nosník na tři prosté nosníky. Tím nám vznikne základní soustava (obrázek 47). Jelikož je M_a = 0 kNm a M_d = 0 kNm, tak počítáme jen se třemi zatěžovacími stavy. S nultým stavem, který reprezentuje natočení od zatížení, a s prvním a druhým stavem od jednotkových momentů. Neznámými jsou momenty M_b a M_c. Tím nám vznikne soustava dvou lineárních rovnic o dvou neznámých.

$0 = \beta_{ba} M_a + M_b (\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + \beta_{bc} M_c + \varphi_{ba} + \varphi_{bc}$

$0 = \beta_{cb} M_b + M_c (\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + \beta_{cd} M_d + \varphi_{cb} + \varphi_{cd}$

$$\alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{cd} = \frac{1}{3}\frac{l}{EI} = \frac{1}{3}\cdot 15{,}6 = 5{,}2$$

$$\beta_{ba} = \beta_{bc} = \beta_{cb} = \beta_{cd} = \frac{1}{6}\frac{l}{EI} = \frac{1}{6}\cdot 15{,}6 = 2{,}6$$

$$\varphi_{cb}=\frac{1}{3}\frac{M}{EI}l=\frac{1}{3}\cdot(+1)\cdot 15{,}6 = +5{,}2$$

$$\varphi_{bc}=\frac{1}{6}\frac{M}{EI}l=\frac{1}{6}\cdot(+1)\cdot 15{,}6=+2{,}6$$

$\varphi_{ba}=\varphi_{cd}=0$

$M_a=0$ kNm

$M_d=0$ kNm

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot M_c + 0 + 2{,}6 \quad \cdot (-2{,}6)$

$\underline{0 = 2{,}6 \cdot M_b + M_c \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot 0 + 5{,}2 + 0 \quad \cdot (10{,}4)}$

$0 = 0-27{,}04 \cdot M_b-6{,}76 \cdot M_c-6{,}76$

$\underline{0 = 27{,}04 \cdot M_b + 108{,}16 \cdot M_c + 54{,}08}$

$0 = 0 + 101{,}4 \cdot M_c + 47{,}32$

$$M_c=\frac{-47{,}32}{101{,}4} = -0{,}466 \text{ kNm}$$

M_b:

$0 = 2{,}6 \cdot 0 + M_b \cdot (5{,}2 + 5{,}2) + 2{,}6 \cdot (-0{,}466) + 0 + 2{,}6$

$$M_b=\frac{-1{,}389}{10{,}4} = -0{,}133 \text{ kNm}$$

R_a: $\Sigma M_b=0$

$R_a l+M_b=0$

$$R_a=\frac{-M_b}{l}=\frac{-0{,}133}{15{,}6} = -0{,}009 \text{ kN}$$

R_b^L: $\Sigma M_a=0$

$R_b^L l-M_b=0$

$$R_b^L=\frac{+M_c}{l}=\frac{0{,}133}{15{,}6} = +0{,}009 \text{ kN}$$

R_b^P: $\Sigma M_c=0$

$R_b^P l-M_b+M_c-M=0$

$$R_b^P=\frac{+M_b-M_c+M}{l}=\frac{0{,}133-0{,}467+1}{15{,}6} = 0{,}043 \text{ kN}$$

R_c^L: $\Sigma M_b=0$

$R_c^L l+M_b-M_c+M=0$

$R_c^L=\frac{-M_b+M_c-M}{l}=\frac{-0,133+0,467-1}{15,6}=-0,043$ kN

R_c^P: $\Sigma M_d=0$

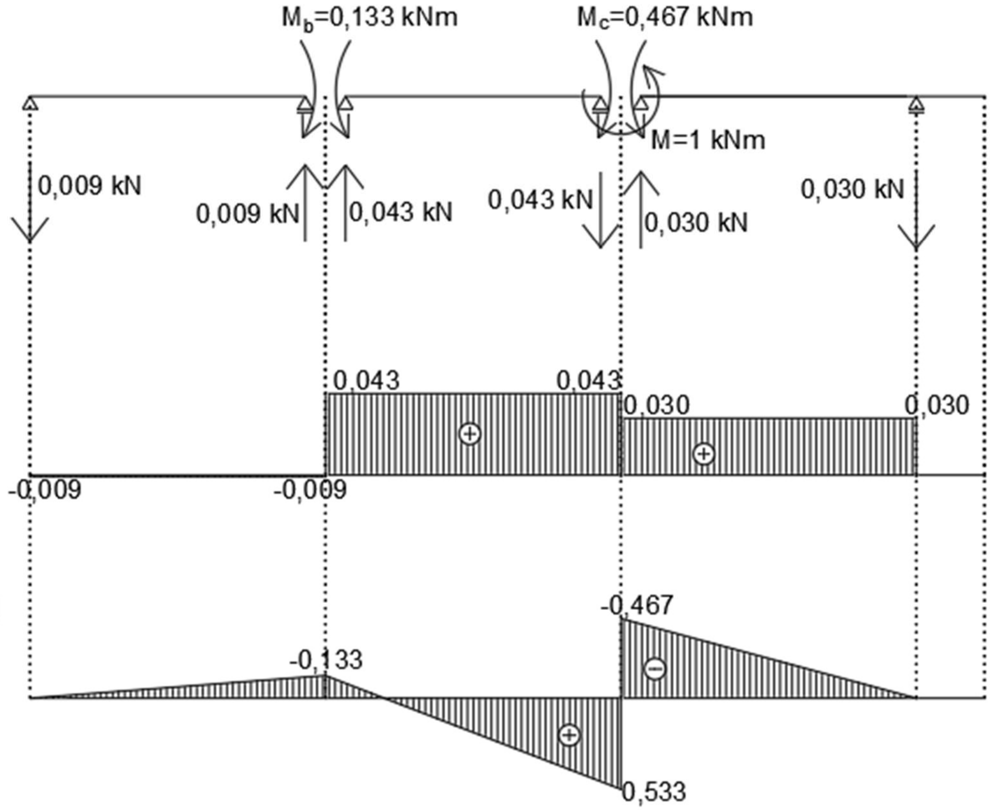
$R_c^P l-M_c=0$

$R_c^P=\frac{+M_c}{l}=\frac{+0,467}{15,6}=0,030$ kN

R_d: $\Sigma M_c=0$

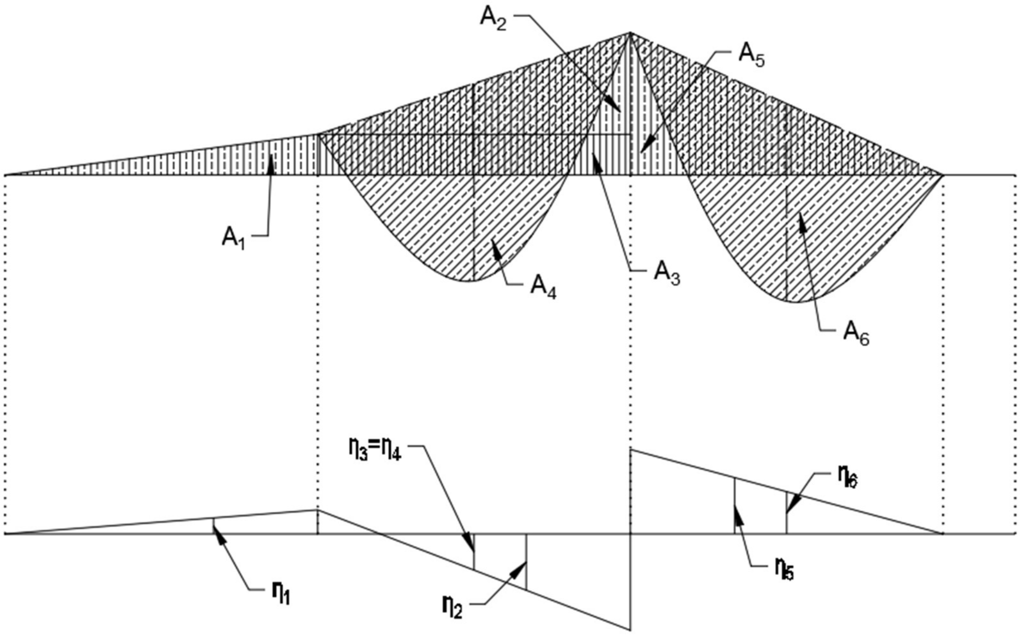
$R_d l+M_c=0$

$R_d=\frac{-M_c}{l}=\frac{-0,467}{15,6}=-0,030$ kN



Obr. 48 Průběhy vnitřních sil od jednotkového momentu, který vyvozuje maximální moment v podpoře c

4.4.4. Vlastní výpočet pootočení



Obr. 49 Rozdělení obsahu momentového obrazce a jejich pořadnice potřebného pro stanovení maximálního posunu v podpoře c.

Výpočet pootočení metodou jednotkových sil bude proveden integrací součinu momentů od zatížení chodci (obrázek 43) a momentů od jednotkového momentu (obrázek 48). Pořadnice a plochy jsou na obrázku 49.

$$\delta=\int_0^l \frac{M(x)\bar{M}(x)}{EI}dx=\frac{1}{EI}\left[A_1\ \eta_1+A_2\ \eta_2+A_3\ \eta_3+A_4\ \eta_4+A_5\ \eta_5+A_6\ \eta_6\right]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot\Bigg[(-101{,}4)\cdot\frac{1}{2}\cdot 15{,}6\cdot(-0{,}133)\cdot\frac{2}{3}+(-253{,}5)\cdot\frac{1}{2}\cdot 15{,}6\cdot\left(-0{,}133+\frac{2}{3}\cdot 0{,}666\right)+$$

$$+(-101{,}4)\cdot 15{,}6\cdot\frac{-0{,}133+0{,}533}{2}+\frac{2}{3}\cdot 380{,}25\cdot 15{,}6\cdot\frac{-0{,}133+0{,}533}{2}+\frac{1}{2}\cdot(-354{,}90)\cdot 15{,}6\cdot\frac{2}{3}\cdot$$

$$\cdot(-0{,}467)+\frac{2}{3}\cdot 380{,}25\cdot 15{,}6\cdot\frac{-0{,}467}{2}\Bigg]=$$

$$=\frac{1}{EI}\cdot\ [70{,}128-614{,}940-316{,}368+790{,}920+861{,}839-923{,}399]=$$

$$=\frac{1}{546{,}20\cdot 10^4}\cdot[-131{,}820]=-2{,}41\cdot 10^{-5}\,\mathrm{rad}$$

Odečtená hodnota z RFEMu nad podporou c činí $2{,}00 \cdot 10^{-4}$ rad pro jeden pás a $-2{,}00 \cdot 10^{-4}$ pro druhý pás (obrázek 207).
Číselný rozdíl pro větší hodnotu z RFEMU činí:
$2{,}00 \cdot 10^{-4}-2{,}41 \cdot 10^{-5}= 1{,}76\cdot 10^{-4}$ rad
V procentech je to:

$$\frac{2{,}00\cdot 10^{-4}\cdot 100}{2{,}41\cdot 10^{-5}}= 829{,}\ 88\ \%$$

Poměr vyjádřený v procentech mezi pootočením z ručního výpočtu a pootočením z modelu v RFEM je 829,88 %.

5. Model v RFEMu

5.1. Popis použitých prvků

Pro oba příhradové pásy byl zvolený model, kde jsou všechny prvky brány jako prutový prvek s klouby na konci.

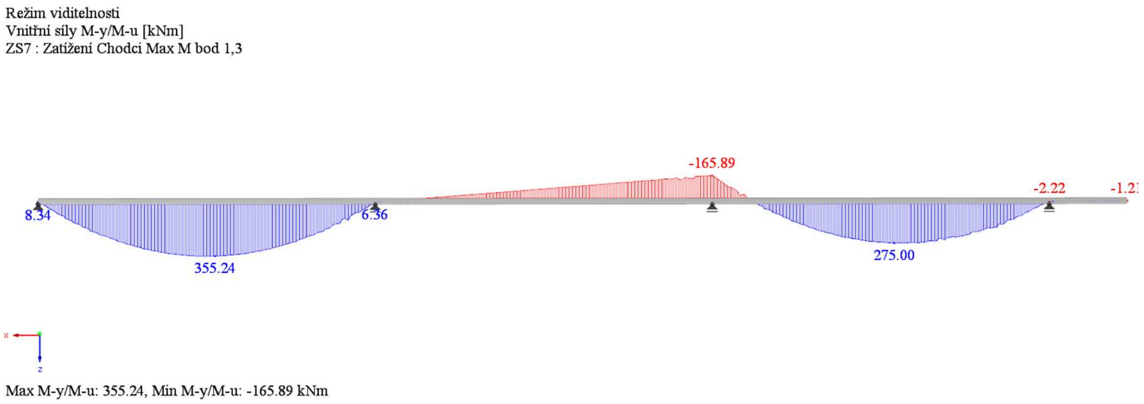
Mostovka je vymodelována jako spřažení prutu příčníku a prutu ŽB desky [2]. Tyto vzájemně kolmé pruty jsou spojeny společnými uzly a jsou modelovány na excentricitě. ŽB deska je uvažována v šířce 1,2 m, tj. v zatěžovací šířce mostnice.
Jak příčník, tak i ŽB deska jsou uvažovány jako prutový prvek. Délky jednotlivých prutů jsou ve vzdálenosti jednotlivých spřahovacích trnů.

Příčník zastřešení, který je v našem případě L-profil, je uvažován jako kloubově připojený prut, tj. prutový prvek s koncovými klouby.
Ocelový plech zastřešení bude brán jako rovinná deska.

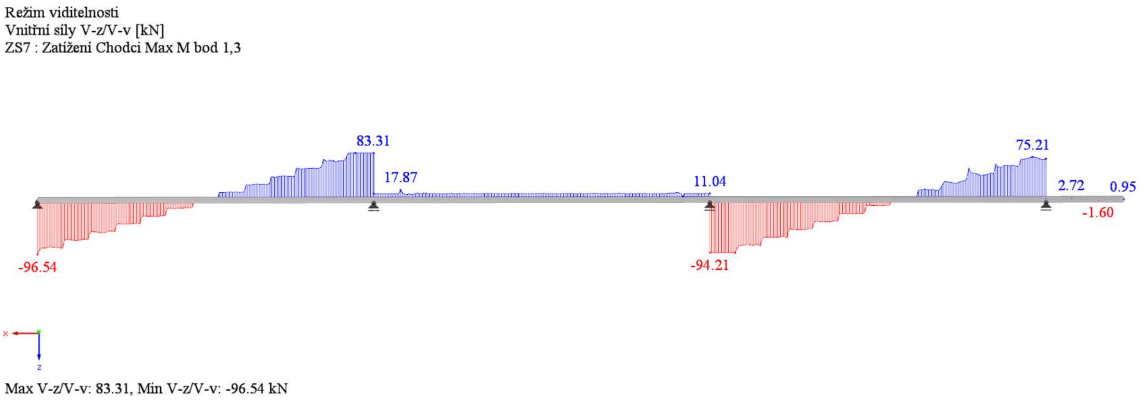
Obr. 50 Pohled na lávku v RFEMu

5.2.Numerická integrace lávky

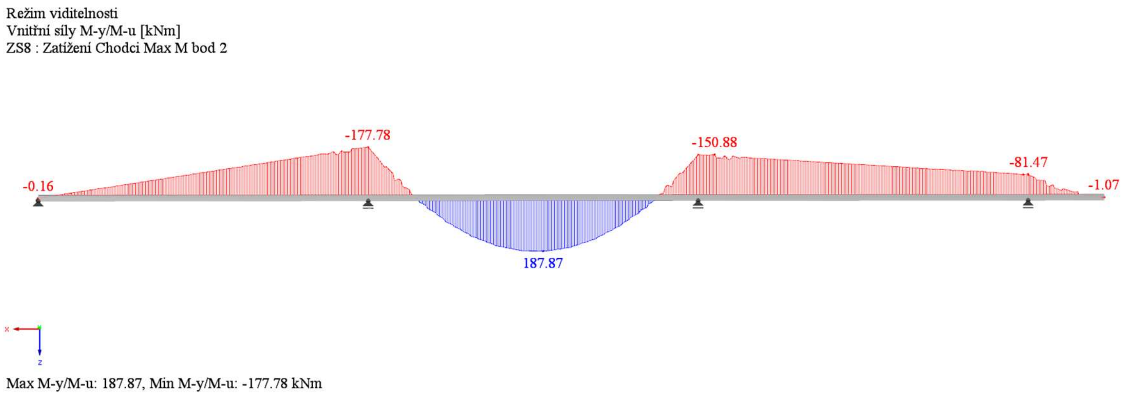
Provedeme numerickou integraci lávky v RFEMu, abychom zjistili průběh ohybových momentů M_y a posouvajících sil V_z převedených na prut. K tomuto účelu použijeme výsledkový prut.
Ze srovnání momentů a posouvajících sil z výsledkového prutu (obrázky 51, 52, 53, 54) a momentů a posouvajících sil z ručního výpočtu (obrázky 18 a 25) vyplývá, že průběhy jsou si podobné. Liší se však velikostí jednotlivých veličin a průběhem ohybového momentu nad podporou b.
Momenty a posouvající síly z výsledkového prutu (obrázky 55, 56, 57, 58) odpovídají průběhem momentům a posouvajícím silám z ručního výpočtu (obrázky 36 a 43). Velikosti vnitřních sil z ručního výpočtu a z výsledkového prutu jsou podobné.



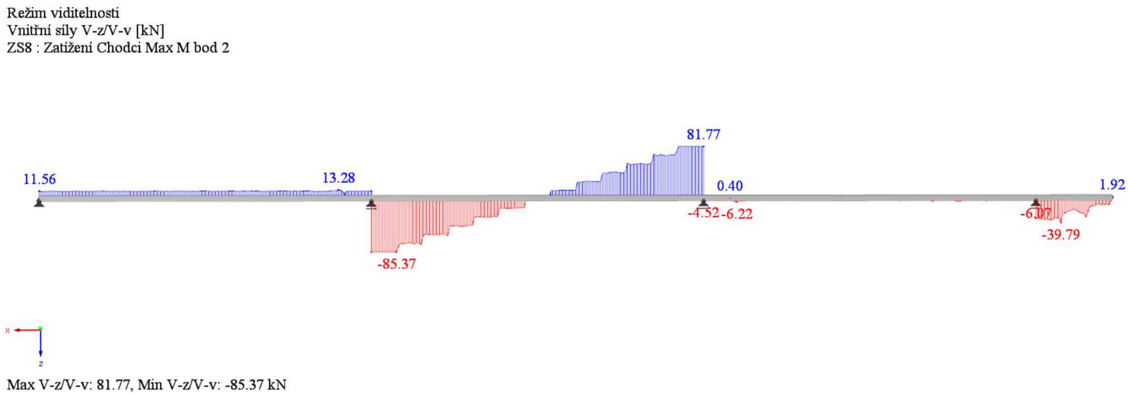
Obr. 51 Ohybový. Moment M_y v bodě 1, 3 vzniklý integrací lávky



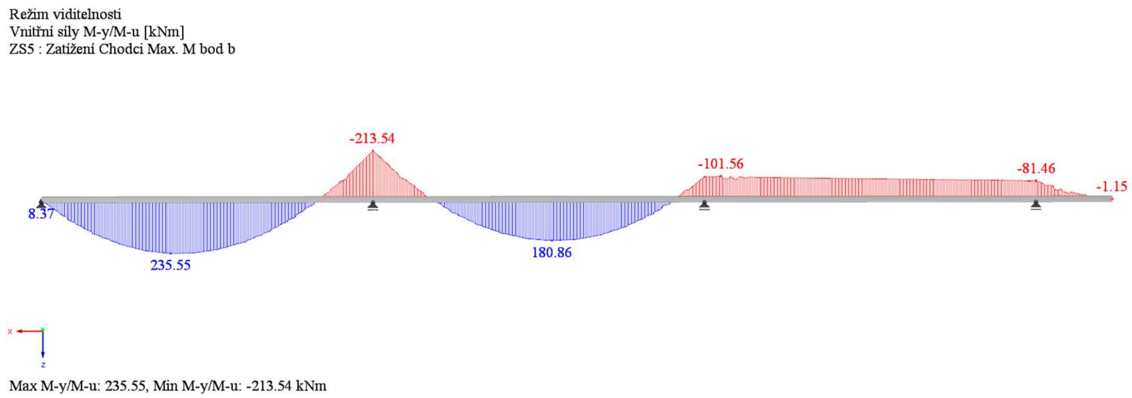
Obr. 52 Posouvající síla V_z v bodě 1, 3 vzniklá integrací lávky



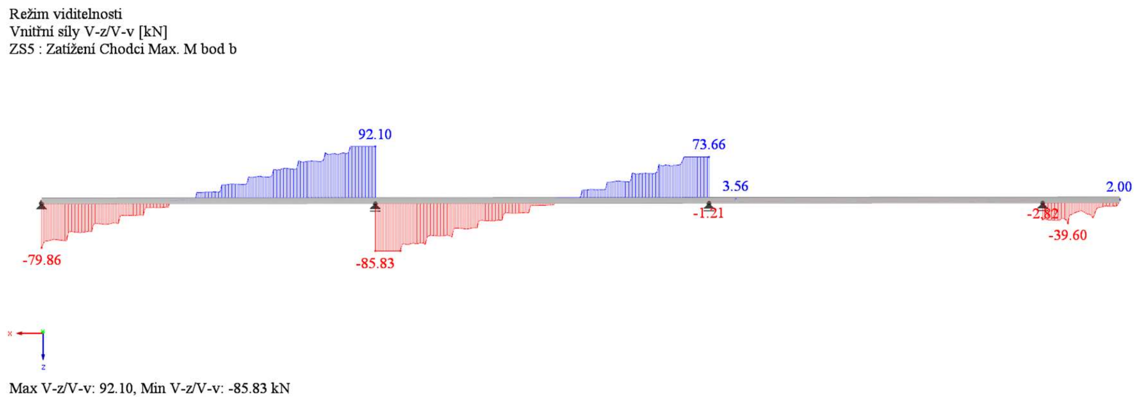
Obr. 53 Ohybový. Moment M_y v bodě 2 vzniklý integrací lávky



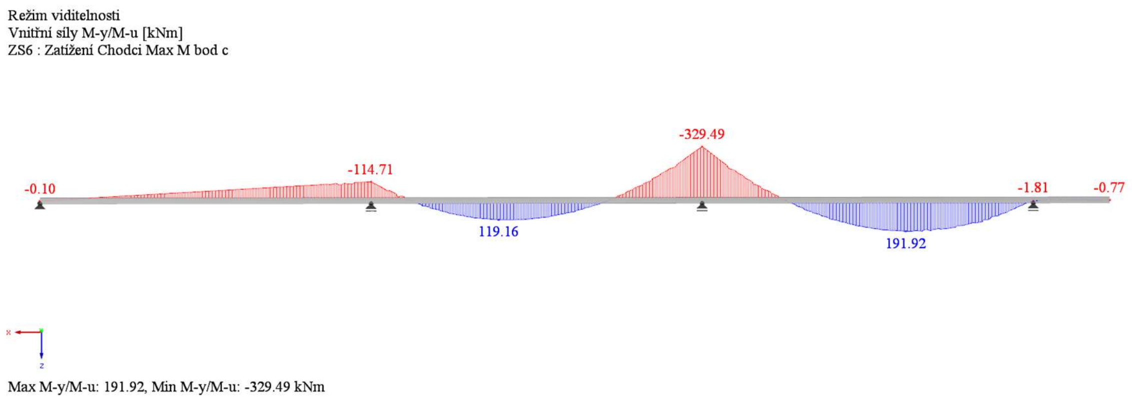
Obr. 54 Posouvající síla V_z v bodě 2 vzniklá integrací lávky



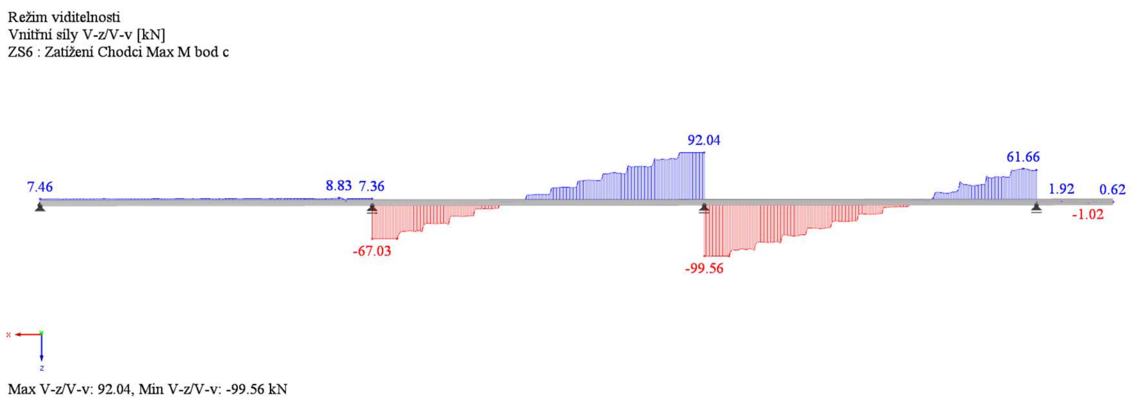
Obr. 55 Ohybový. moment M_y nad podporou b vzniklý integrací lávky



Obr. 56 Posouvající síla V_z nad podporou b vzniklá integrací lávky



Obr. 57 Ohybový. Moment M_y nad podporou c vzniklý integrací lávky



Obr. 58 Posouvající síla V_z nad podporou c vzniklá integrací lávky

6. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala vlivem statického zatěžování na lávku pro pěší. Ze zatížení bylo počítáno s vlastní tíhou, zatížením sněhem, větrem a zatížením chodci. Celkem na lávku působilo osm zatěžovacích stavů. Pro každé dané zatížení se výpočtem pomocí metody konečných prvků v programu RFEM zjistili vnitřní síly. Cílem práce bylo zjistit průběh a velikost vnitřních sil na lávce a porovnat je s ručním výpočtem.

Pro potřeby ručního výpočtu byla lávka uvažována jako spojitý nosník o třech polích a převislém konci. Tuhost průřezu se dopočítala pomocí průhybu lávky, která byla pro tento účel upravena na prostý nosník. Následně byly pomocí třímomentových rovnic stanoveny ohybové momenty a posouvající síly. Počítali jsme se dvěma typy zatížení, se spojitým liniovým zatížením chodci a s jednotkovou silou, resp. jednotkovým momentem. Ke zkontrolování daných veličin jsme použili deformační metodu. Byl použit výpočet pořadnic příčinkových čar na staticky neurčité konstrukci. Dané pořadnice byly porovnány s příčinkovými čarami z RFEM. Pomocí příčinkových čar bylo umístěno spojité zatížení pro výpočet maximálních momentů. Metodou jednotkových sil byly spočítány posunutí a pootočení. K výpočtu byly použity momenty od zatížení chodci a momenty od jednotkového zatížení.

Ze srovnání ručního výpočtu a výpočtů v RFEMu pomocí konečných prvků vyplývá, že u modelu z RFEMU bylo dosaženo větších hodnot pootočení než u ručního výpočtu. U posunutí jsou hodnoty srovnatelné. Co se týká srovnání ohybových momentů a posouvajících sil u zatížení, kde uvažujeme maximální moment nad podporou, tak průběhy byly shodné a velikosti posouvajících sil a ohybových momentů byly podobné. U srovnání momentů vyvozující největší ohybový moment v poli byly velikosti vnitřních sil blízké, průběhy byly totožné. Výjimku představoval maximální moment v poli číslo jedna. Zde nedosahoval moment, získaný z výsledkového prutu v RFEMu, záporných hodnot u podpory b jako moment z ručního výpočtu. Rozdíly mezi ručním výpočtem a modelem z RFEMu mohou vycházet ze skutečnosti, že u prostorového modelu jsou nad podporami vynechané diagonály.

Z prostorového modelu lávky z RFEMu se braly hodnoty a průběhy pro normálové síly N, posouvající síly V_z a V_y, ohybové momenty M_y a M_z a kroutící moment M_t.

7. Seznam použité literatury

[1] https://mapy.cz/zakladni?x=16.6629648&y=49.2955292&z=19&base=ophoto. [Online]

[2] https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni/podpora/databaze-znalosti/001490. [Online]

[3] *Norma: ČSN EN 1991-1-3, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem.*

[4] https://www.fine.cz/napoveda/finec/cs/zatizeni-snehem-01/. [Online]

[5] https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/143-mapa-snehovych-oblasti-na-uzemi-ceske-republiky. [Online]

[6] https://www.dlubal.com/cs/reseni/online-sluzby/oblasti-zatizeni-snehem-vetrem-a-zemetresenim. [Online]

[7] *Norma: ČSN EN 1991-1-4, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem.*

[8] http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B)%20TEORIE/Zatizeni%20vetrem%20-%20teorie%20+%20norma.pdf. [Online]

[9] *Norma: ČSN EN 1991-2, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou.*

[10] Kadlčák, J., Kytýr, J.:. *Statika stavebních konstrukcí II.* Brno : VUTITUM, 2004.

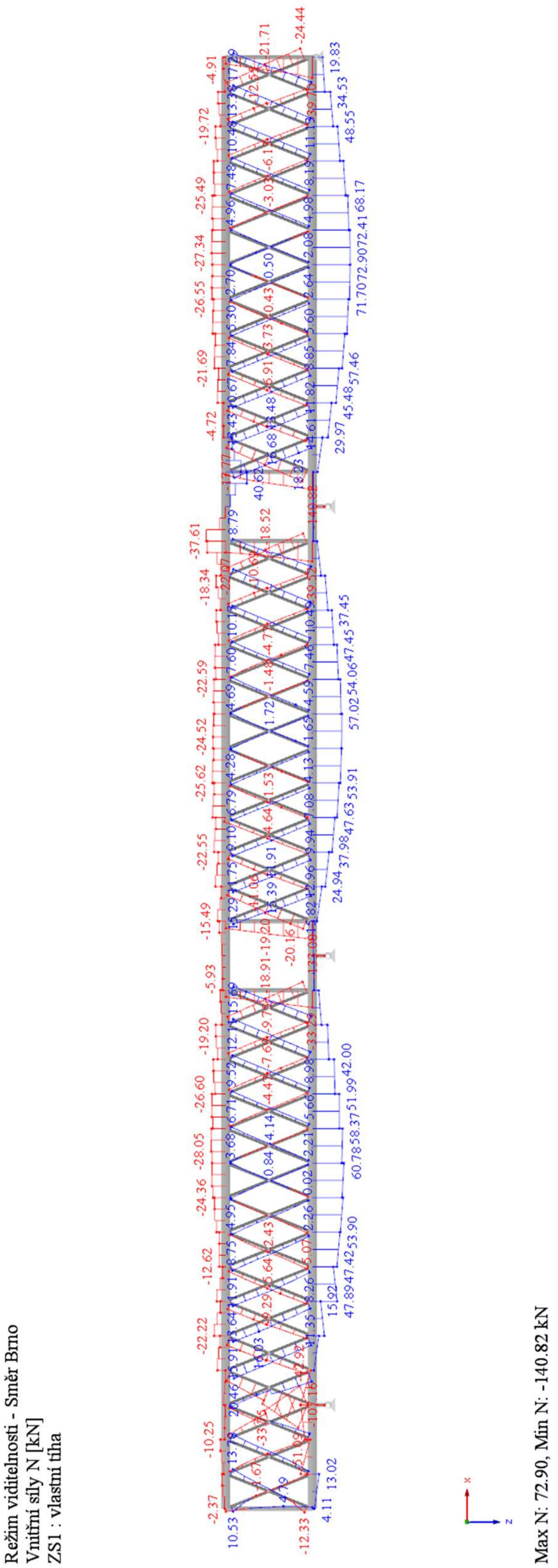
8. Seznam obrázků

9. Seznam grafů

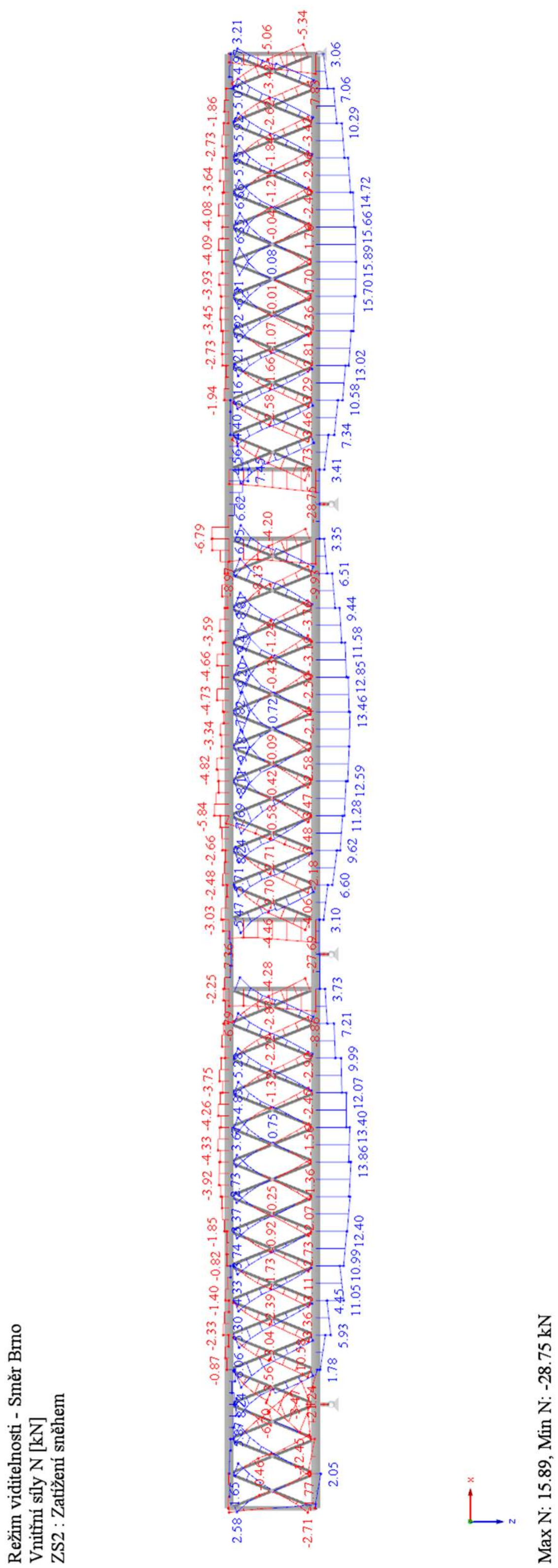
10. Přílohy

10.1. Vnitřní síly v příhradovém pásu – směr Brno

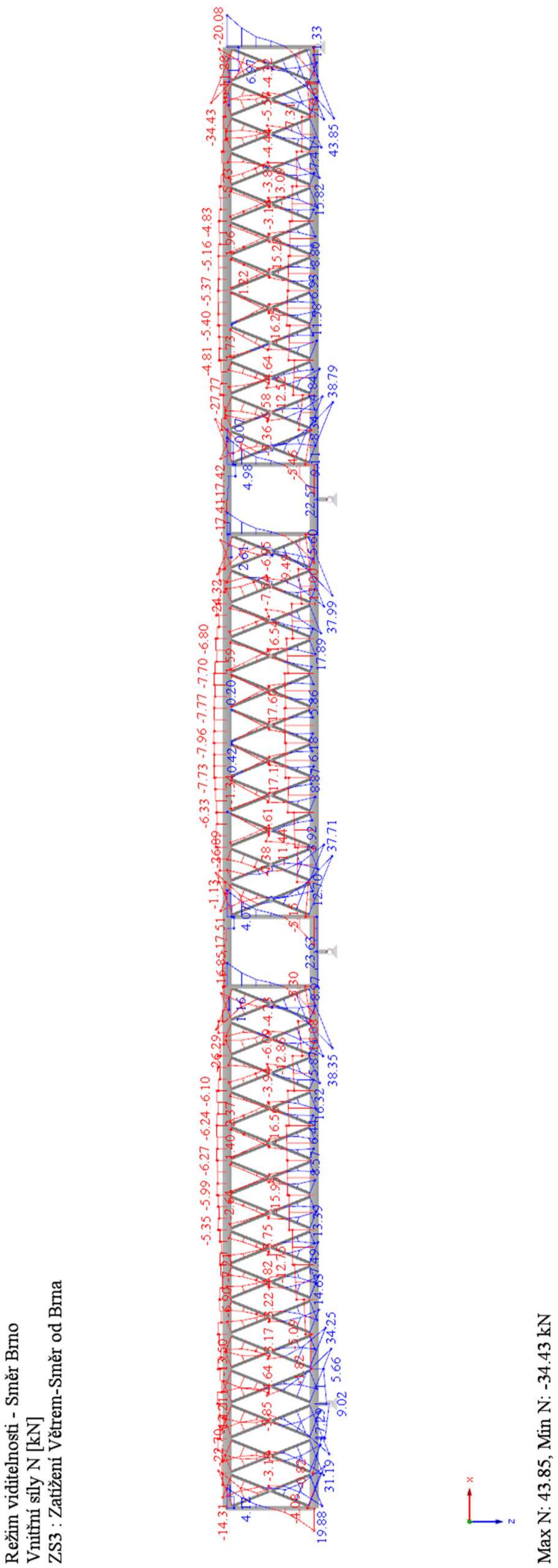
10.1.1. Normálová síla N



Obr. 59 Normálová síla N od vlastní tíhou

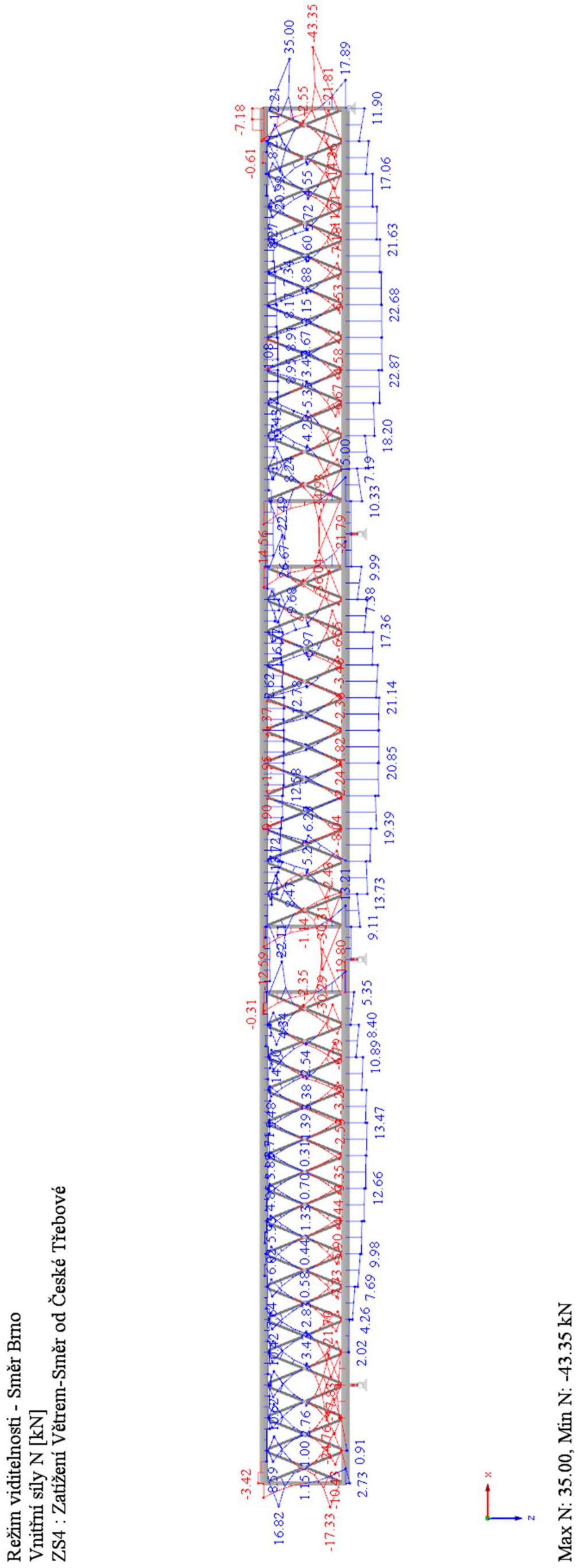


Obr. 60 Normálová síla N od zatížení sněhem



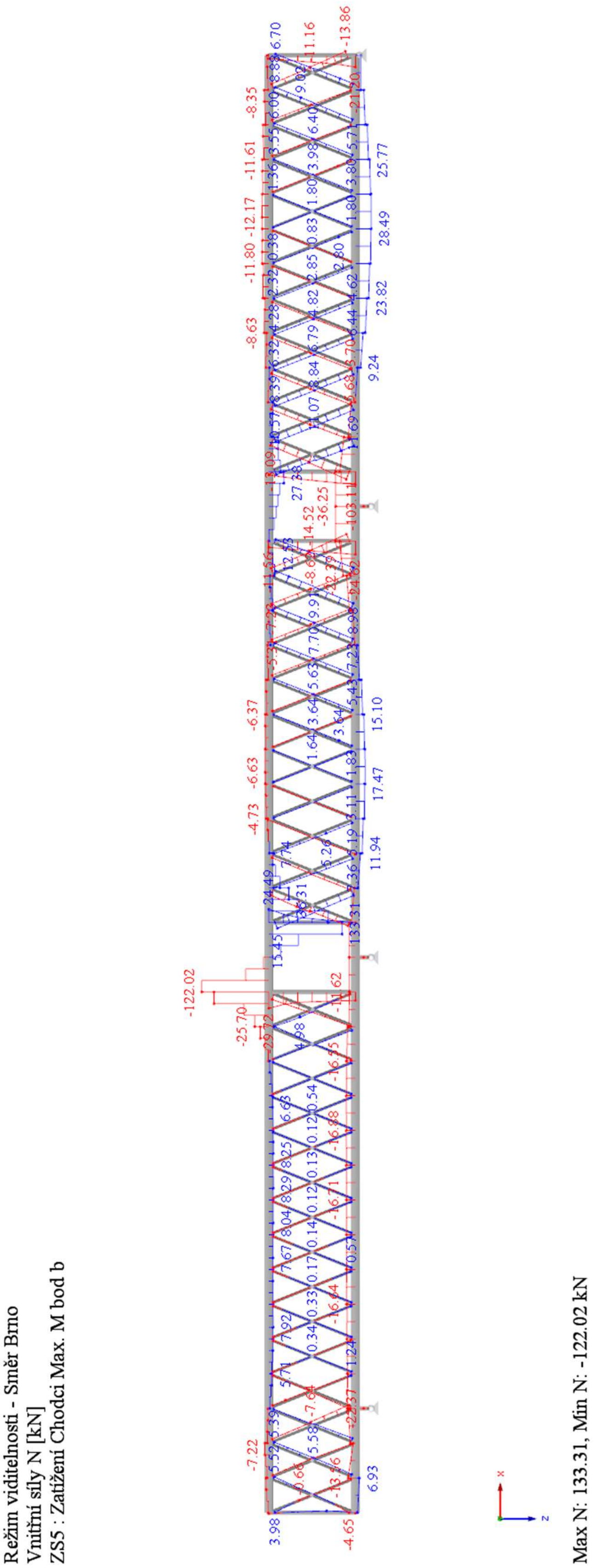
Obr. 61 Normálová síla N od zatížení větrem

(směr od Brna)

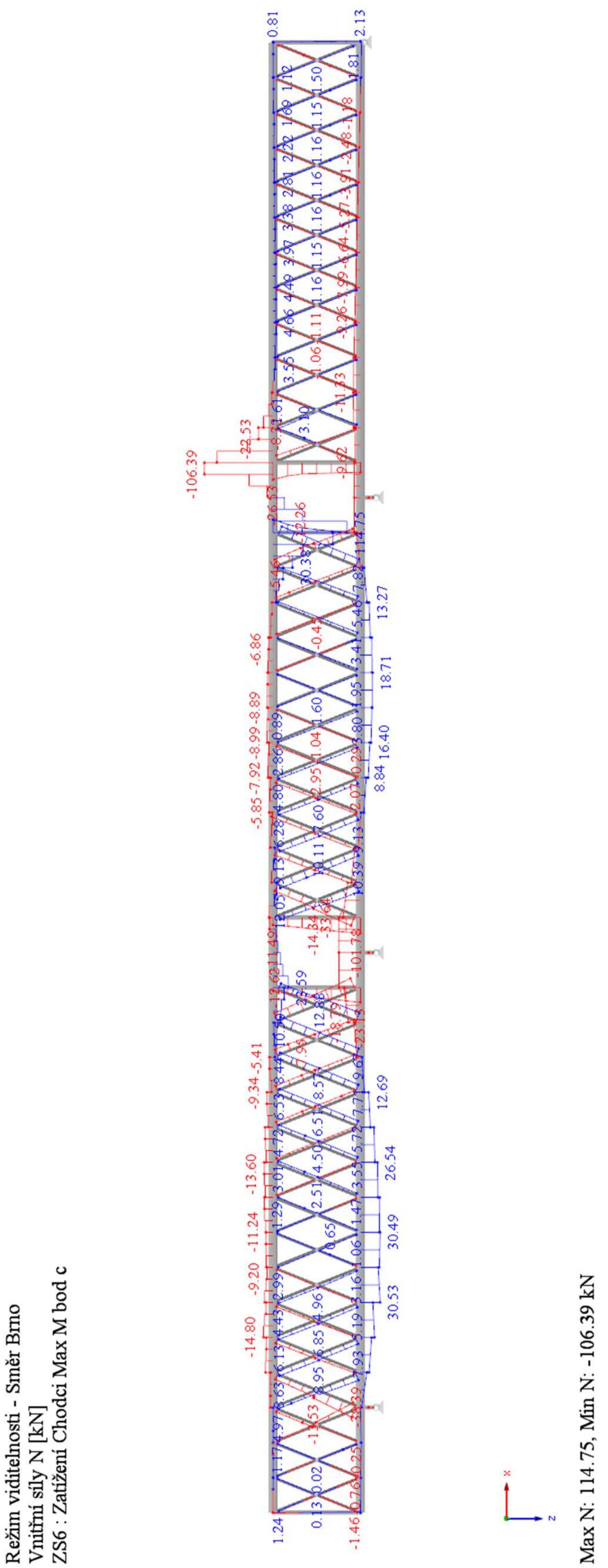


Obr. 62 Normálová síla N od zatížení větrem

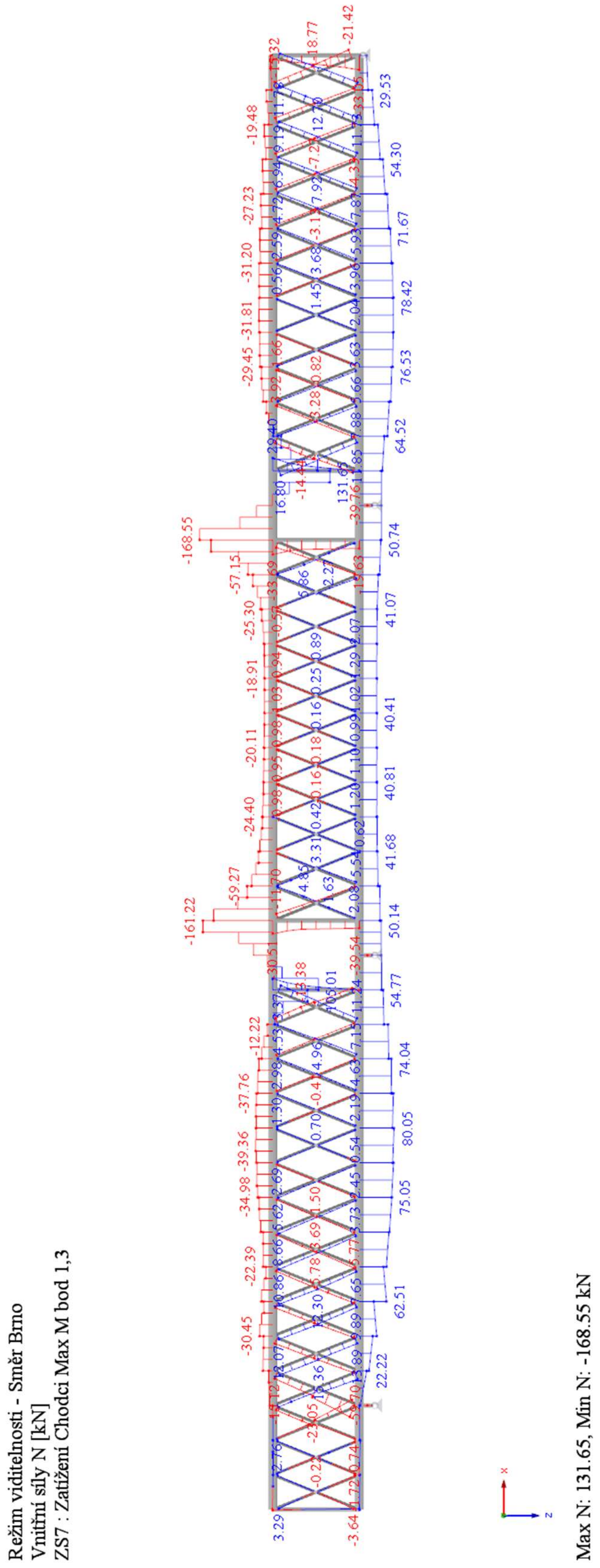
(směr od Č. T.)

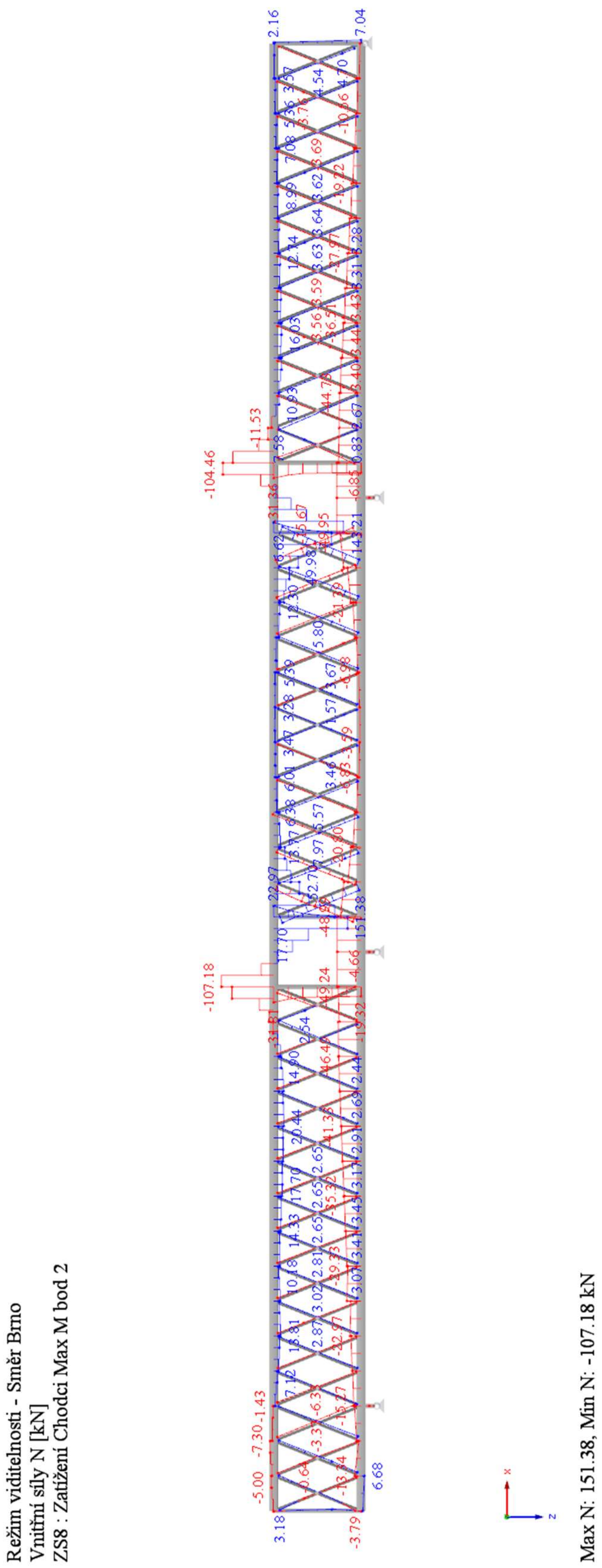


Obr. 63 Normálová síla N od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 64 Normálová síla N od zatížení chodci max M (podpora c)



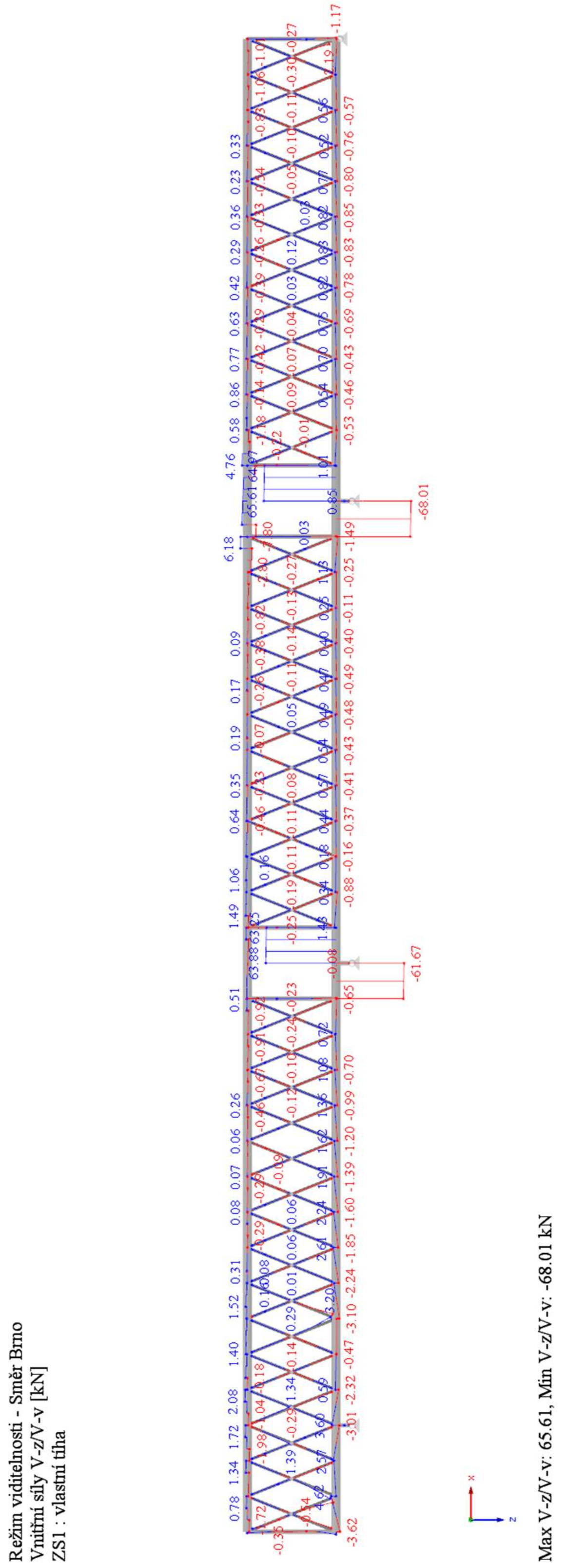


Obr. 65 Normálová síla N od zatížení chodci max M (bod 1, 3)

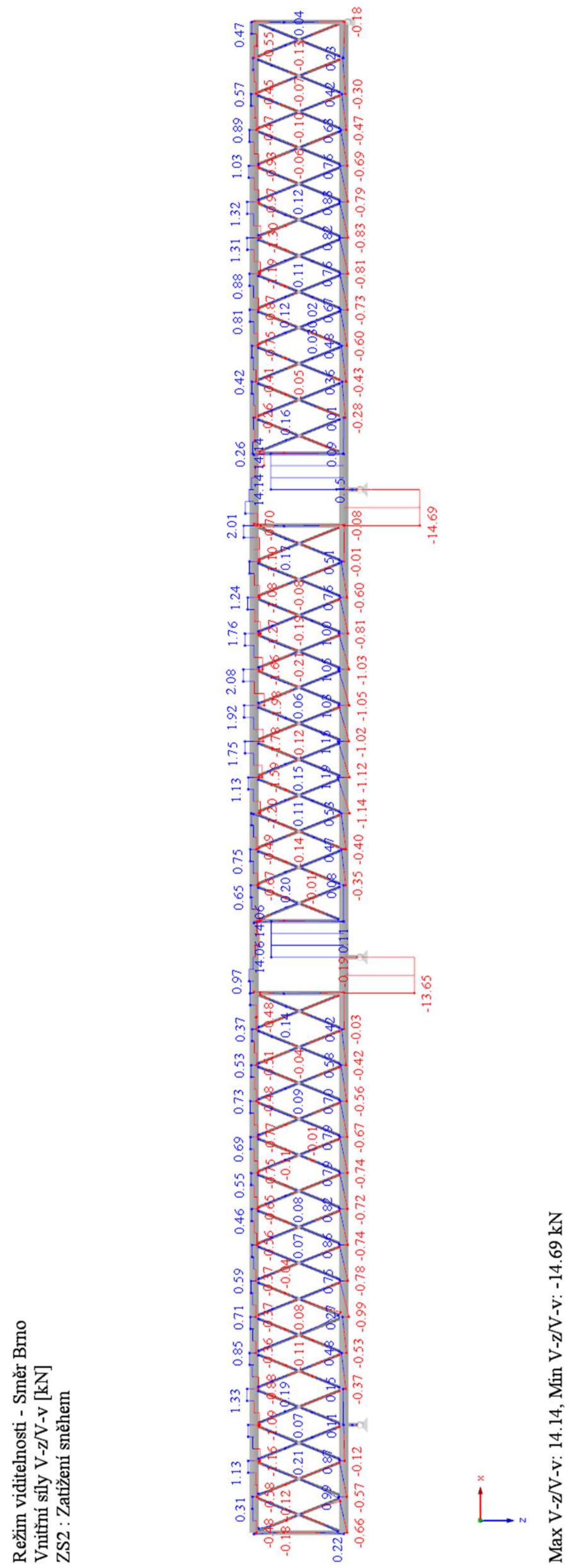
Obr. 66 Normálová síla N od zatížení chodci max M (bod 2)

Jak je z obrázků 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65 a 66 patrné, tak jak horní i dolní pás můžou být pří různých zatěžovacích stavech namáhány jak na tlak, tak i na tah. Horní pás je nejvíce namáhán zatížením chodci, a to v oblasti vnitřních sloupků.
Sloupky jsou namáhané jak na tlak, tak i na tah.
U diagonál existuje namáhání tahem i tlakem. Největší velikosti normálových sil jsou v diagonálách, které jsou co nejblíže podpěrám. U části diagonál je průběh normálových sil nelineární. Největší normálové síly v diagonálách jsou od zatížení větrem (obrázek 61, 62).

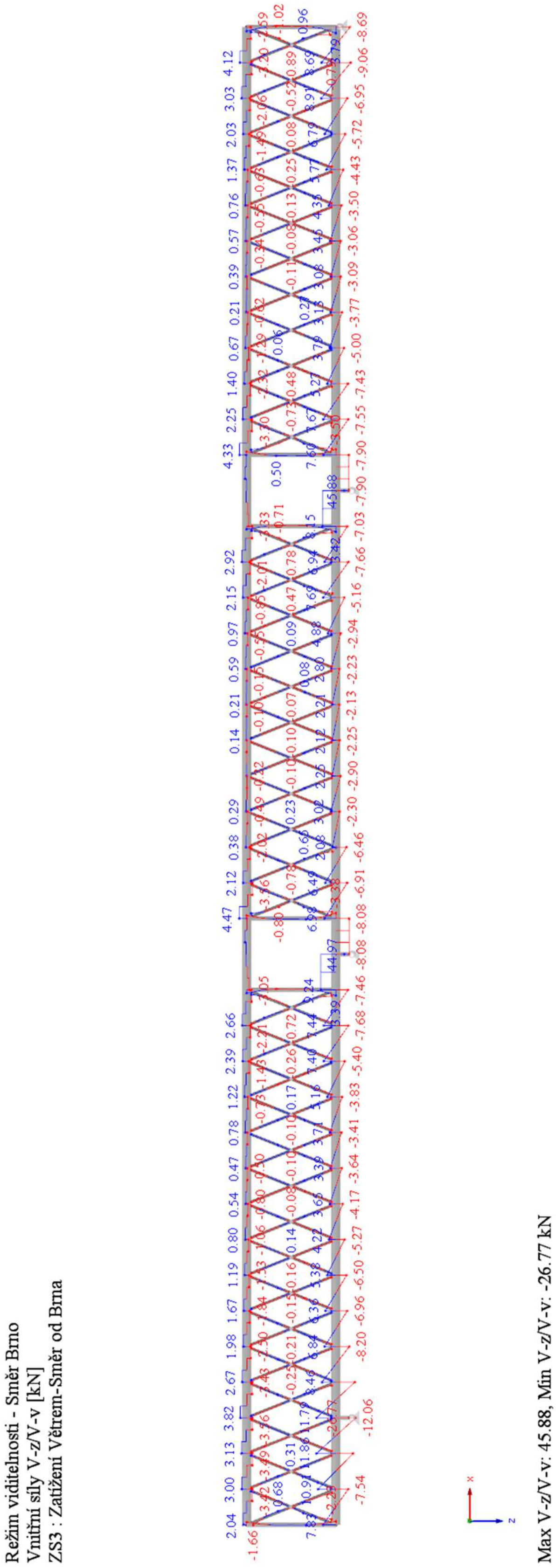
10.1.2. Posouvající síla V_z



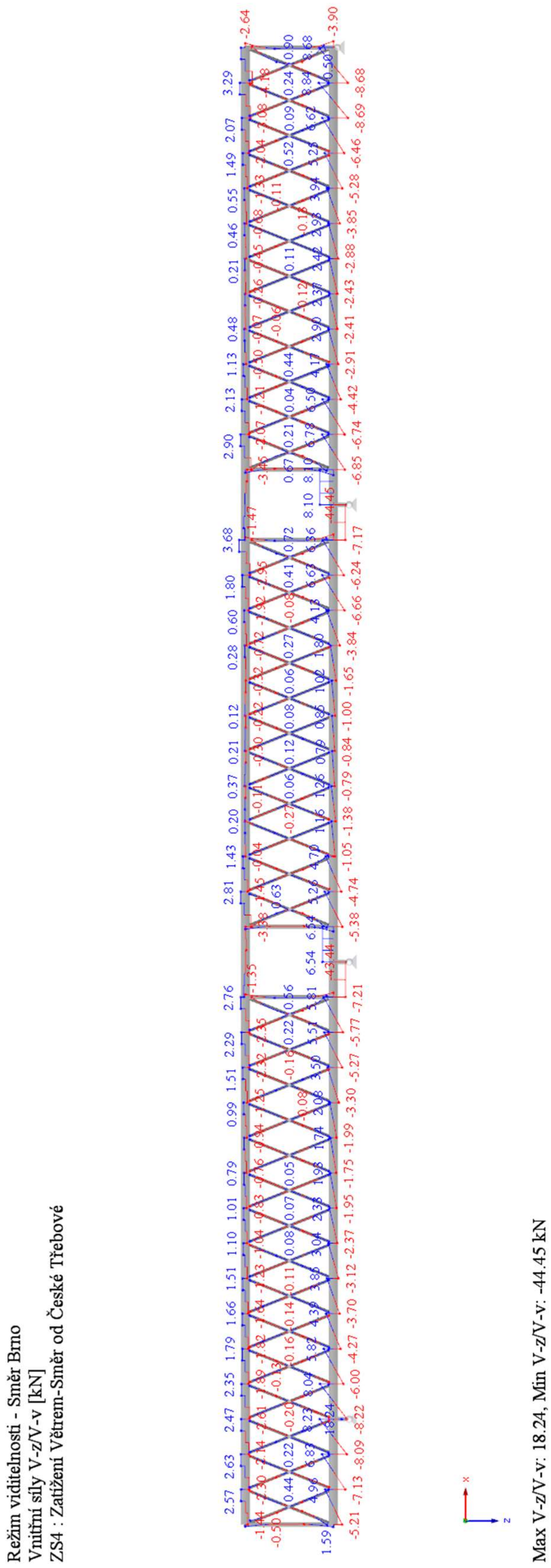
Obr. 67 Posouvající síla V_z od vlastní tíhy



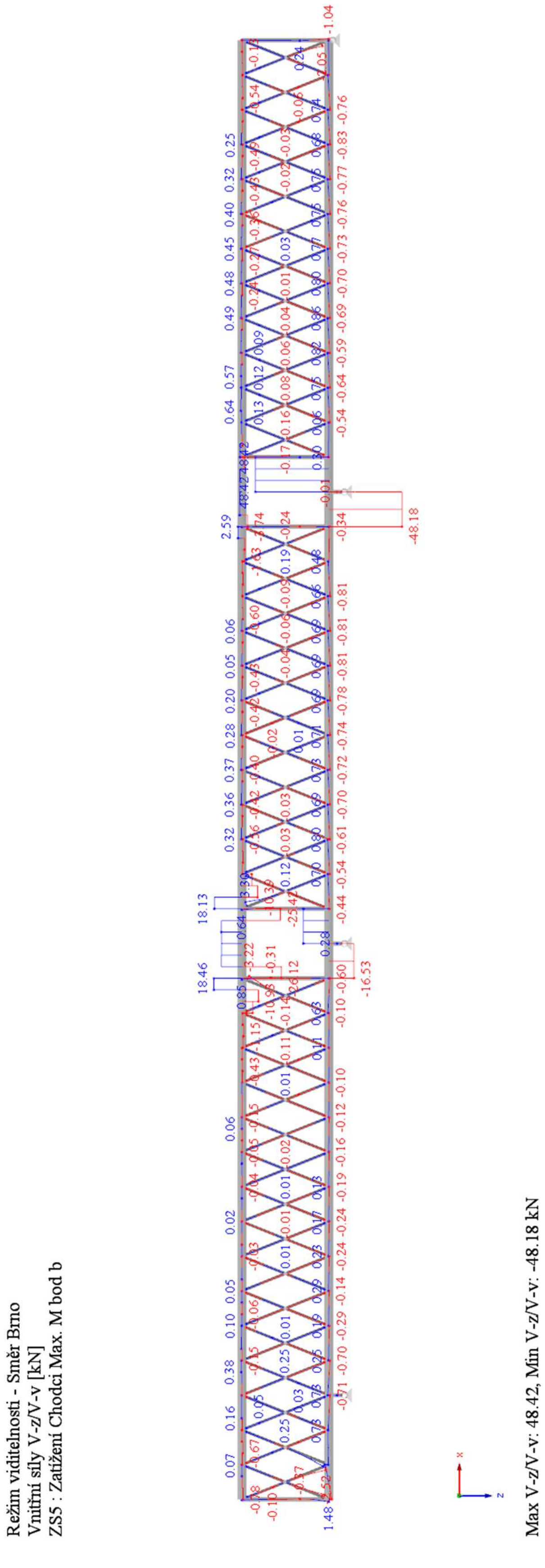
Obr. 68 Posouvající síla V_z od zatížení sněhem



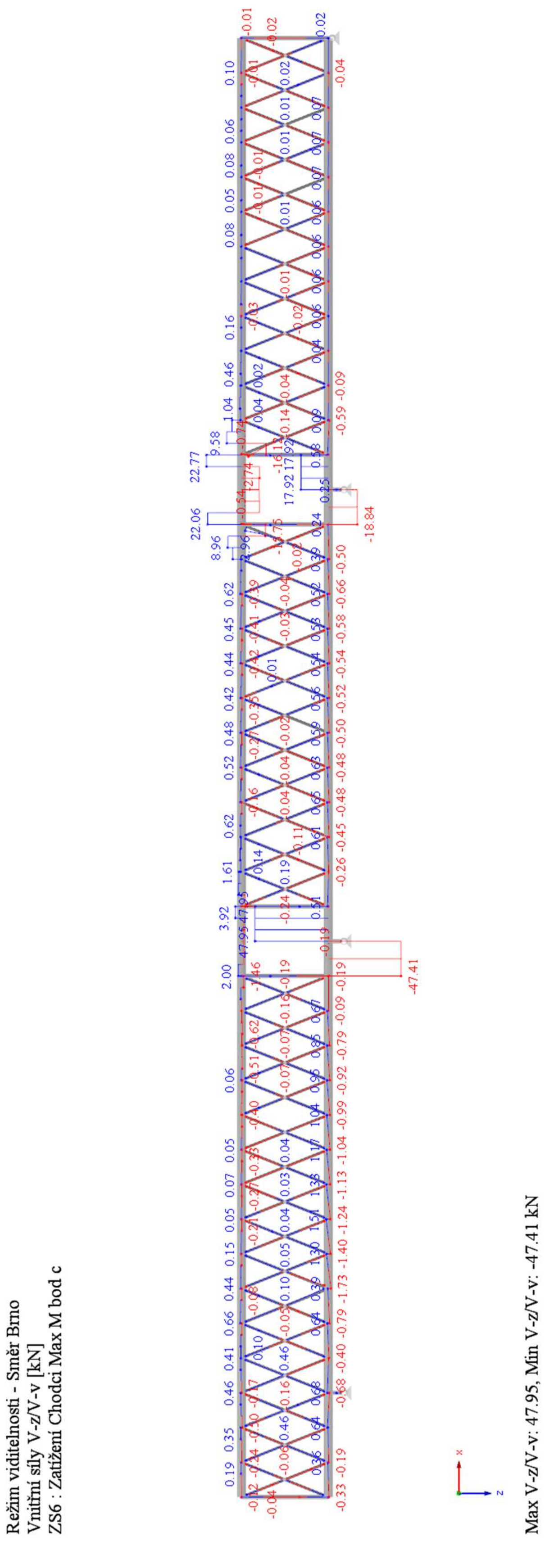
Obr. 69 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Brna)



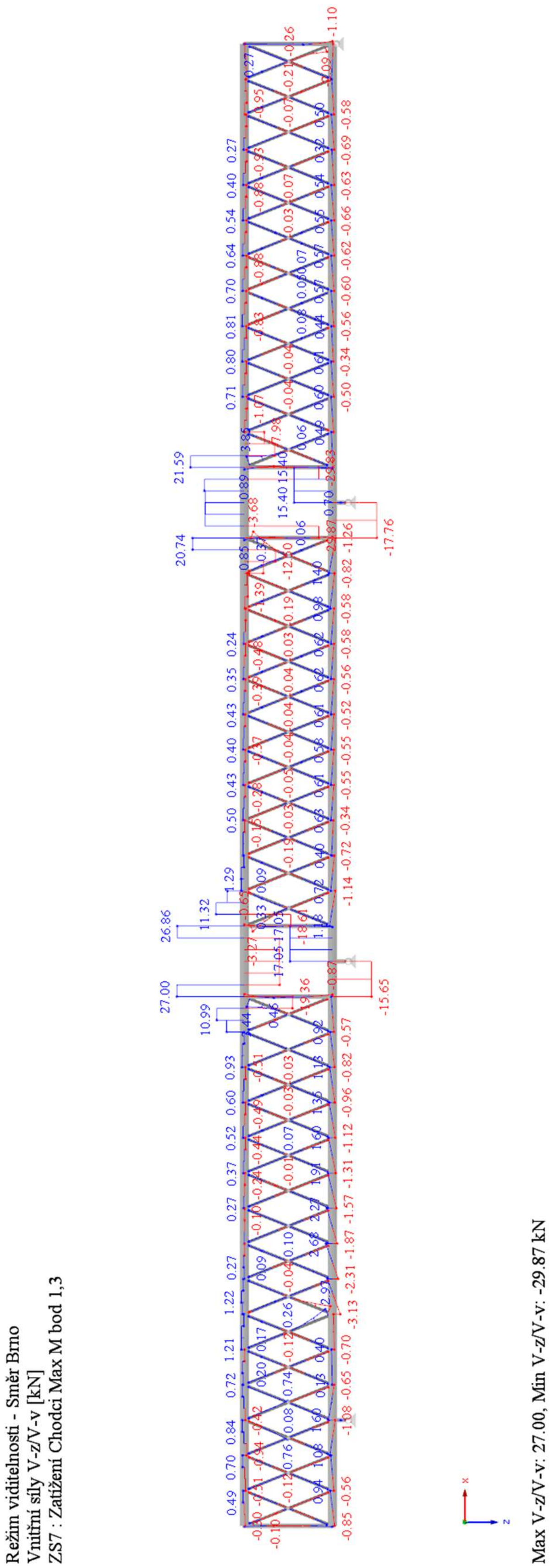
Obr. 70 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Č. T.)



Obr. 71 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M (podpora b)

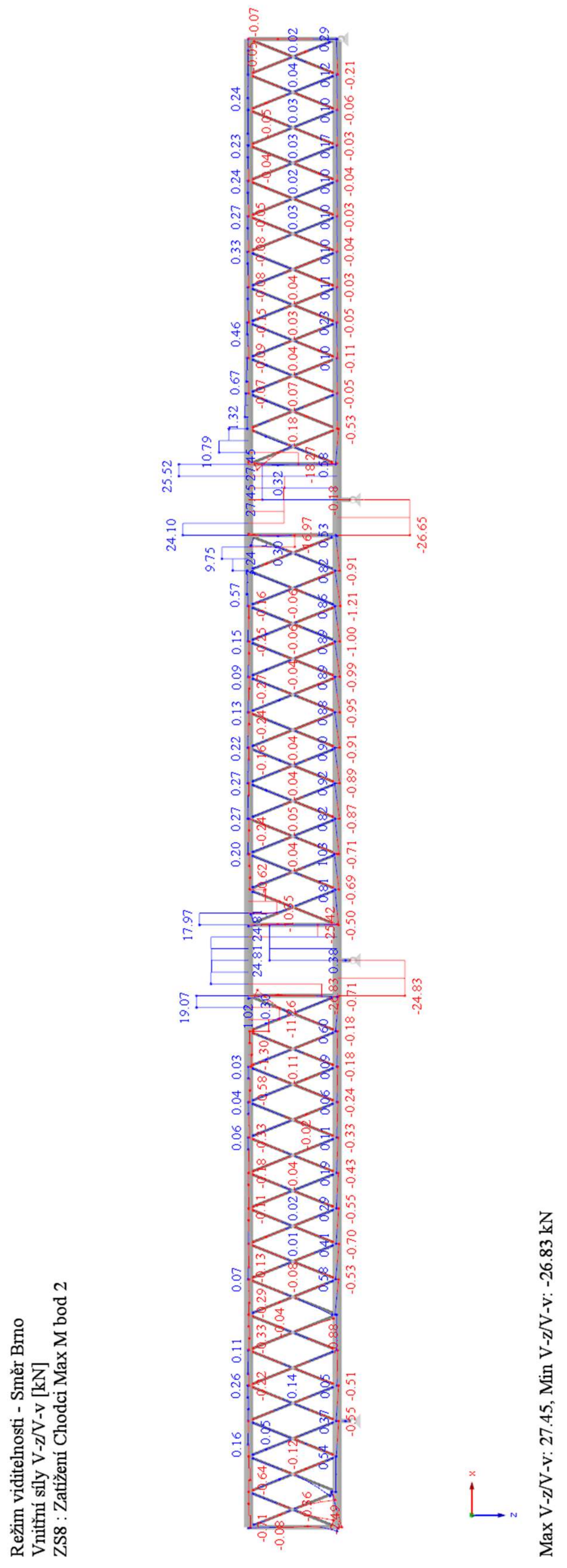


Obr. 72 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M (podpora c)



Obr. 73 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M

(bod 1, 3)

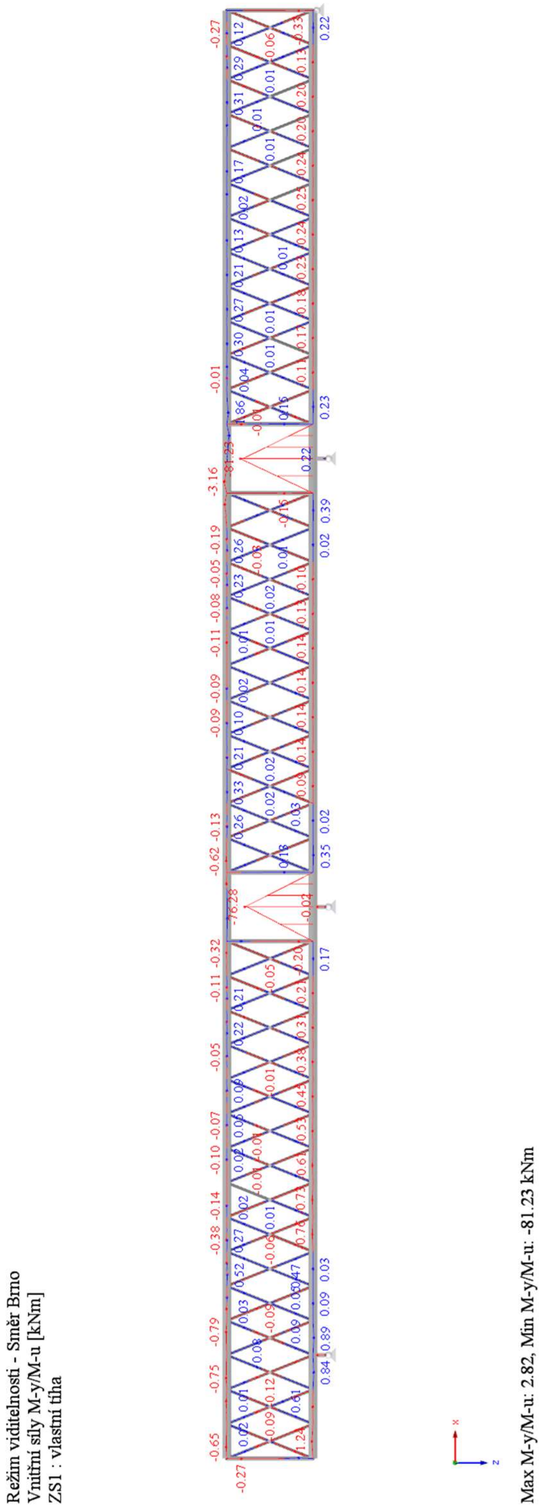


Obr. 74 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M

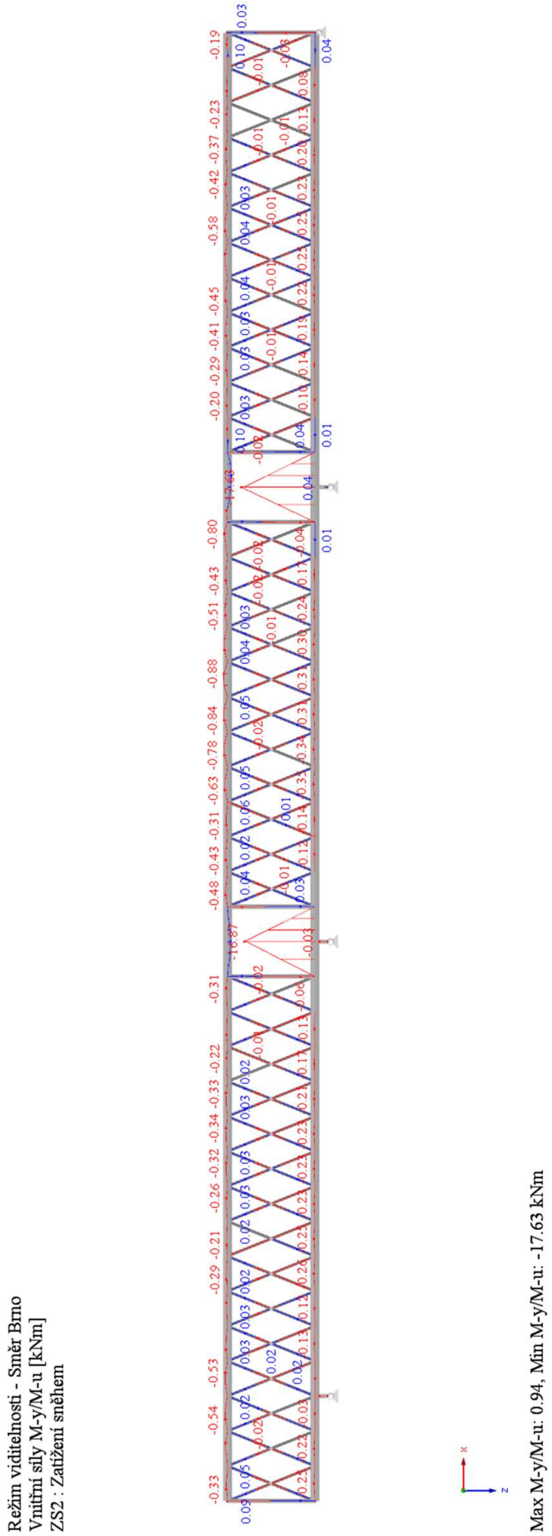
(bod 2)

Posouvající síla V_z dosahuje bez ohledu na zatížení maximálních hodnot v dolním páse nad vnitřními podporami (obrázek 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74).
U zatěžovacích stavů, které mají vyvolat maximální momenty uprostřed nosníku nebo nad podporami (obrázek 71, 72, 73, 74), dosahuje posouvající síla největších hodnot v horním pásu na prutech, které náleží k sloupkům. Jelikož není horní pás přímo zatěžován chodci, tak se tyto síly musí dostat do horního pásu pomocí sloupků, u kterých jsou to normálové síly N.
U horního a dolního pásu je vidět vliv L-profilů a mostnic, které přenáší zatížení na příhradové pásy. U podpory d je vidět, že průběh posouvajících sil dolního pásu je totožný jako v libovolném místě dolního pásu, kde jsou diagonály.

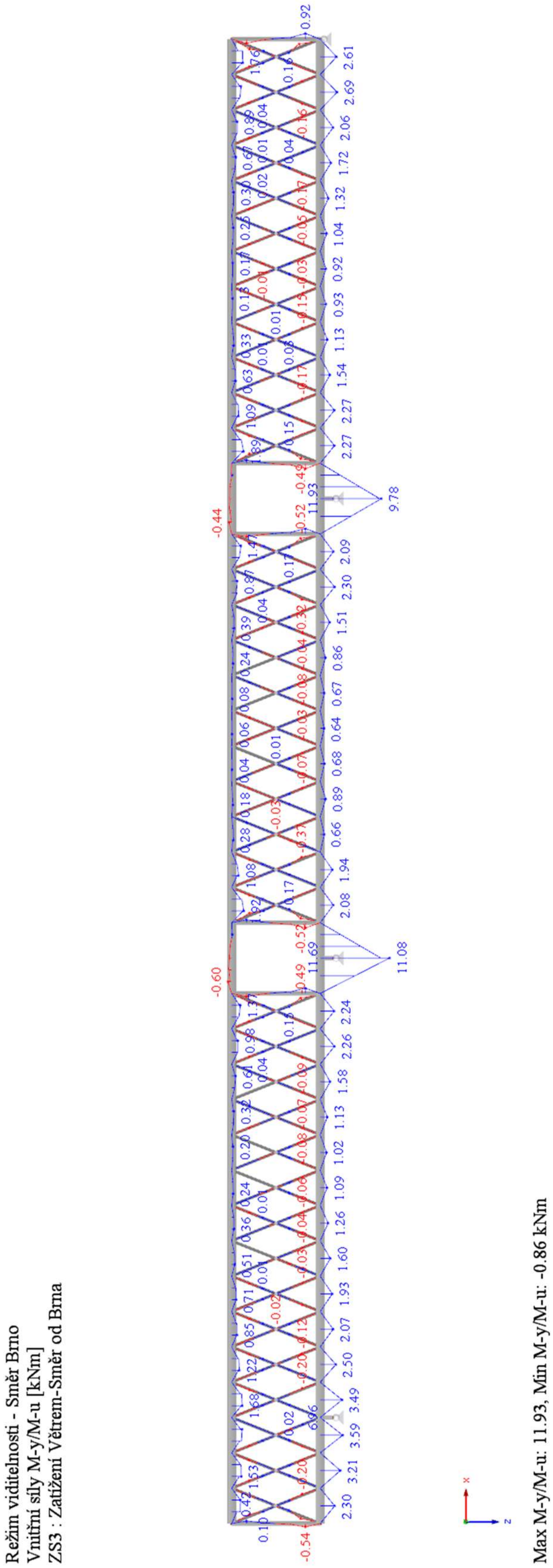
10.1.3. Ohybový moment M_y



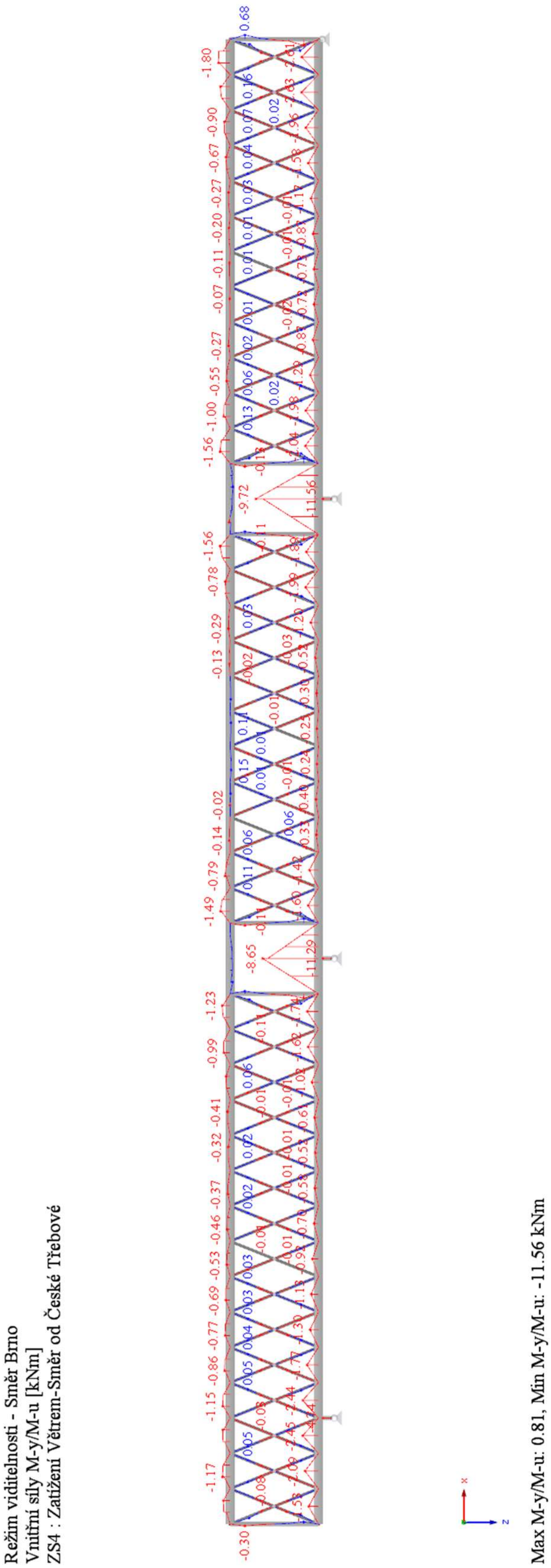
Obr. 75 Ohybový moment M_y od vlastní tíhy



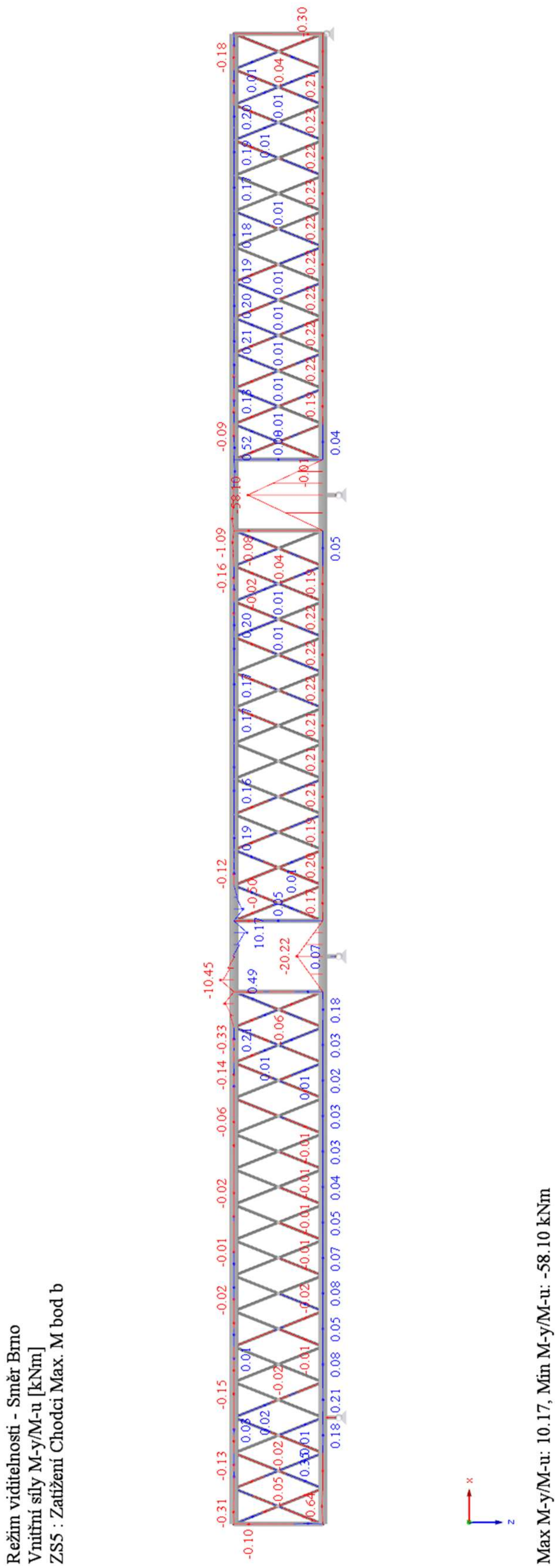
Obr. 76 Ohybový moment M_y od zatížení sněhem



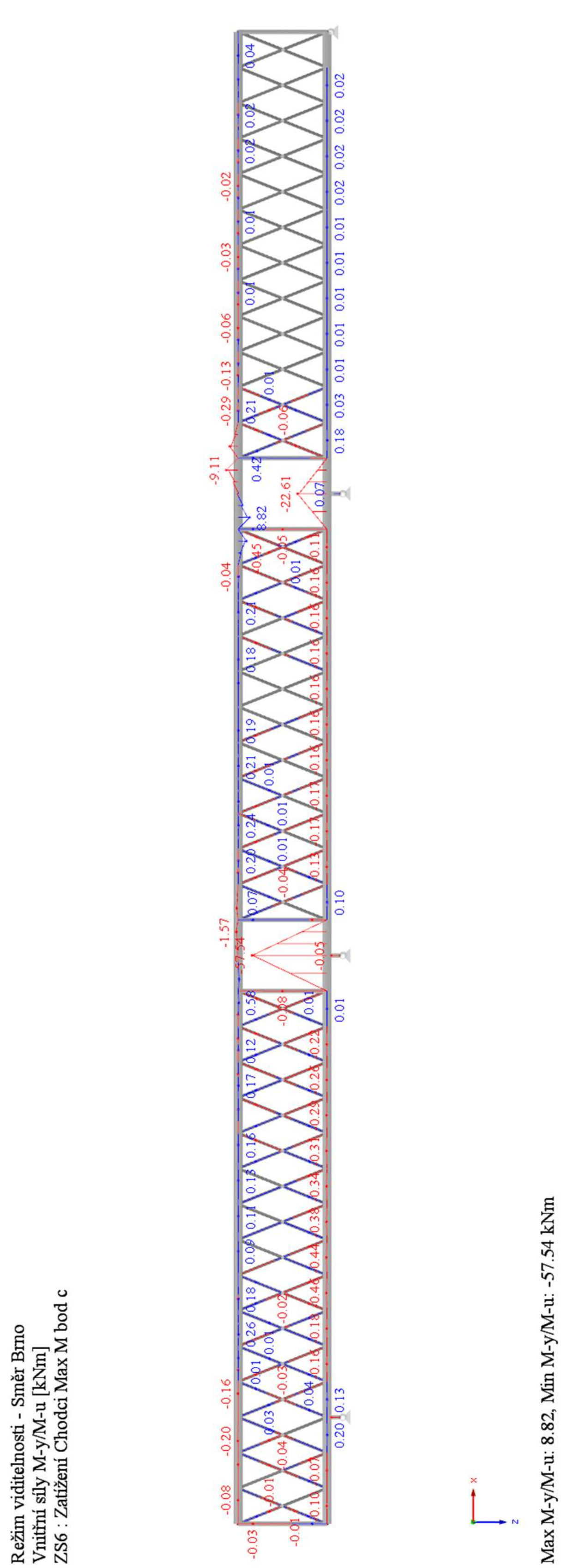
Obr. 77 Ohybový moment My od zatížení větrem (směr od Brna)



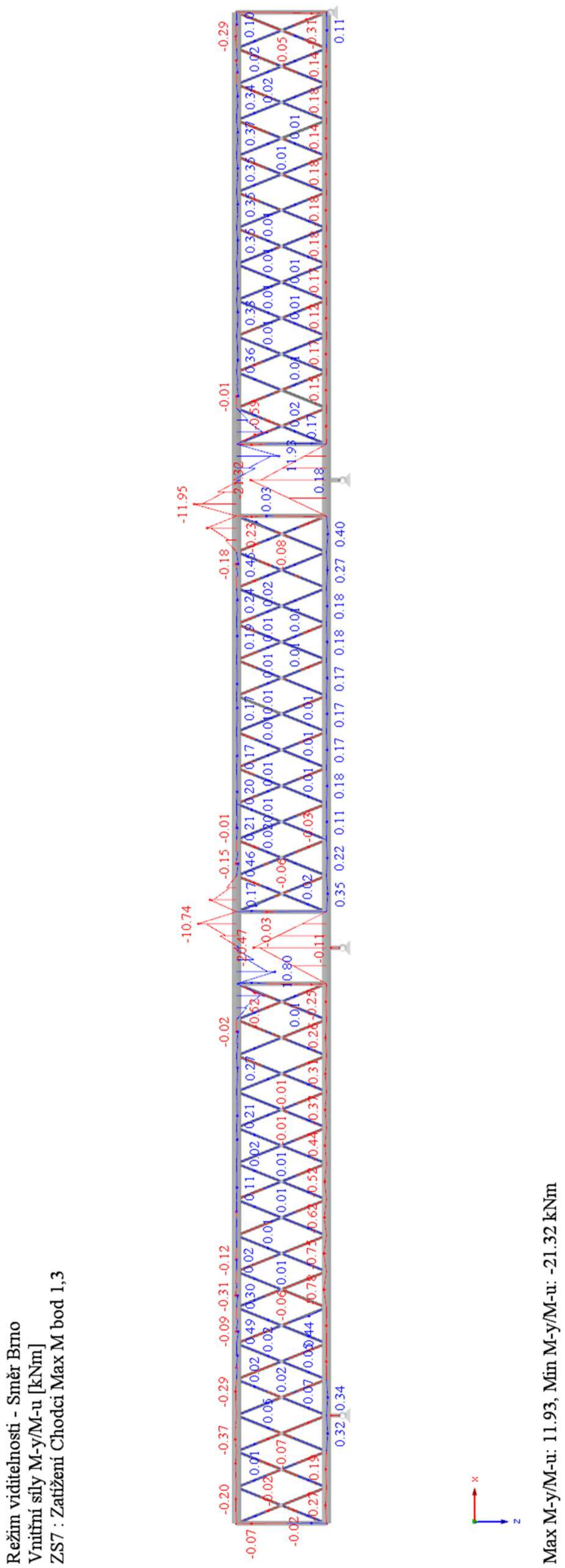
Obr. 78 Ohybový moment My od zatížení větrem (směr od Č. T.)



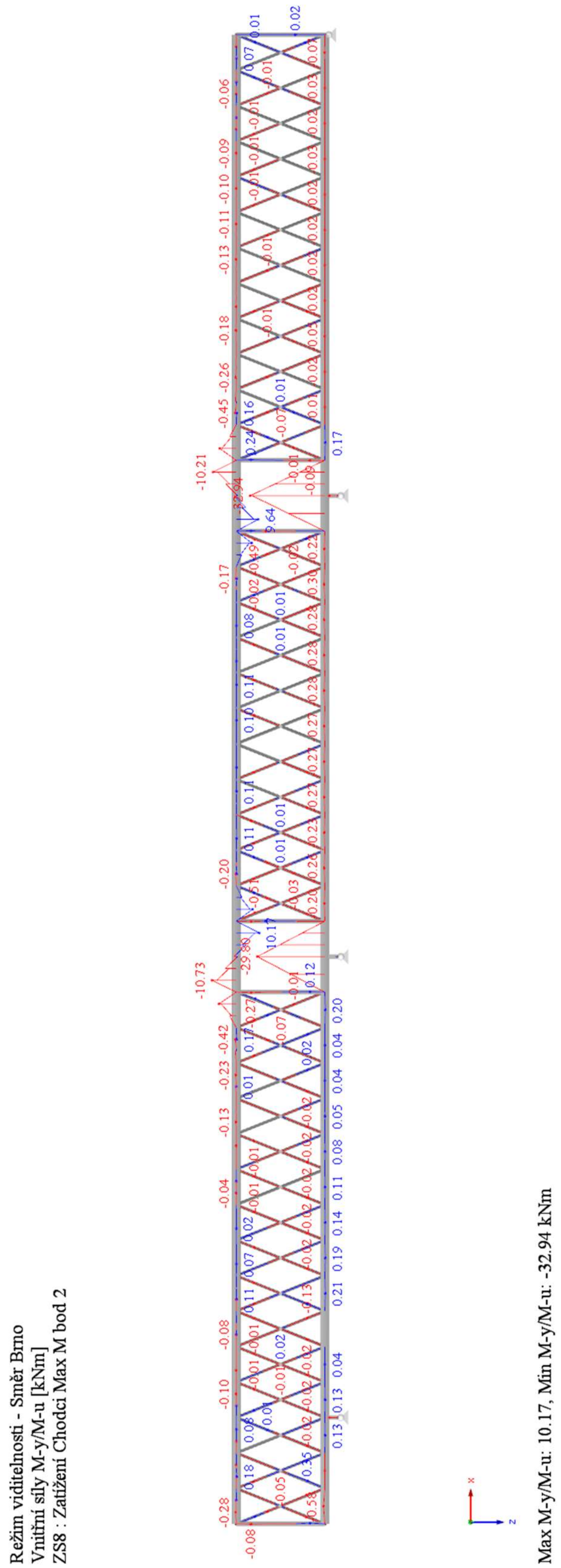
Obr. 79 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 80 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (podpora c)



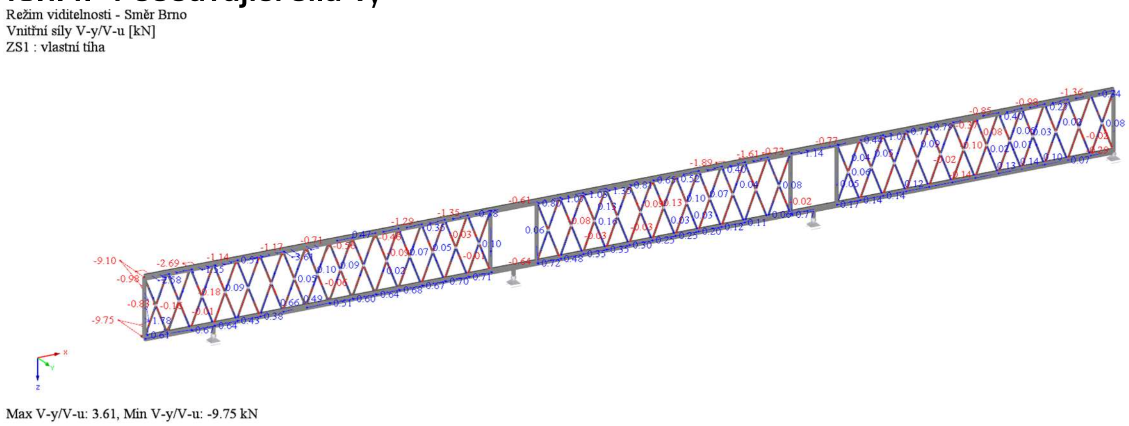
Obr. 81 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (bod 1, 3)



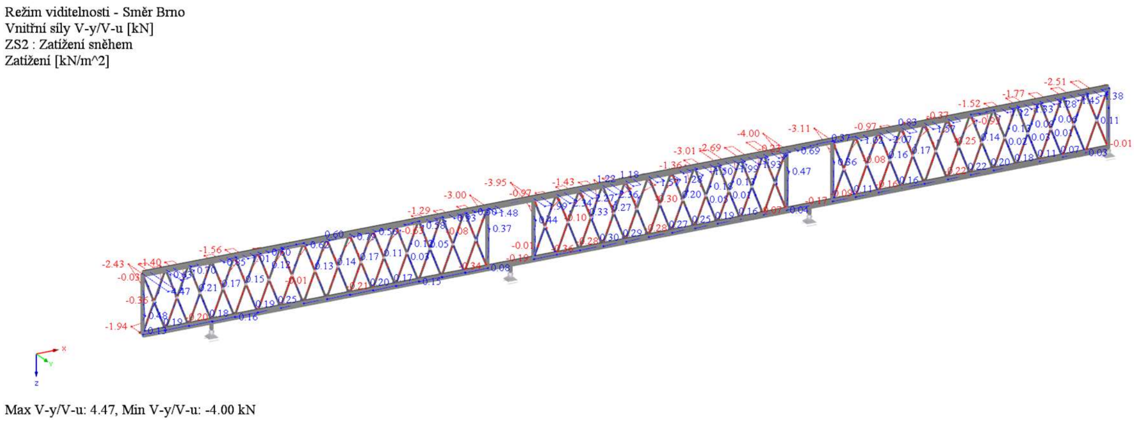
Obr. 82 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (bod 2)

Největší ohybový moment se nachází v dolním pásu nad podporami b, c. Velikost tohoto momentu je tady největší ve všech zatěžovacích stavech (obrázek 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81 82).
U zatížení větrem vznikají momenty i v dolním a horním pásu mezi diagonálami (obrázek 77, 78). U ostatních zatěžovacích stavů jsou zanedbatelné.
Pří přímém působení větru na příhradový pás směrem od Brna je moment kladný (obrázek 77). Při působení od České Třebové je záporný (obrázek 78).
Nad podporami v horním pásu je vidět pro zatížení chodci, že vznikají špičky ohybových momentů (obrázek 79, 80, 81, 82).

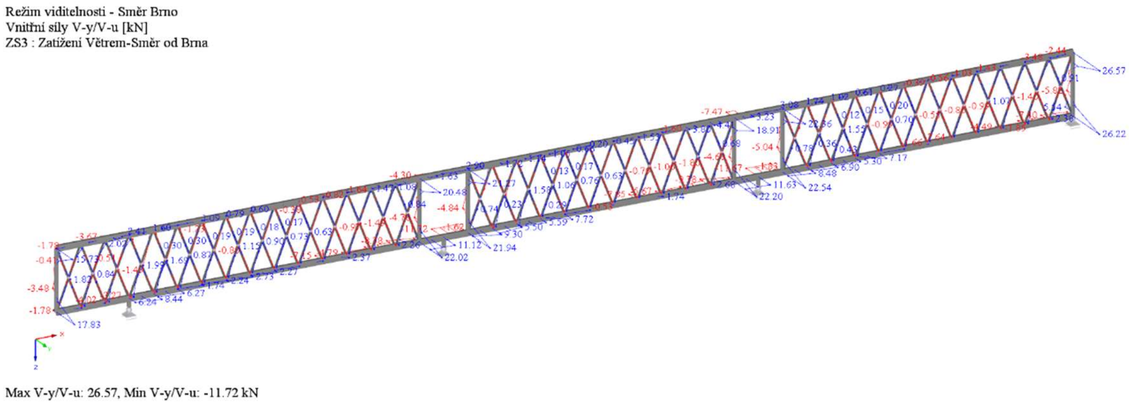
10.1.4. Posouvající síla V_y



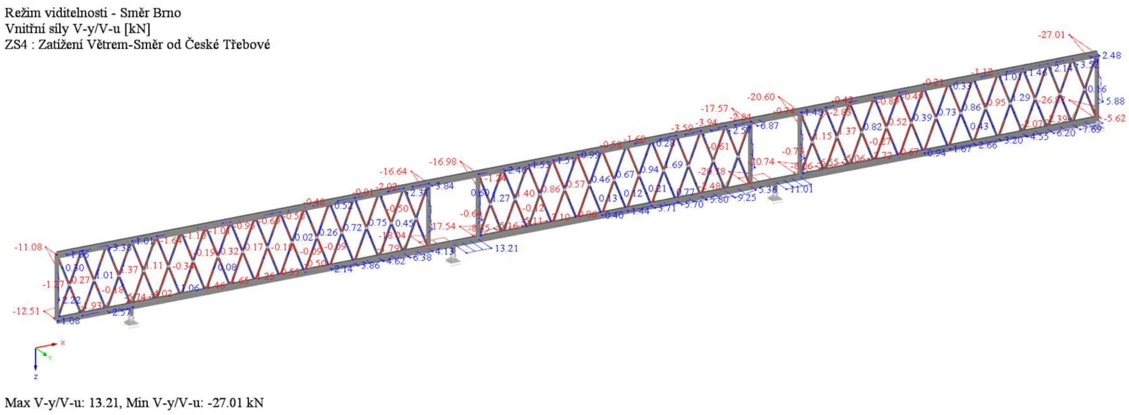
Obr. 83 Posouvající síla V_y od vlastní tíhy



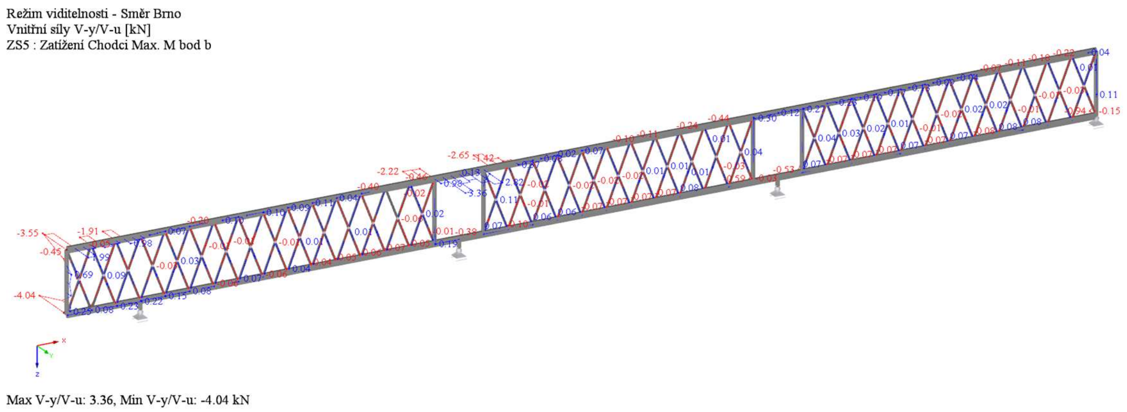
Obr. 84 Posouvající síla V_y od zatížení sněhem



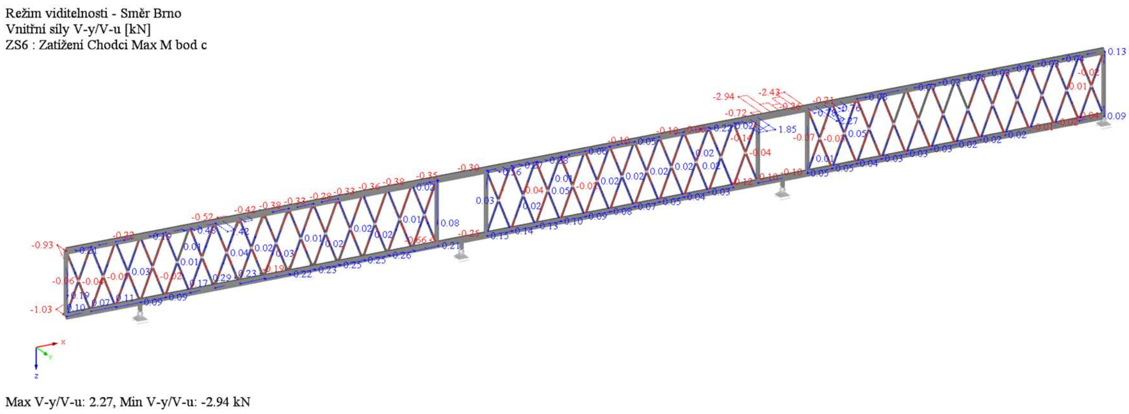
Obr. 85 Posouvající síla V_y od zatížení větrem (směr od Brna)



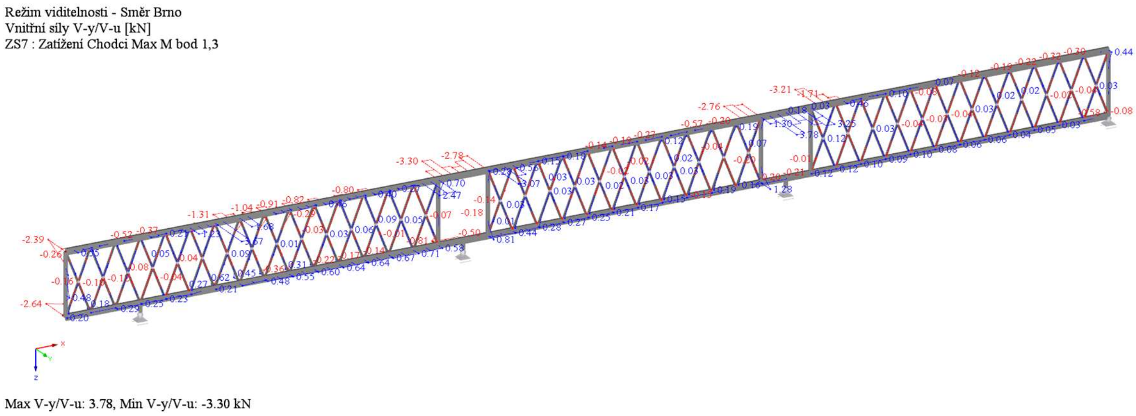
Obr. 86 Posouvající síla V_y od zatížení větrem (směr od Č. T.)



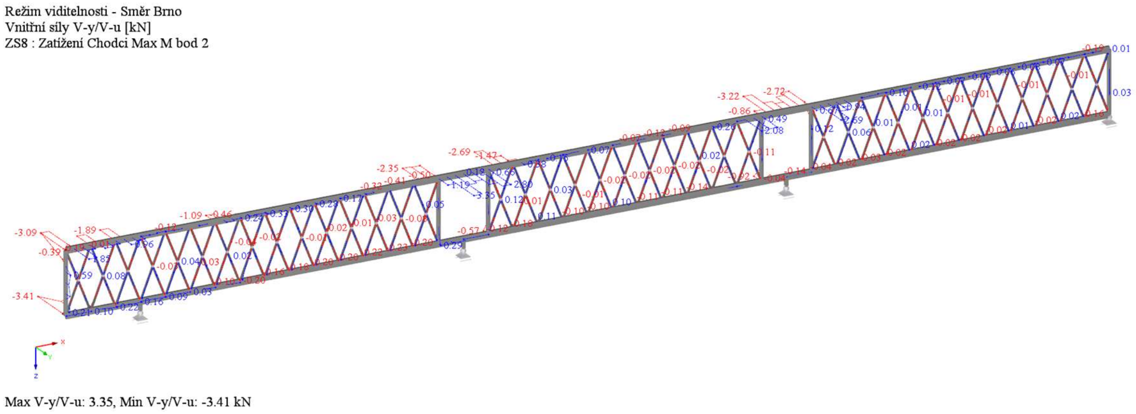
Obr. 87 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 88 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (podpora c)



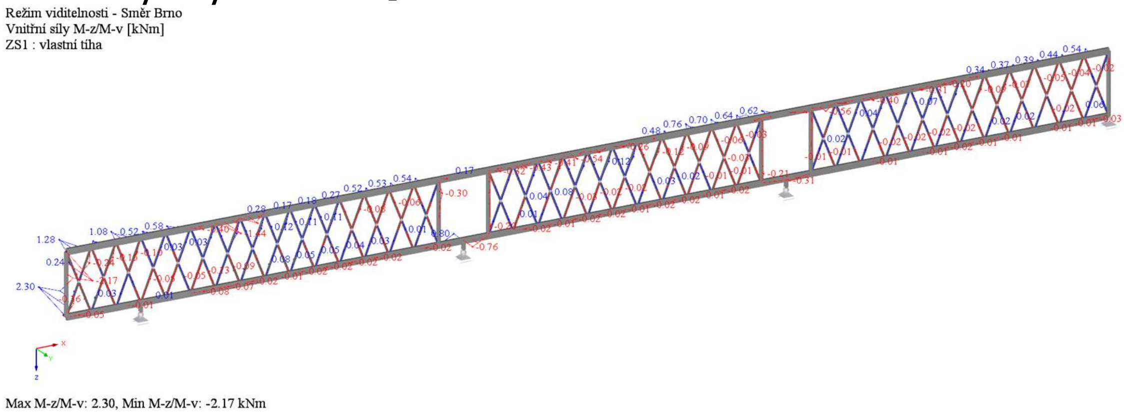
Obr. 89 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (bod 1, 3)



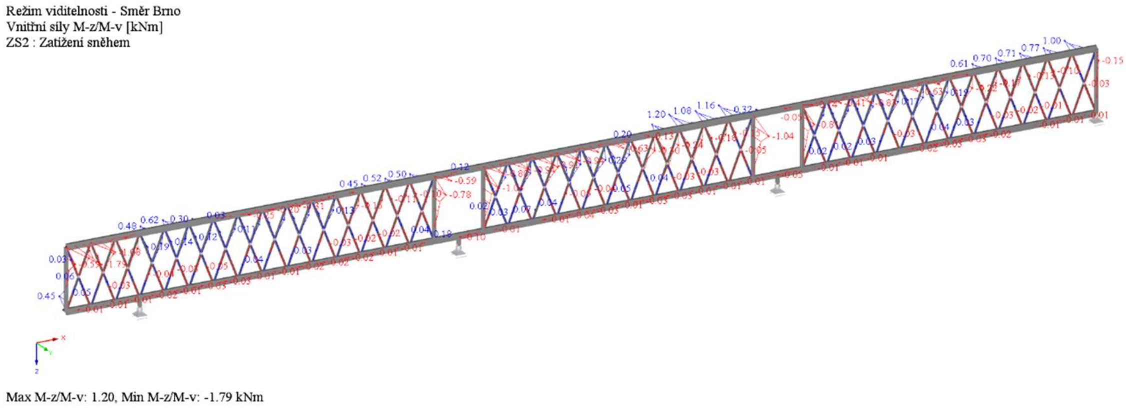
Obr. 90 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (bod 2)

Z obrázků 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90 posouvající sílu V_y je patrné, že největší posouvající síla V_y bude na horním a dolním pásu, a to v oblasti vynechání otvoru pro vchod na lávku. Dále se můžou objevovat posouvající síly v poli u horního pásu, což je nejvíce patrné u zatížení sněhem (obrázek 84).
Posouvající síla V_z se projevuje i u sloupků na převislém konci a konci lávky nad podporou.

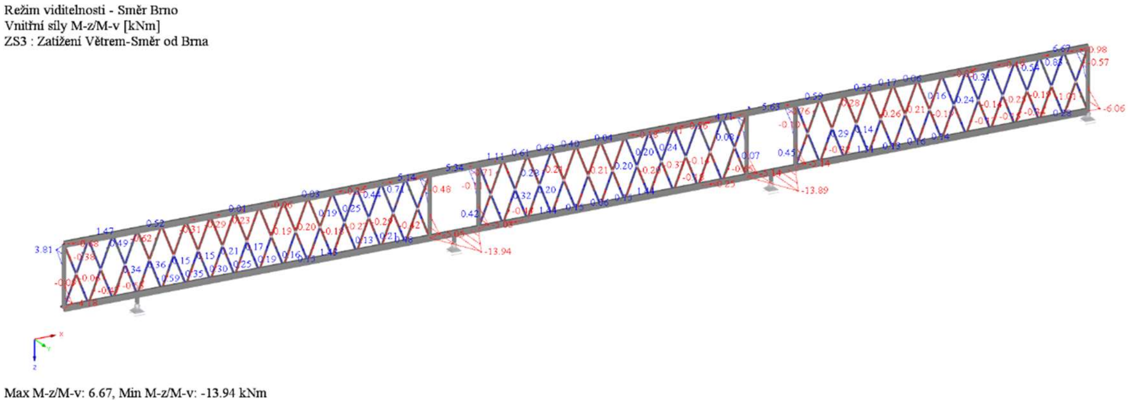
10.1.5. Ohybový moment M_z



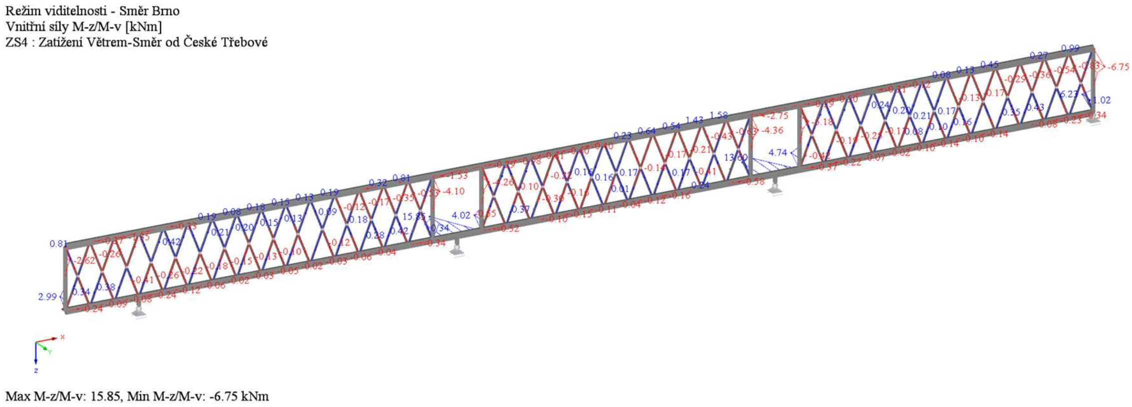
Obr. 91 Ohybový moment M_z od vlastní tíhy



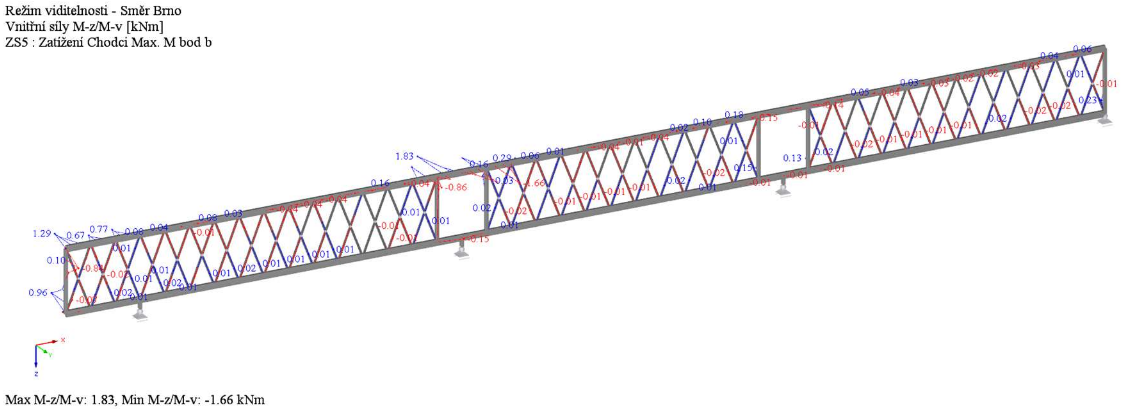
Obr. 92 Ohybový moment M_z od zatížení sněhem



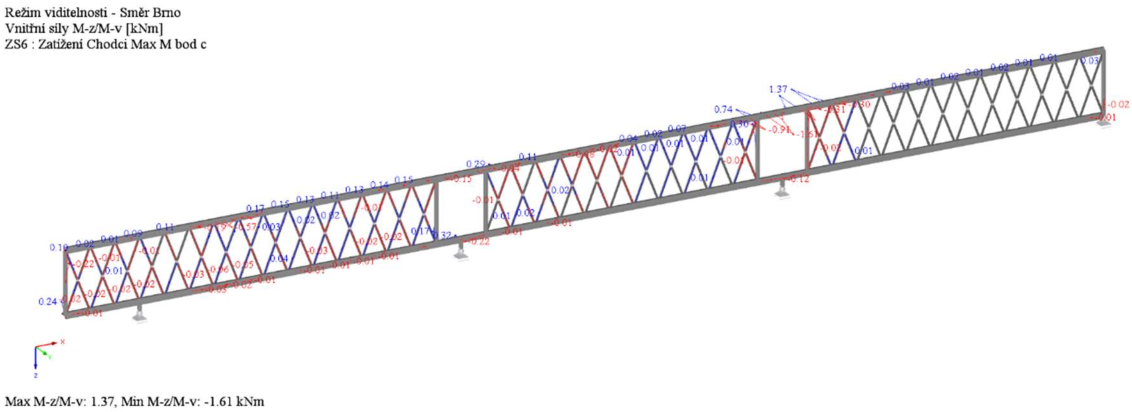
Obr. 93 Ohybový moment M_z od zatížení větrem (směr od Brna)



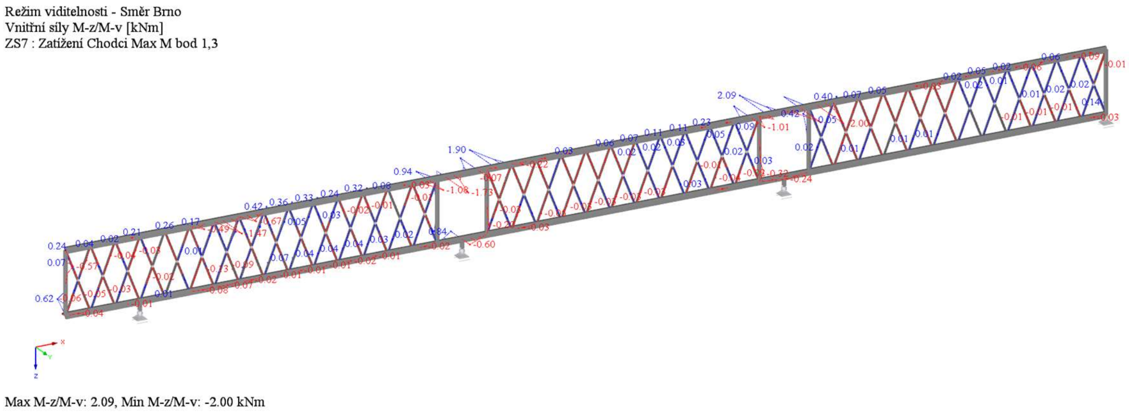
Obr. 94 Ohybový moment M_z od zatížení větrem (směr od Č. T.)



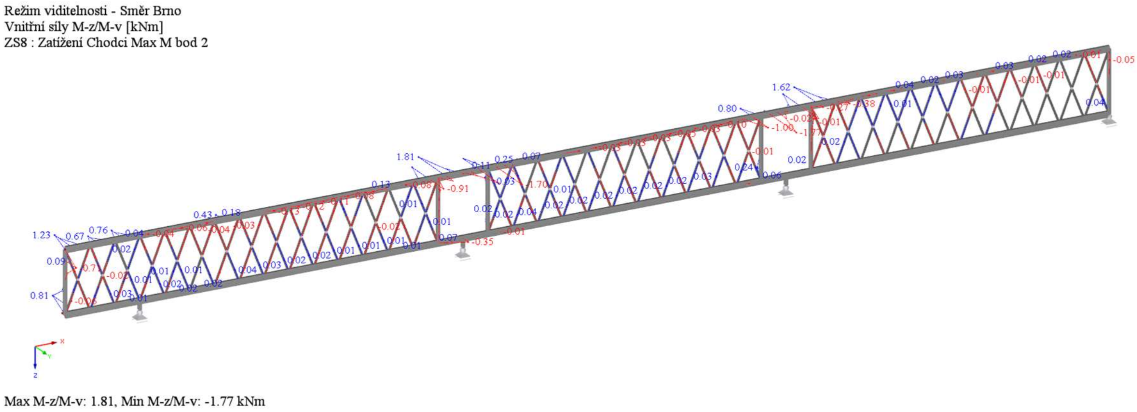
Obr. 95 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 96 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (podpora c)



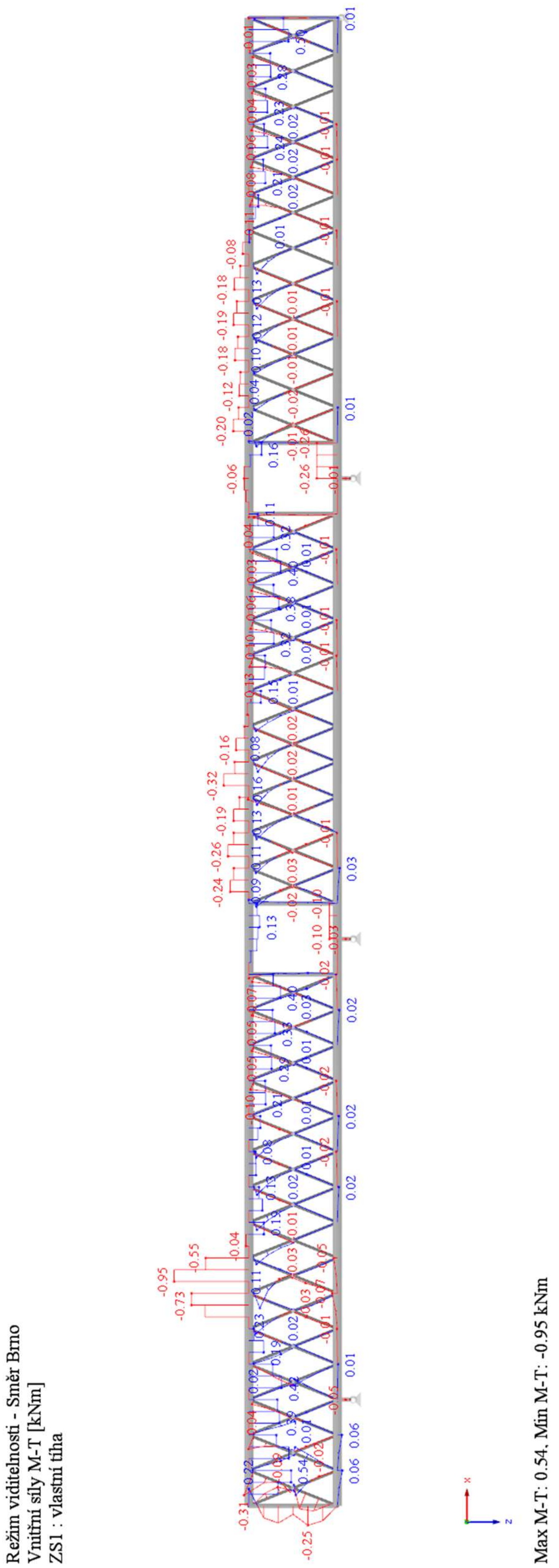
Obr. 97 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (bod 1, 3)



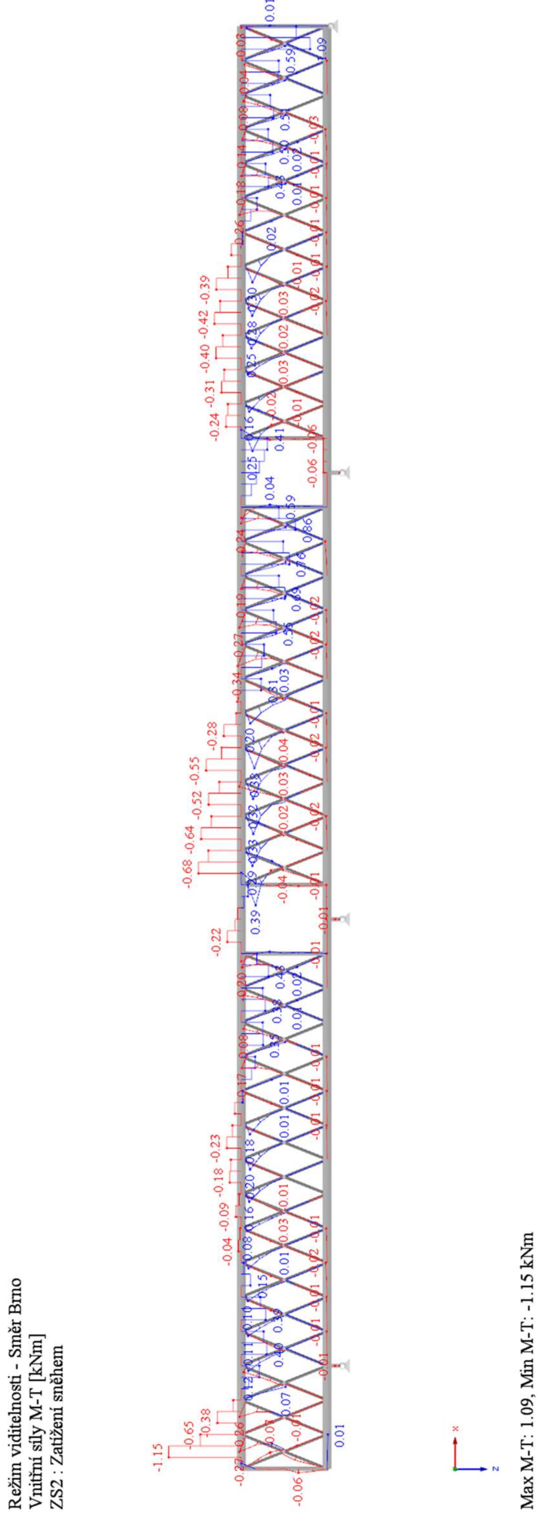
Obr. 98 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (bod 2)

Jak je viditelné z obrázků 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, tak moment M_z má největší hodnotu v dolním a horním pásu a ve sloupcích. Průběh tedy odpovídá silám V_y. Největší hodnota ohybového momentu je od zatížení větrem ve spodním pásu nad podporami, kde jsou vynechány diagonály (obrázek 93, 94).

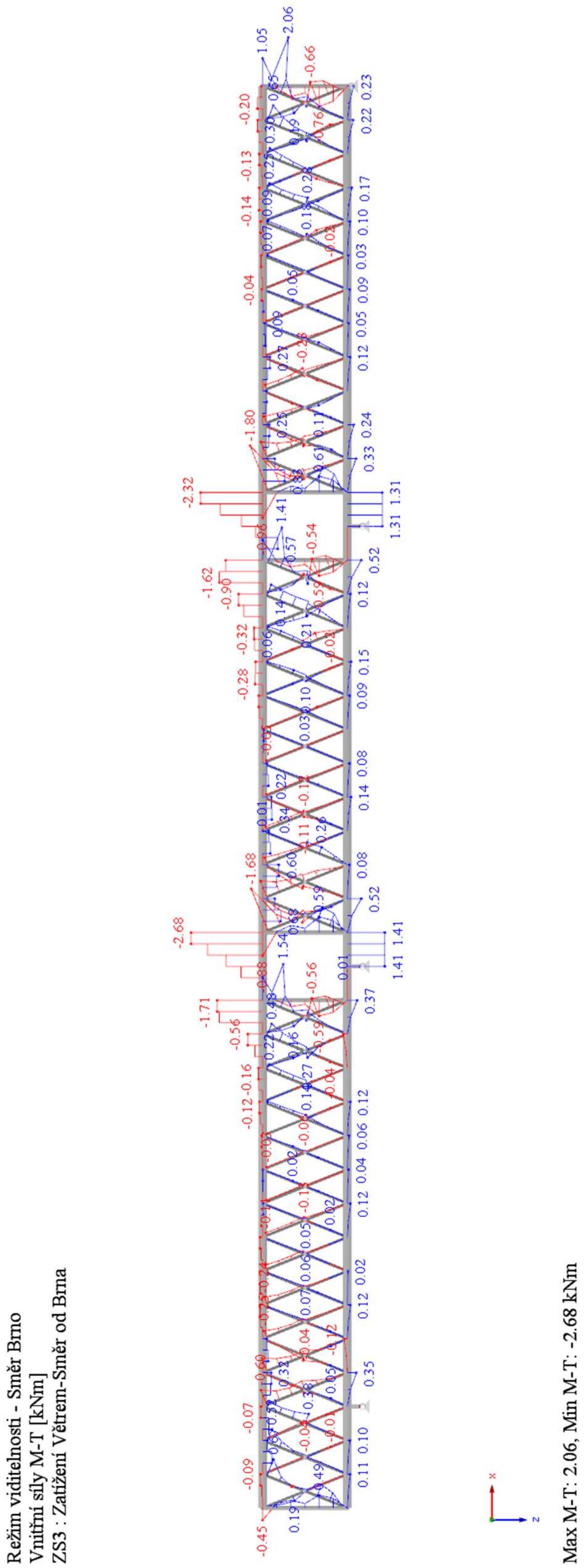
10.1.6. Kroutící moment M_t



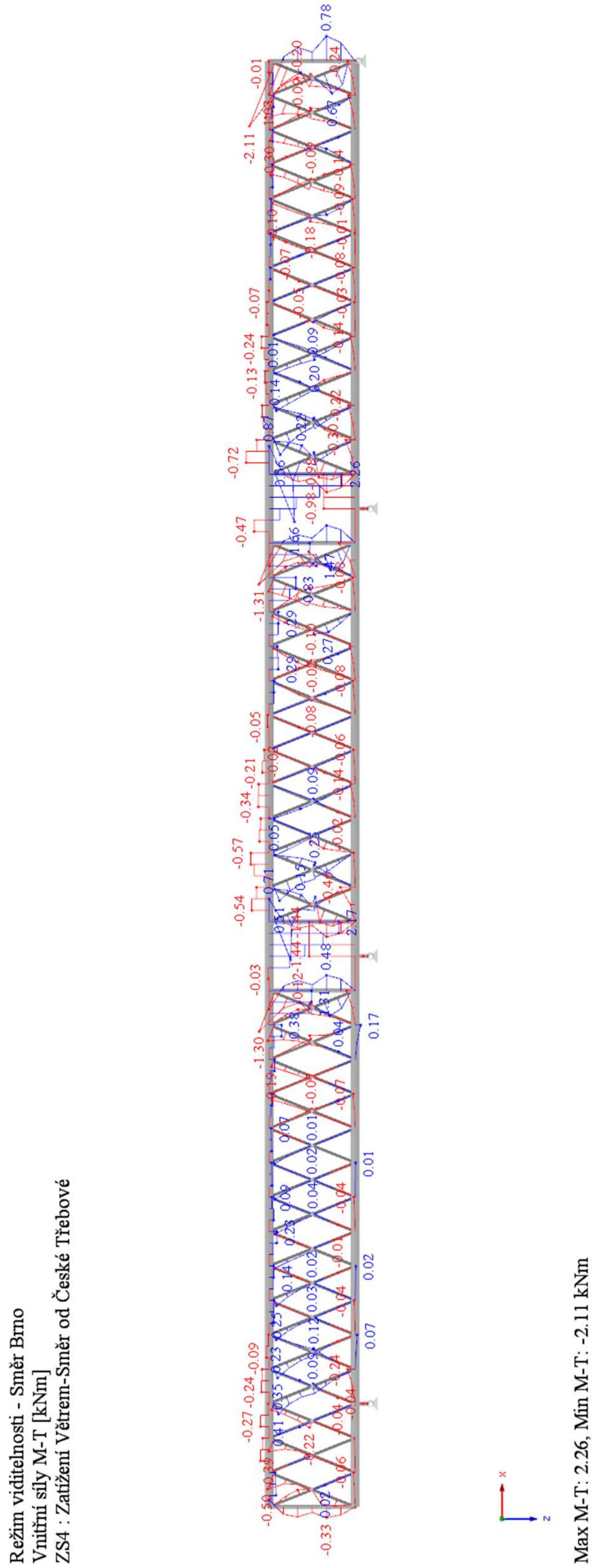
Obr. 99 Kroutící moment M_t od vlastní tíhy



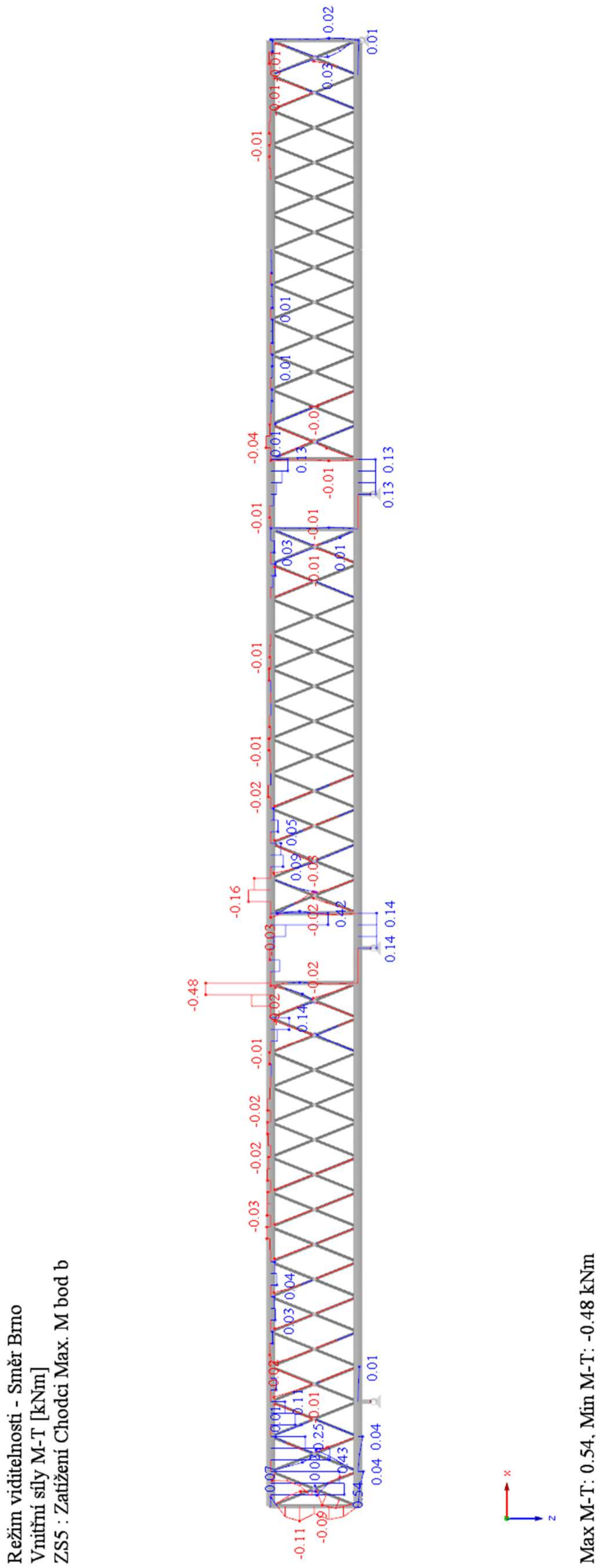
Obr. 100 Kroutící moment M_t od zatížení sněhem



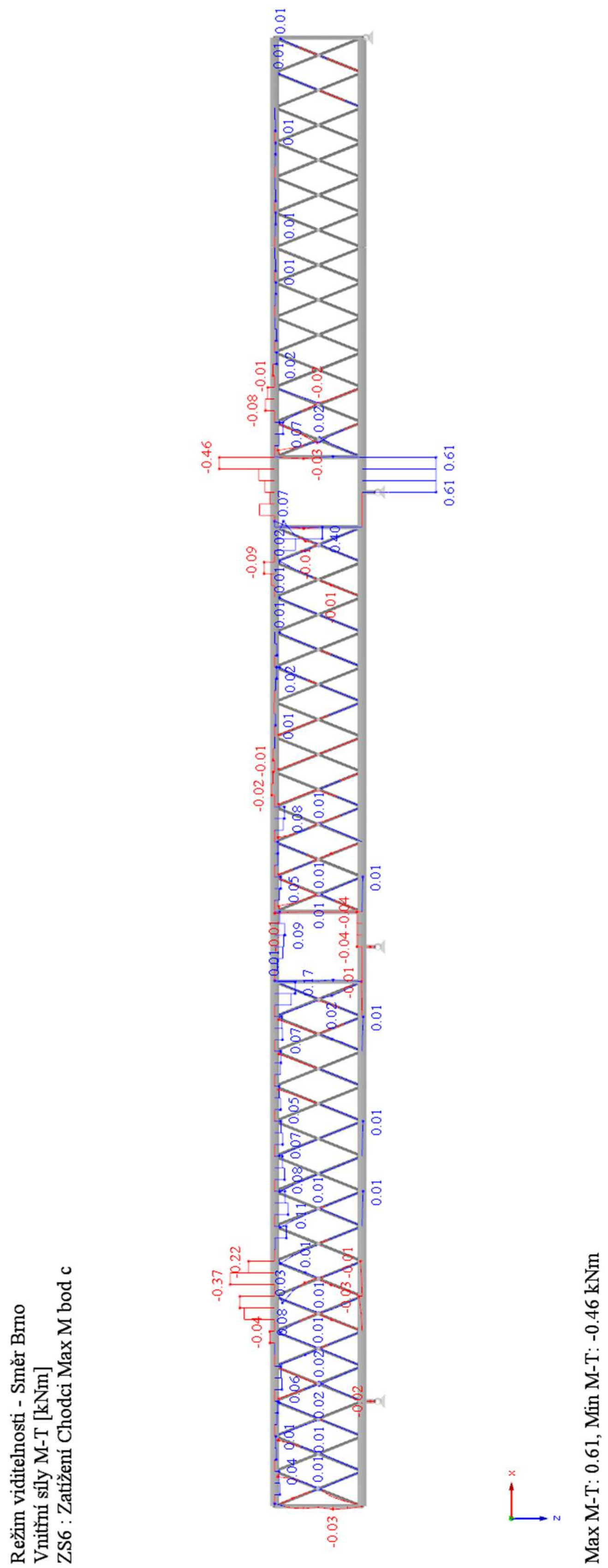
Obr. 101 Kroutící moment M_t od zatížení větrem (směr od Brna)



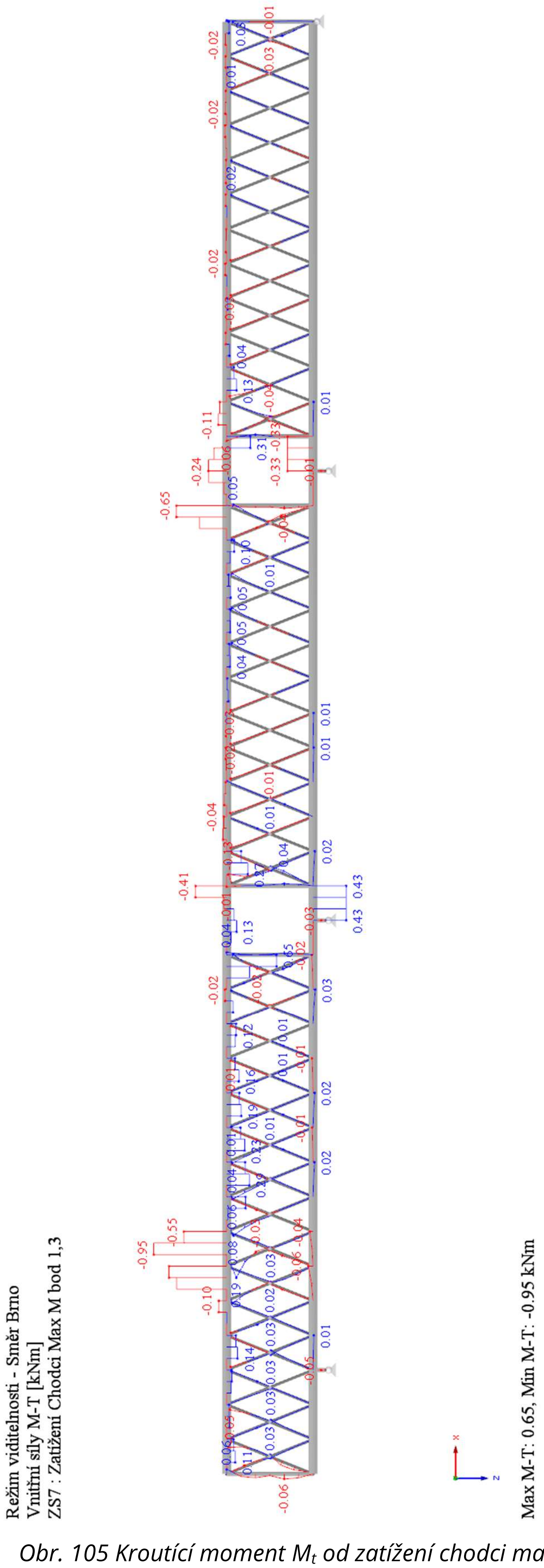
Obr. 102 Kroutící moment M_t od zatížení větrem (směr od Č. T.)



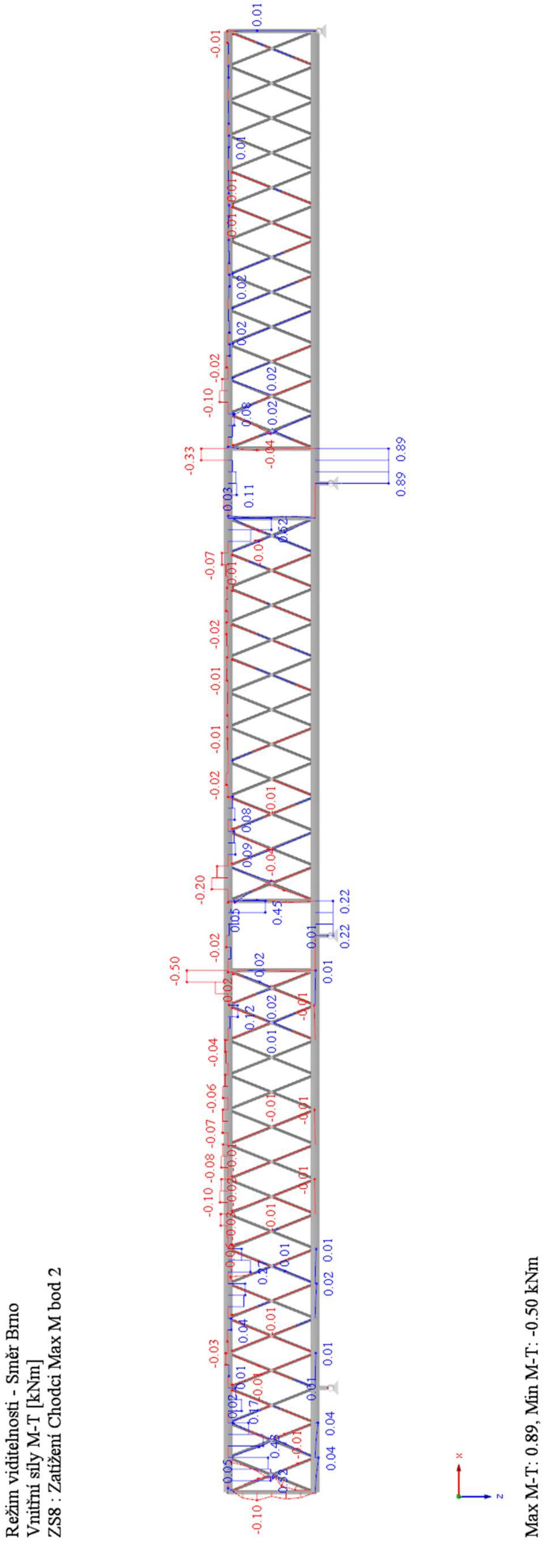
Obr. 103 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 104 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (podpora c)



Obr. 105 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (bod 1, 3)

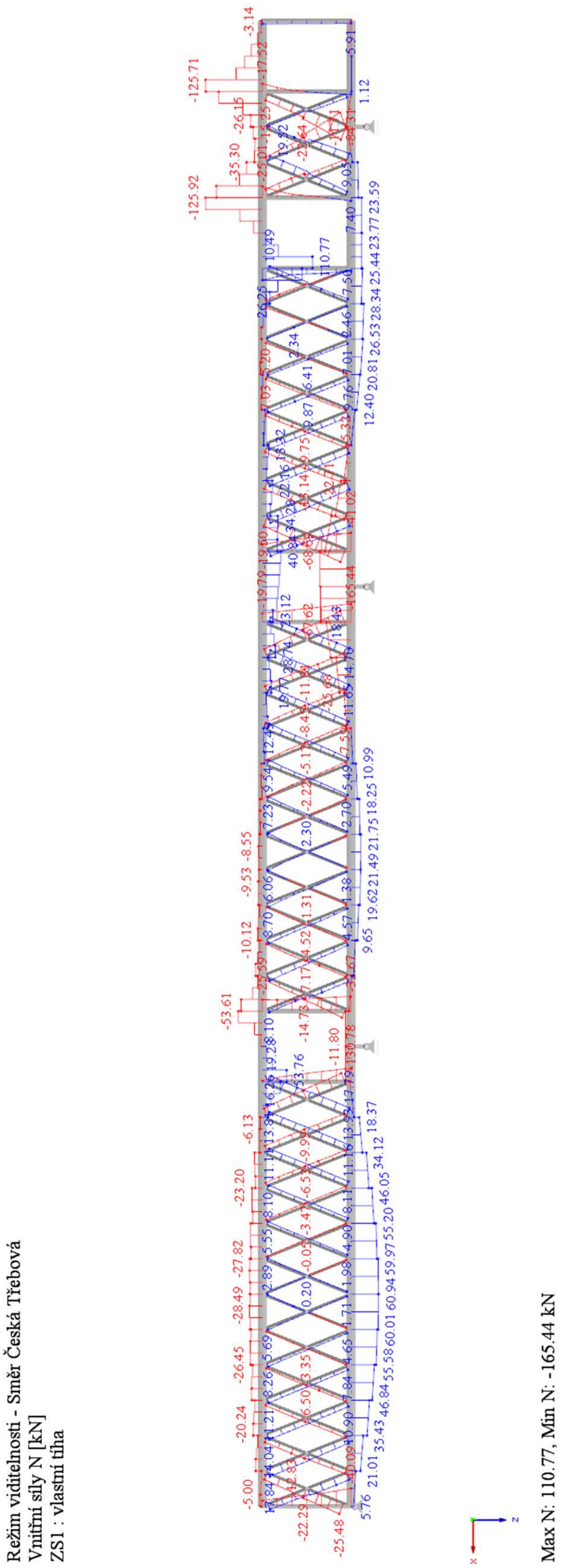


Obr. 106 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (bod 2)

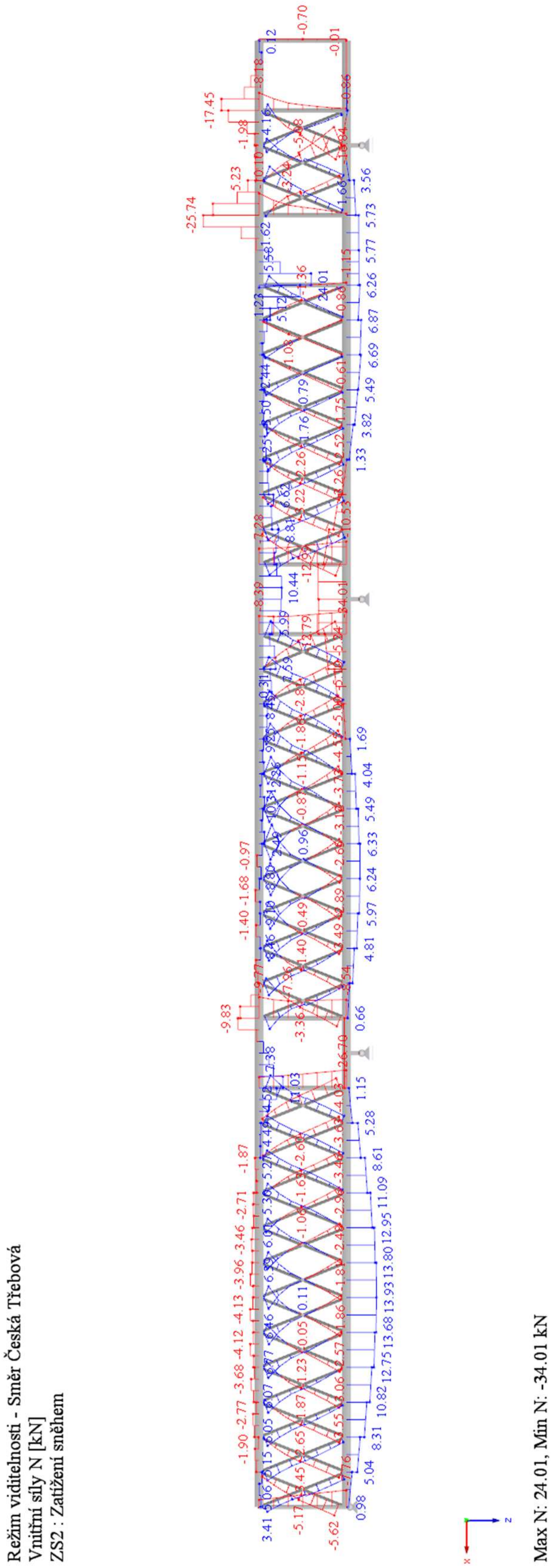
Kroutící moment v horním pásu dosahuje největší hodnoty nad vnitřními sloupky (obrázek 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106). Dále je horní pás kroucen od L-profilů, které tvoří zastřešení.
U dolního pásu dochází k největšímu kroucení v blízkosti vnitřních podpor.
Diagonály jsou nejvíce krouceny v co nejmenší vzdálenosti ke sloupkům. Uprostřed rozpětí je kroutící moment prakticky zanedbatelný.
Sloupky jsou krouceny po celé své délce. Průběh přitom nenabývá lineárního průběhu.

10.2. Vnitřní síly v příhradovém pásu – směr Česká Třebová

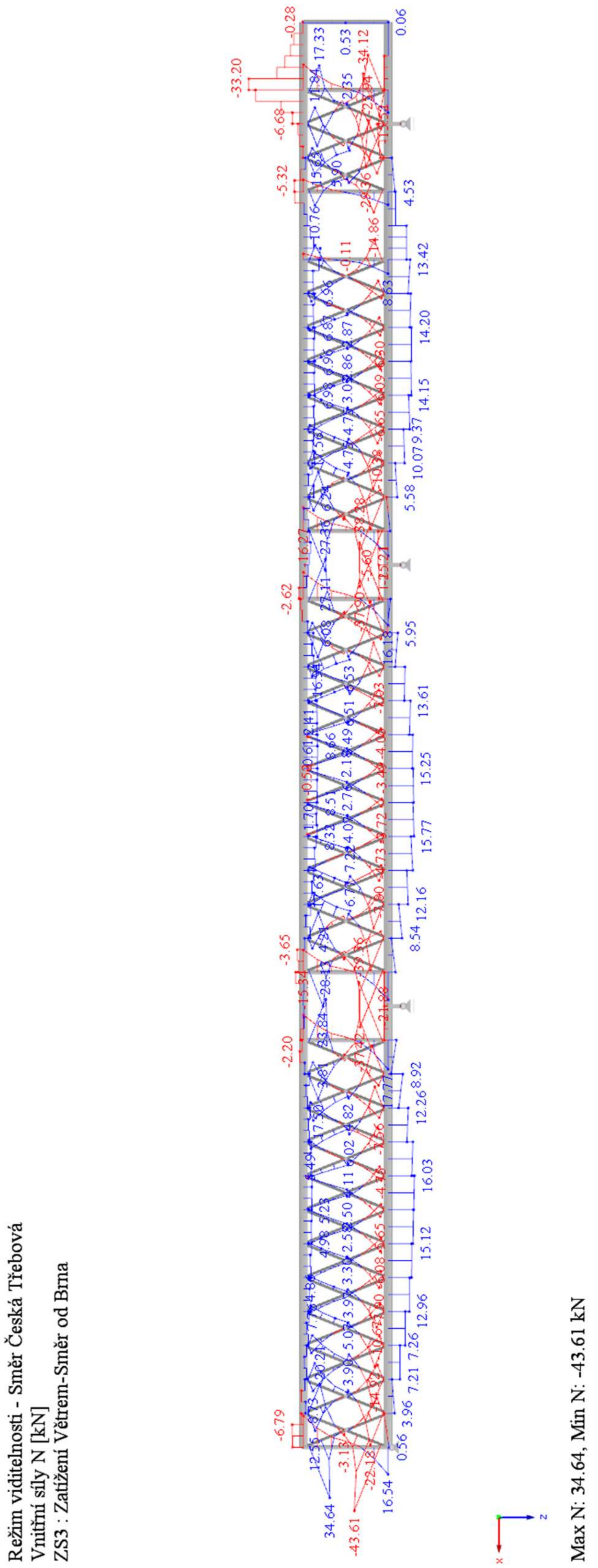
10.2.1. Normálová síla N



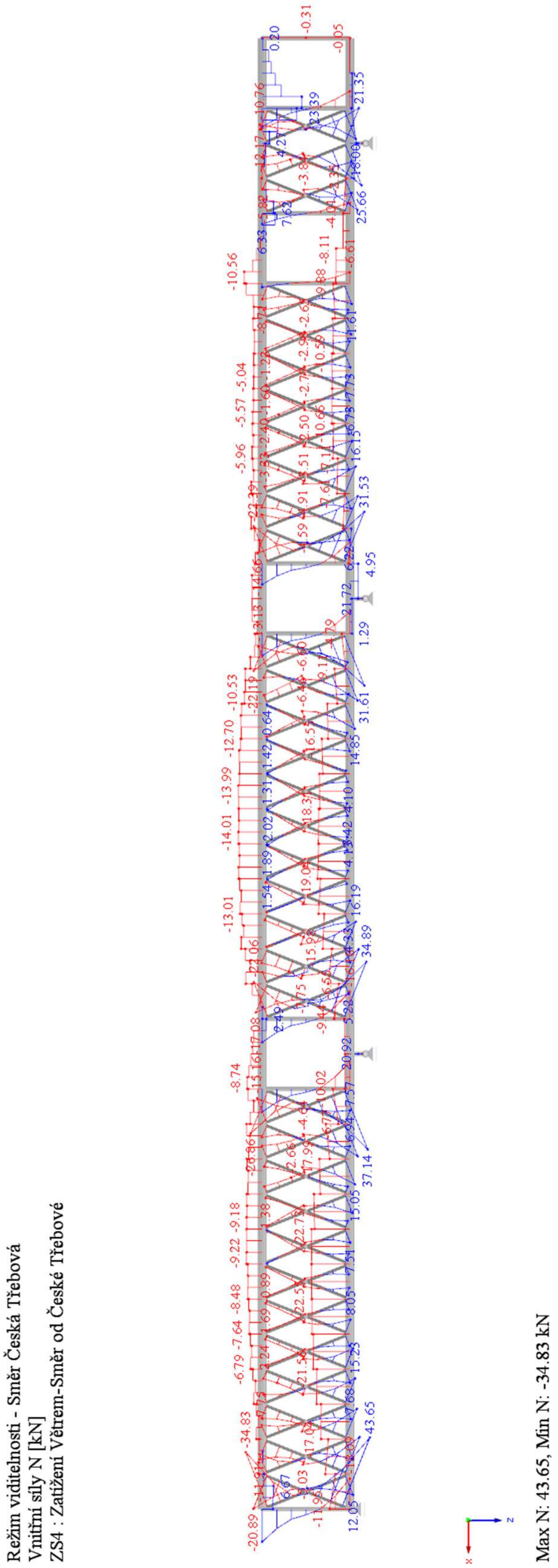
Obr. 107 Normálová síla N od vlastní tíhy



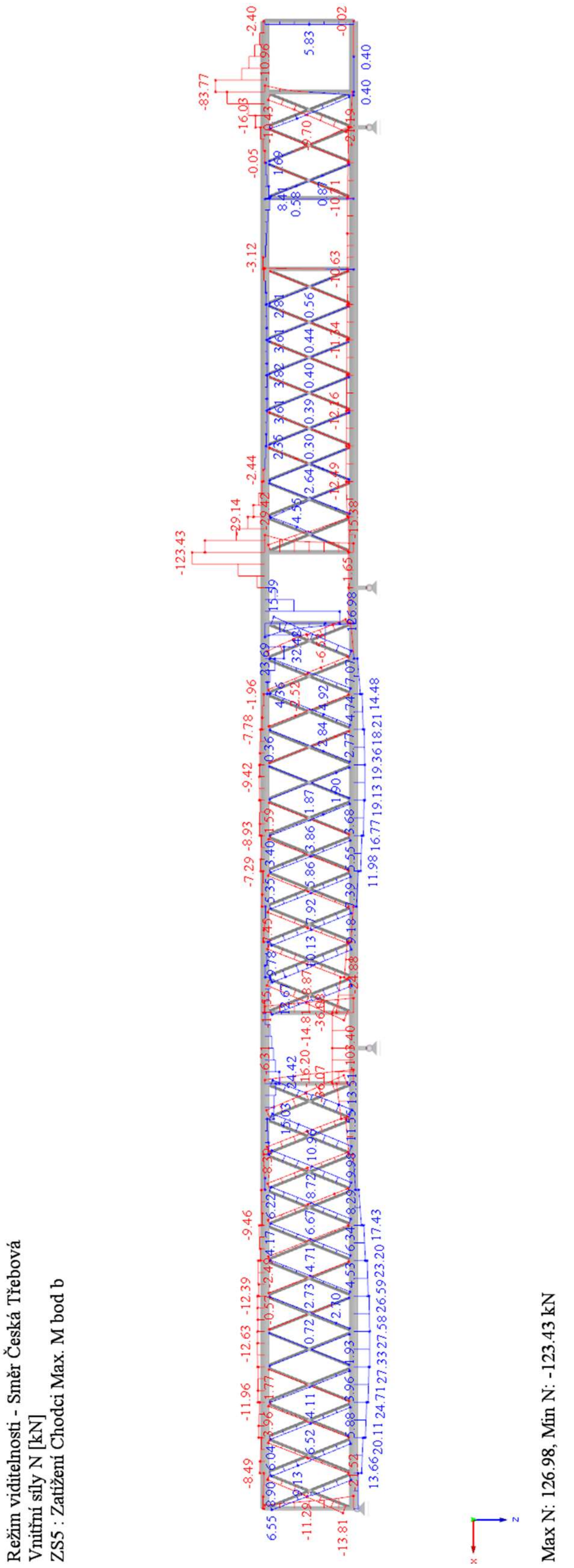
Obr. 108 Normálová síla N od zatížení sněhem



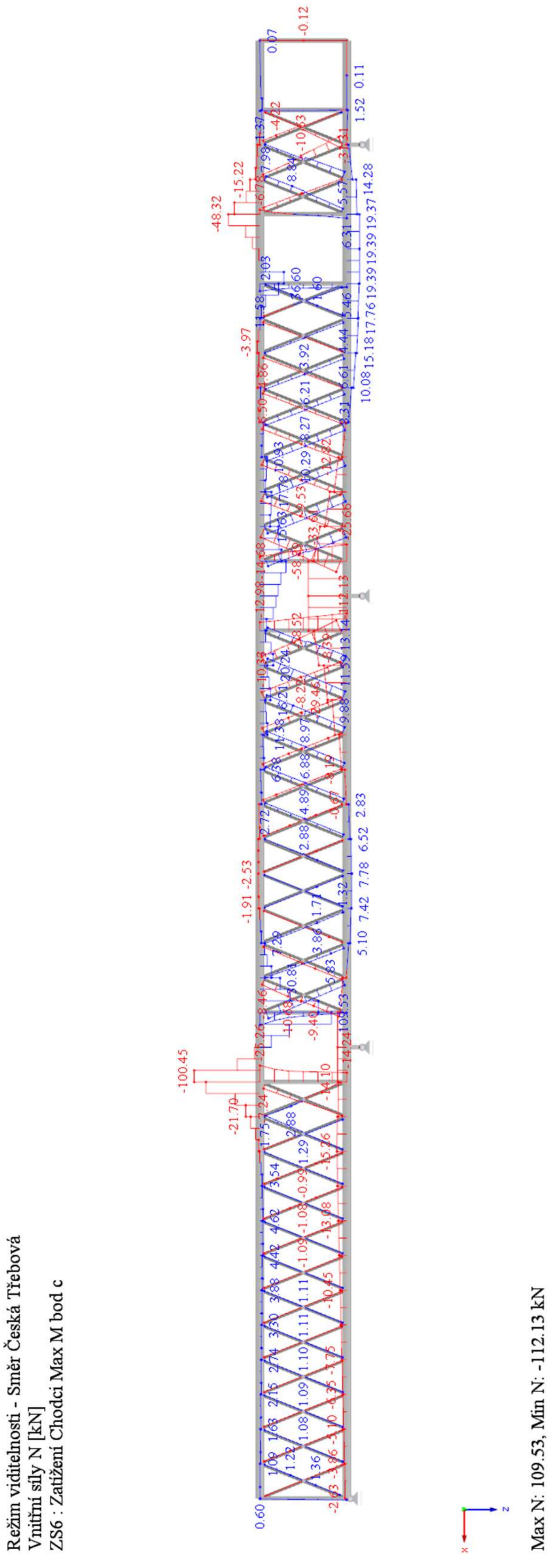
Obr. 109 Normálová síla N od zatížení větrem (směr od Brna)



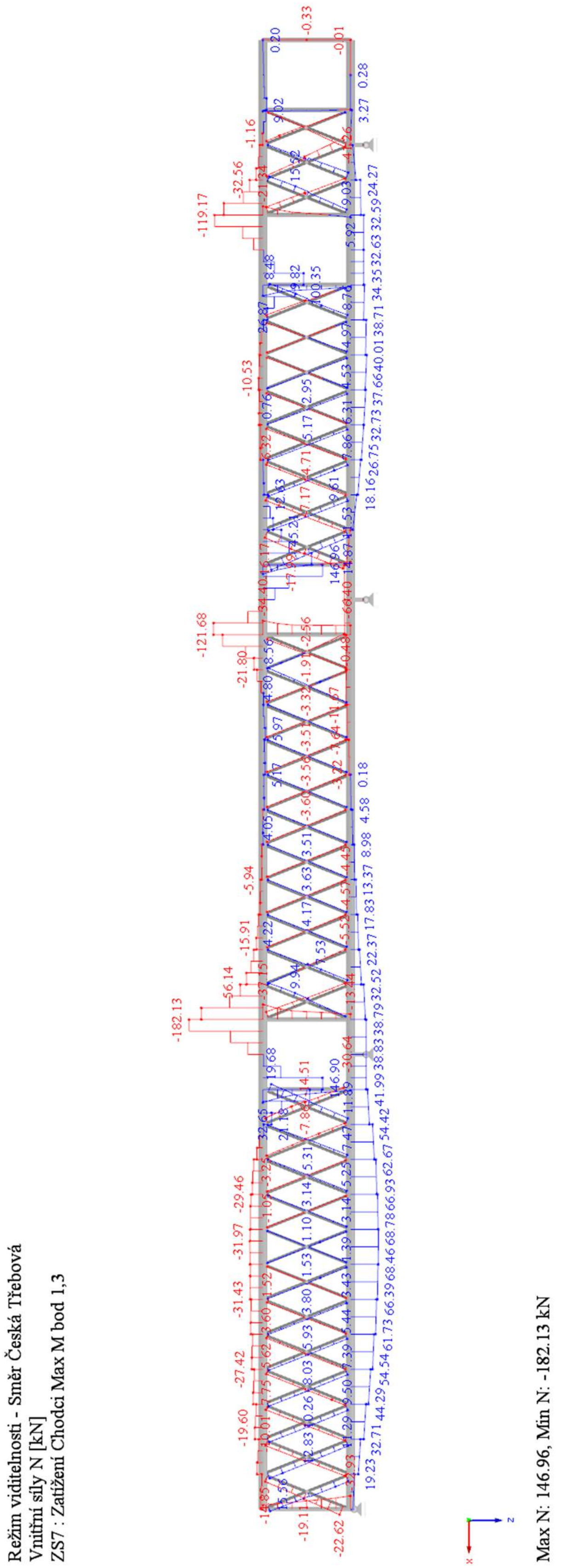
Obr. 110 Normálová síla N od zatížení větrem (směr od Č. T.)



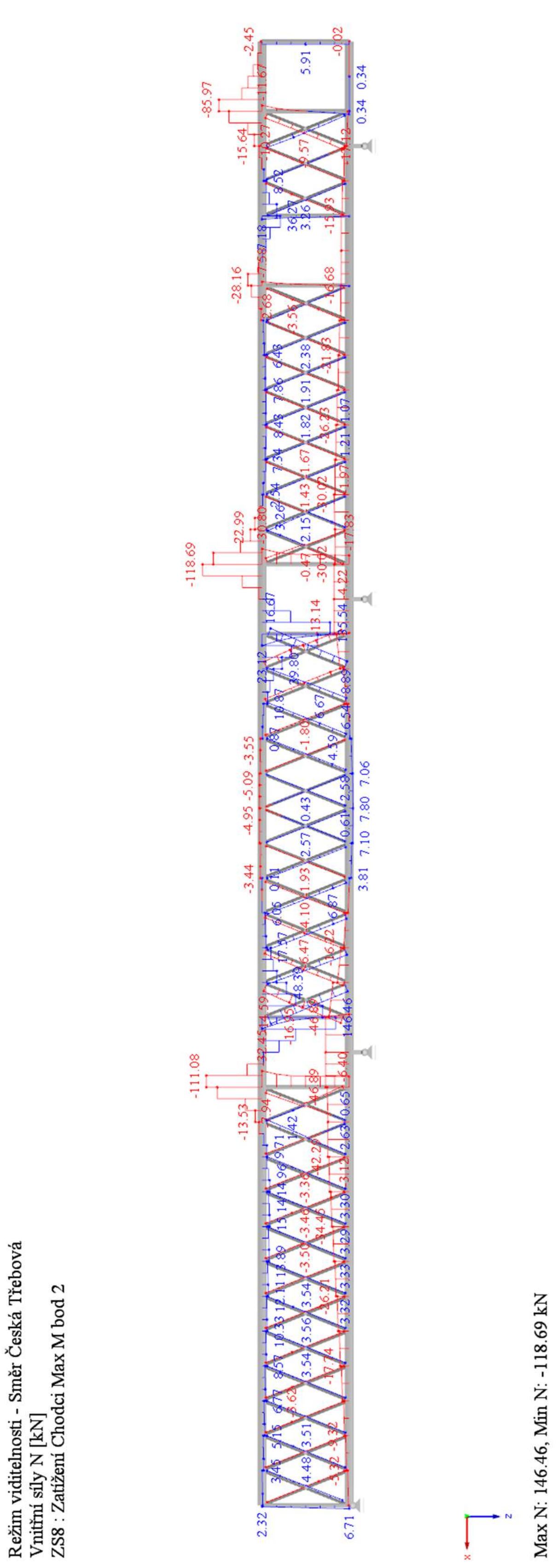
Obr. 111 Normálová síla N od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 112 Normálová síla N od zatížení chodci max M (podpora c)



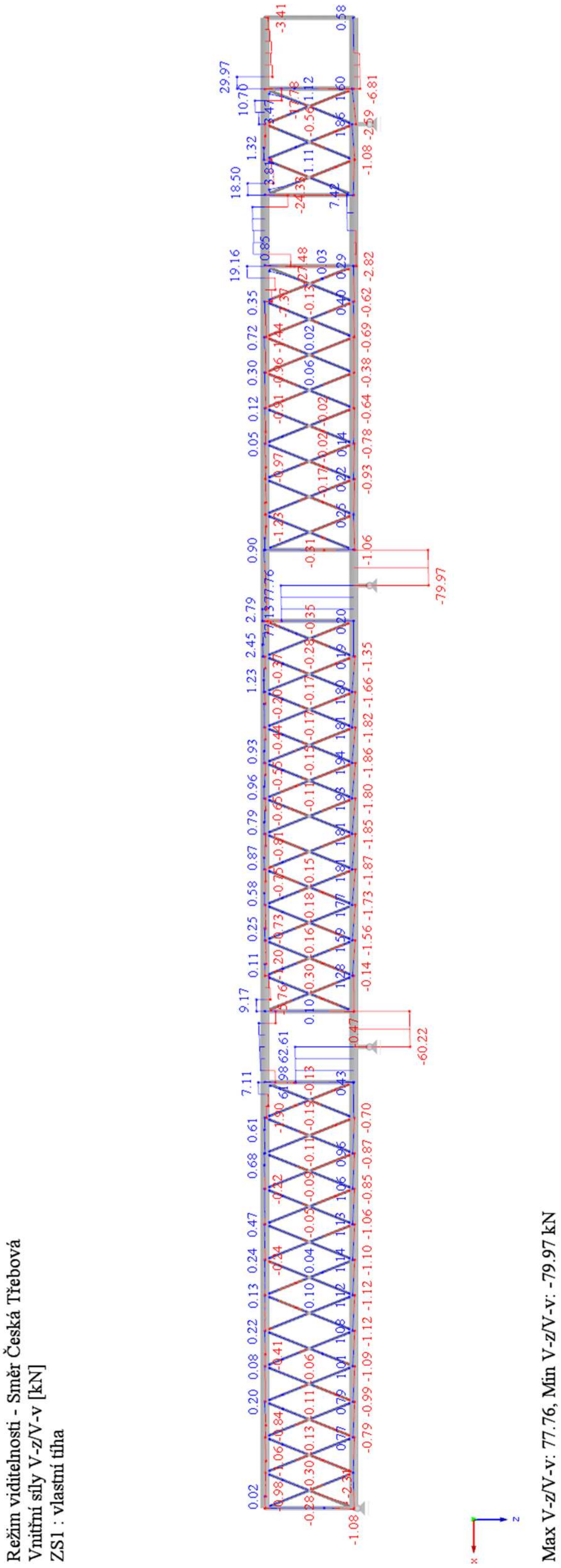
Obr. 113 Normálová síla N od zatížení chodci max M (bod 1, 3)



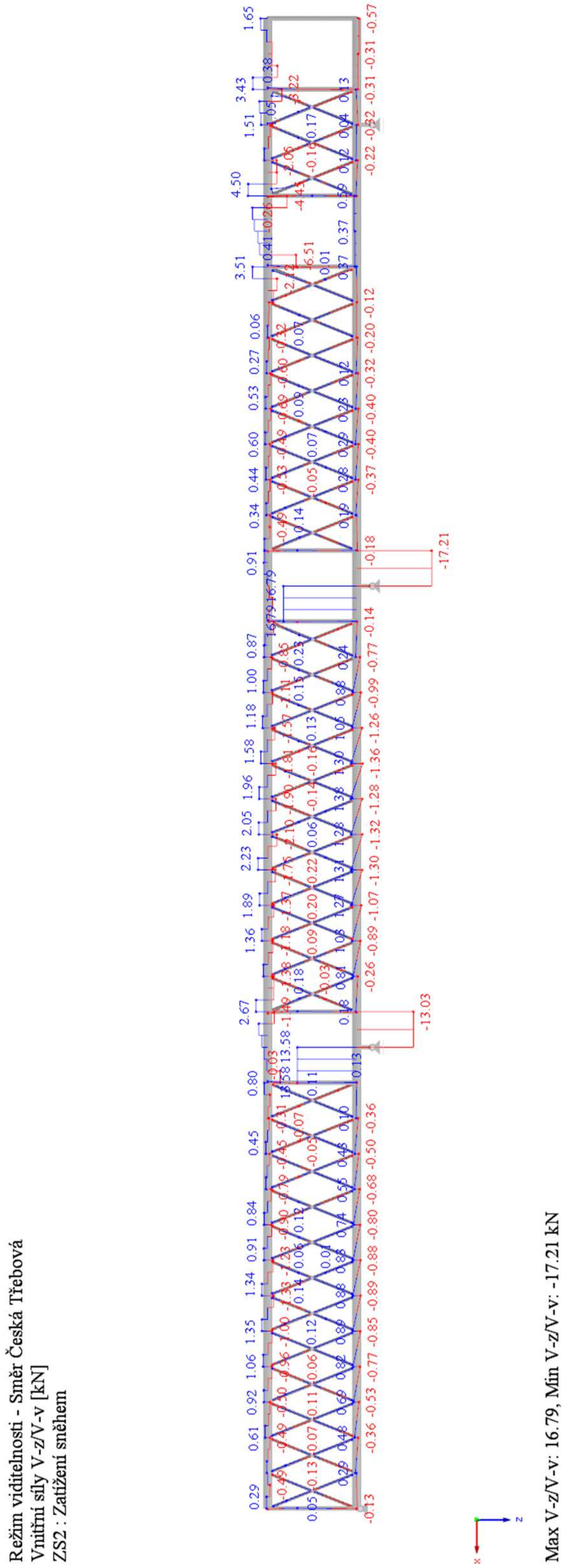
Obr. 114 Normálová síla N od zatížení chodci max M (bod 2)

Průběh je podobný jako u kapitoly 10.1.1 Normálové síly N.
Akorát u sloupků, které se nachází u podpory d jsou u horního pásu špičky normálových sil (obrázek 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114).
U dolního pásu nad stejným místem k podobnému jevu nedochází.
Tyto sloupky vytvořené vynecháním diagonál jsou také zatěžovány normálovými silami.

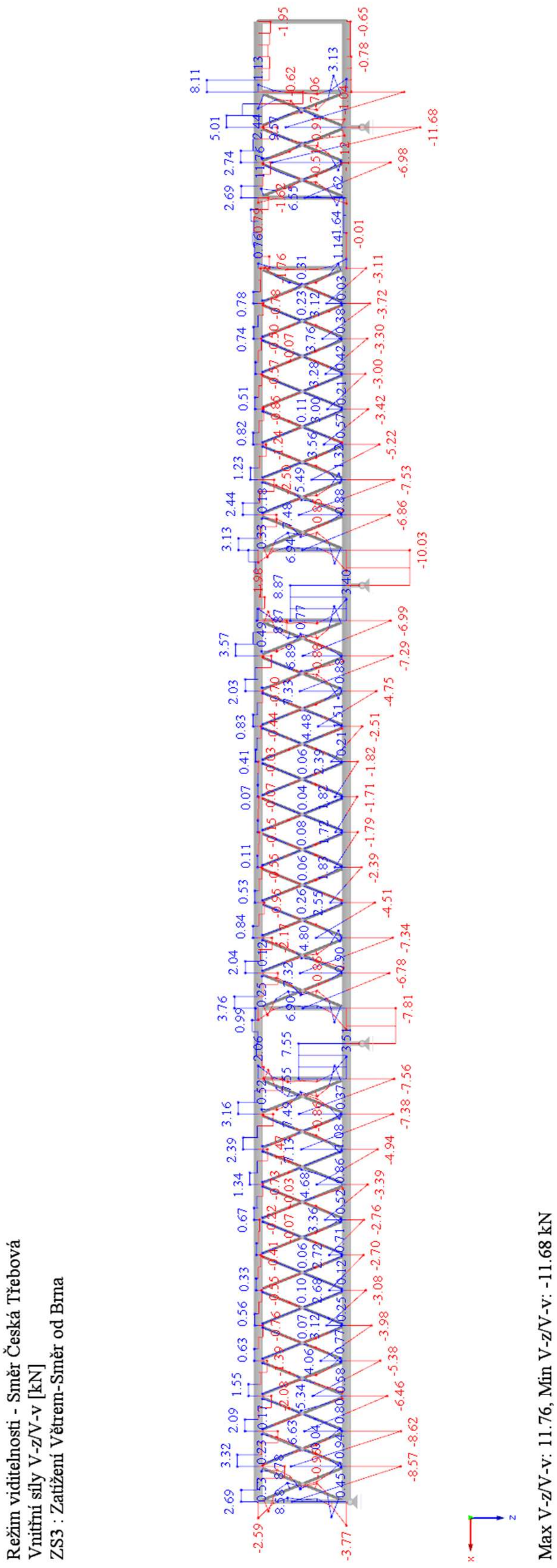
10.2.2. Posouvající síla V_z

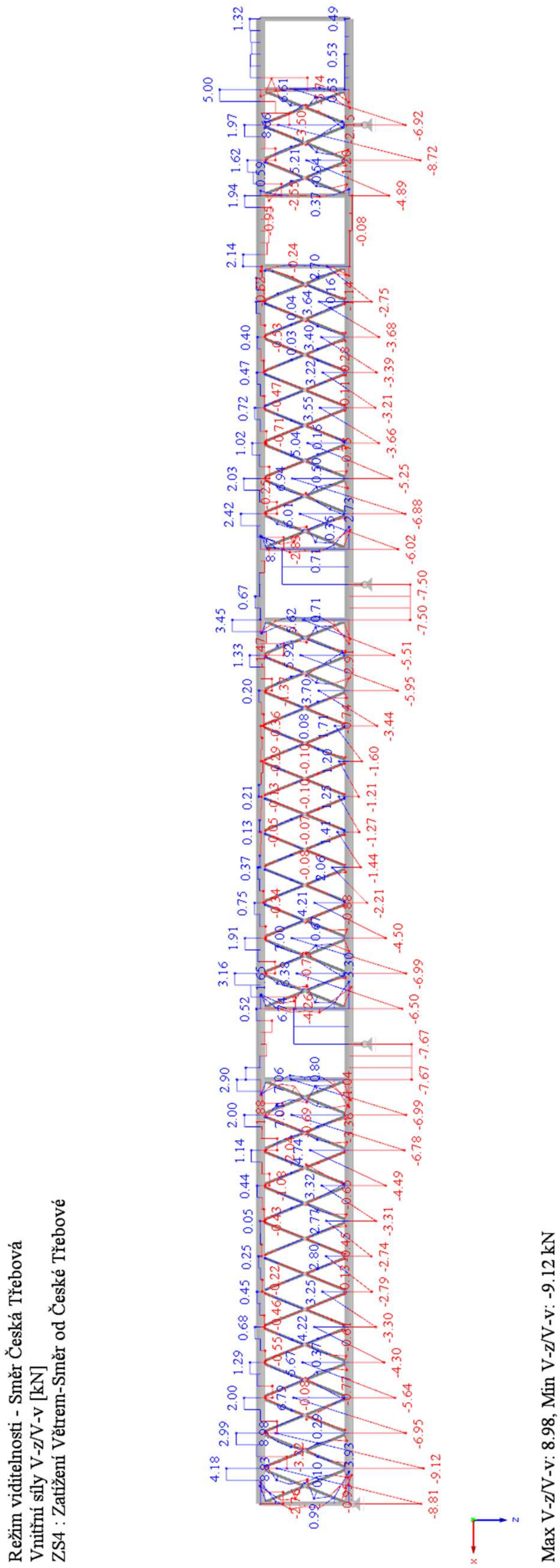


Obr. 115 Posouvající síla V_z od vlastní tíhy



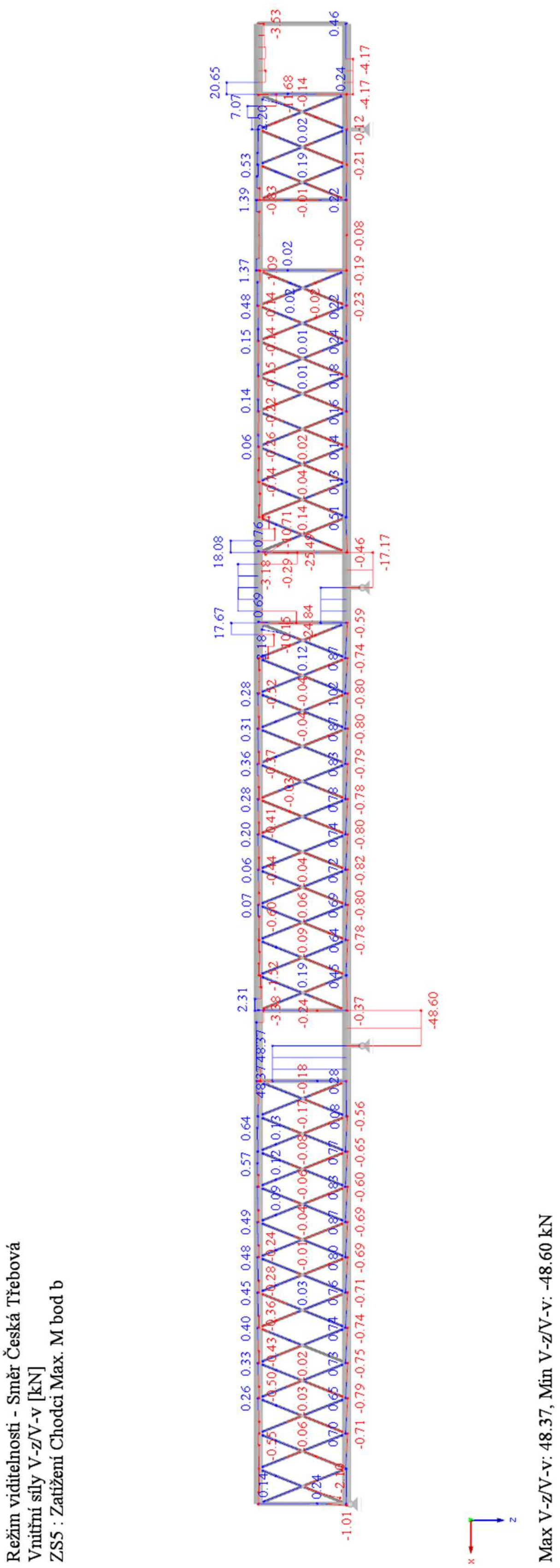
Obr. 116 Posouvající síla V_z od zatížení sněhem



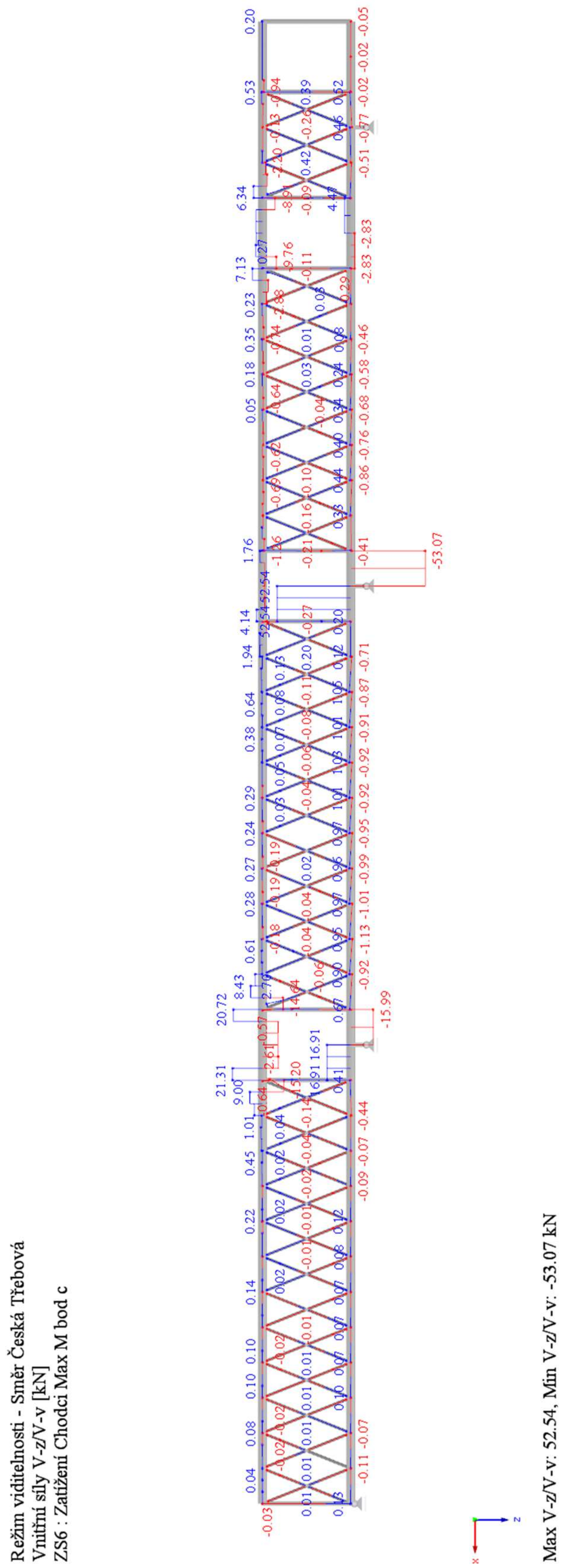


Obr. 117 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Brna)

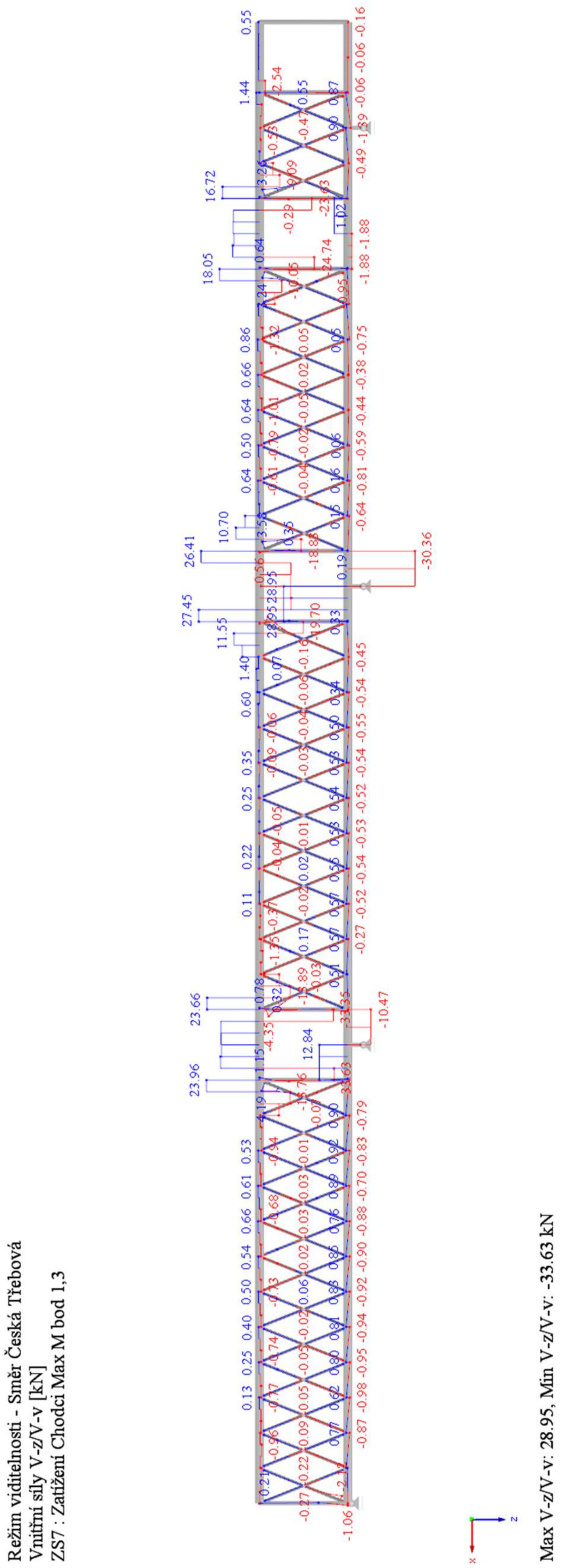
Obr. 118 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Č. T.)



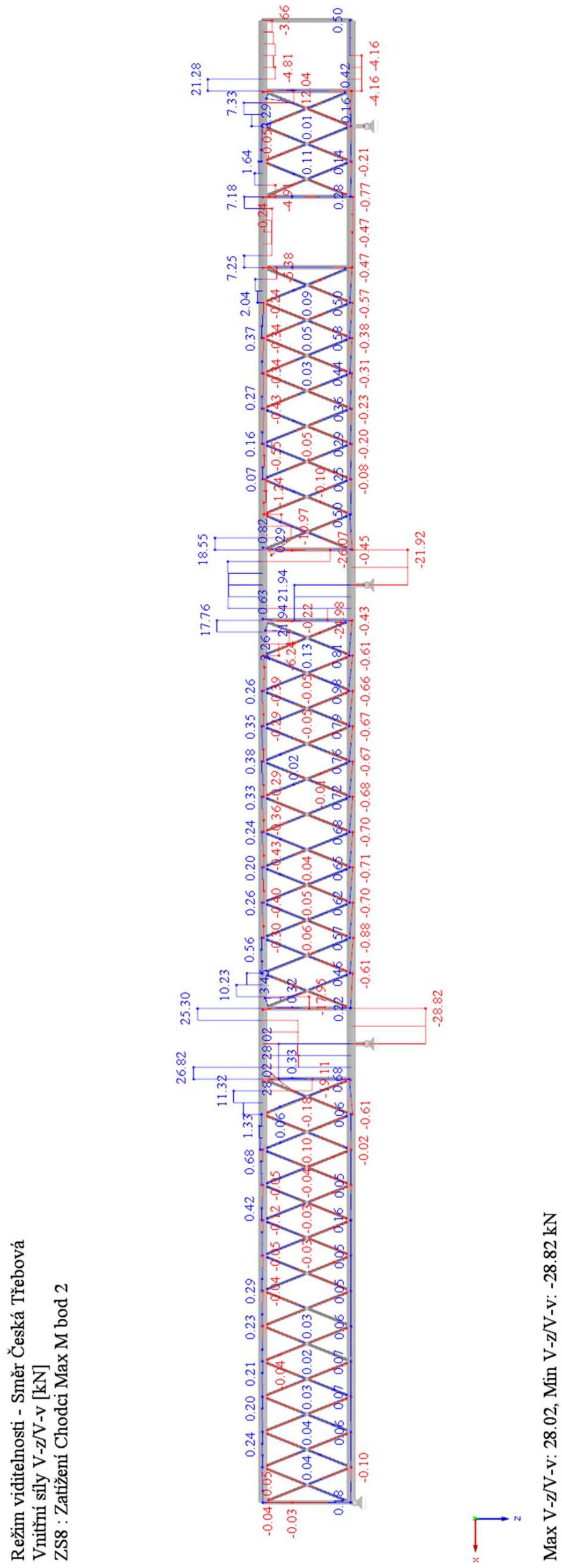
Obr. 119 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 120 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M (podpora c)



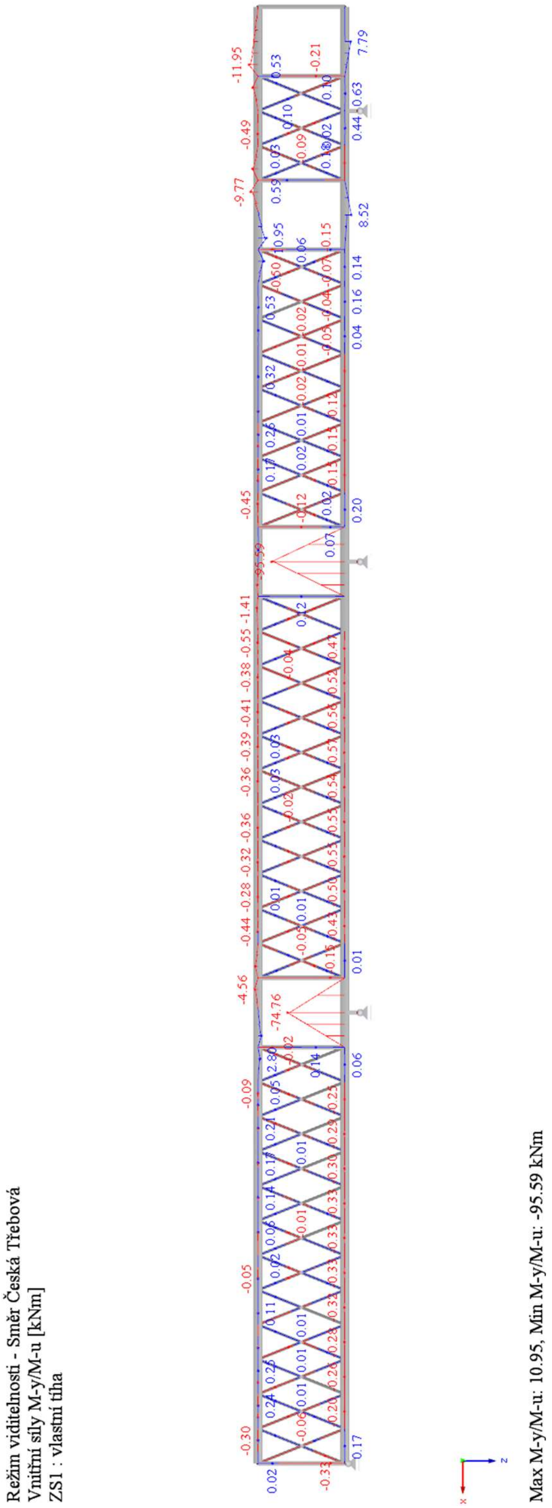
Obr. 121 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M (bod 1, 3)



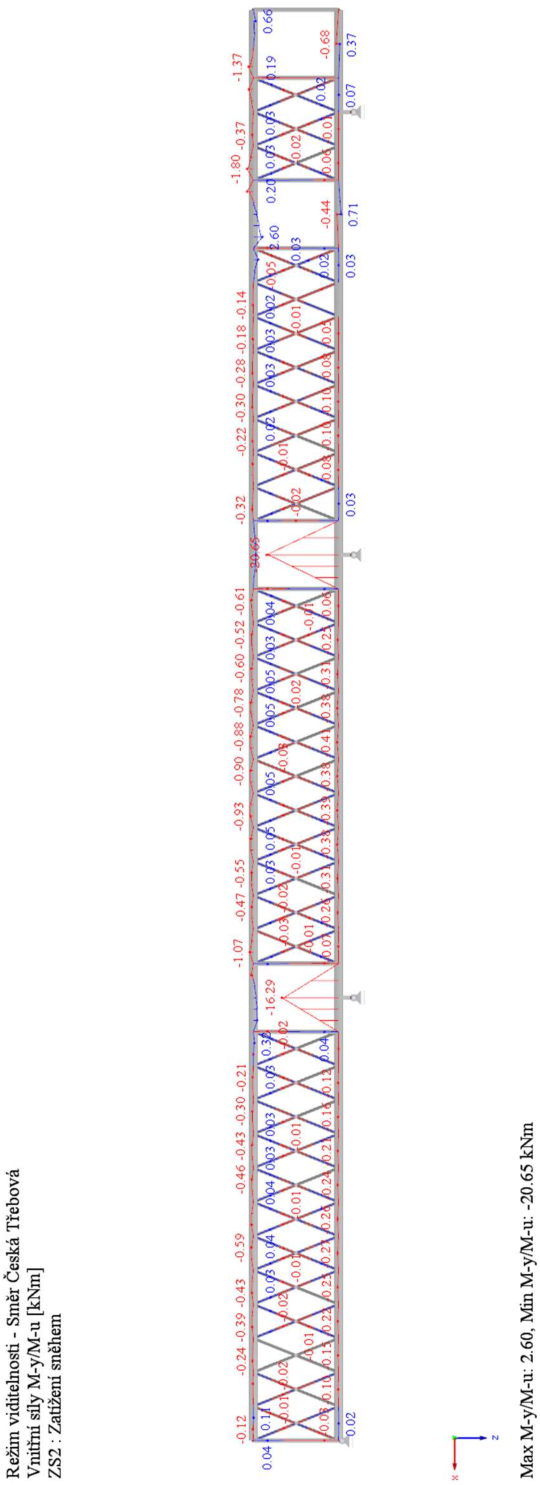
Obr. 122 Posouvající síla V_z od zatížení chodci max M (bod 2)

Průběh je podobný jako u kapitoly 10.1.2 Posouvající síla V_z.
Horní pás i dolní pás v místě otvorů vzniklých vynecháním příhradového pásu u podpory d má v oblasti sloupků špičky napětí (obrázek 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122). Tyto špičky jsou nejvíce patrné u zatěžovacích stavů, ve kterých se přenáší do horního pásu největší normálová síla ze sloupků.

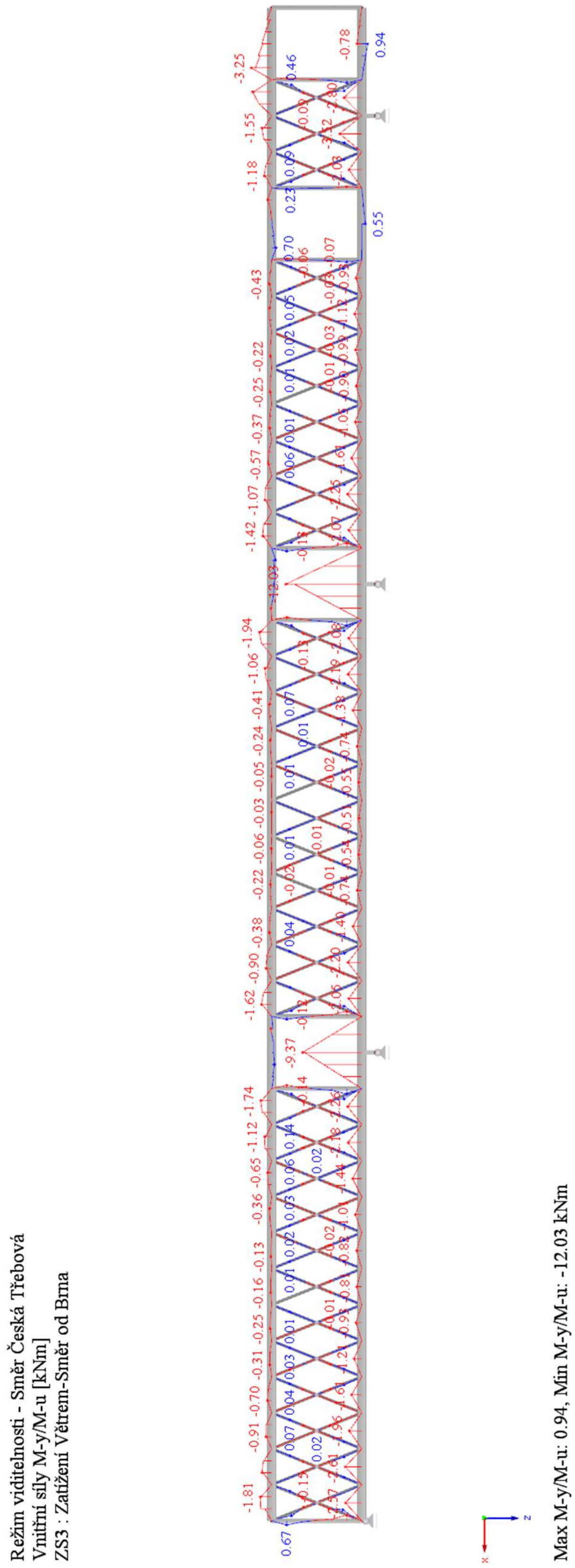
10.2.3. Ohybový moment M_y



Obr. 123 Ohybový moment M_y od vlastní tíhy

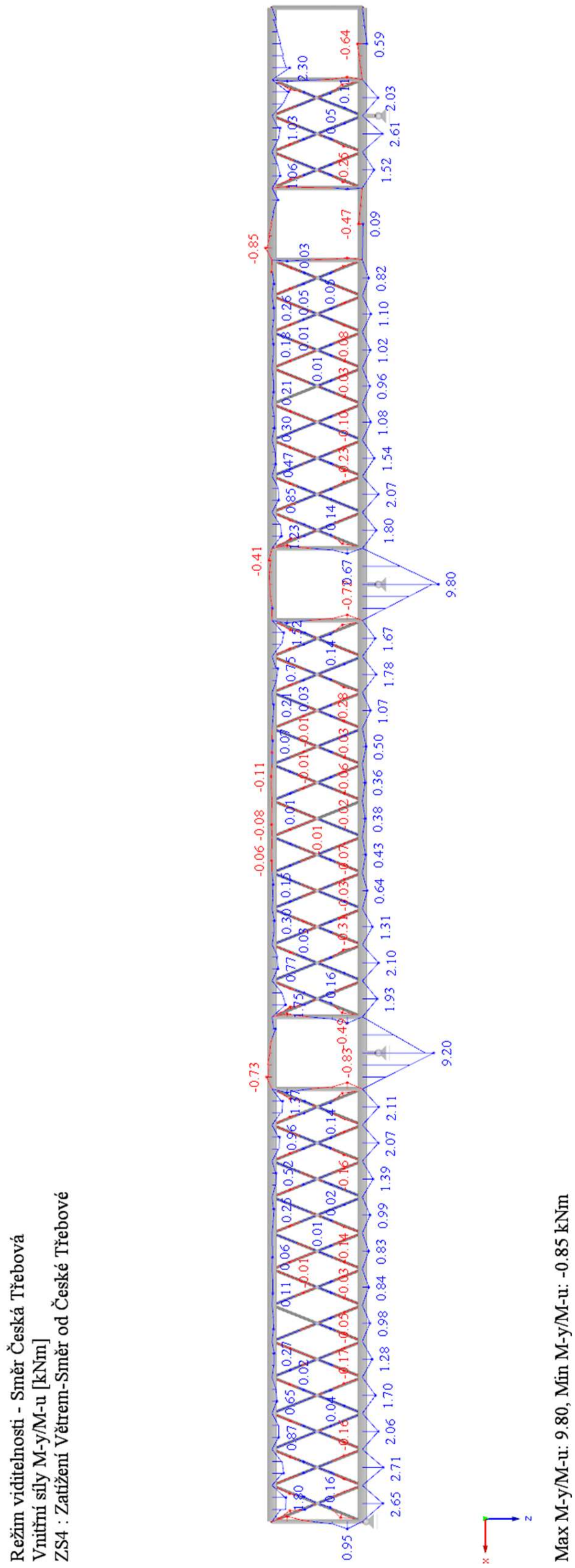


Obr. 124 Ohybový moment M_y od zatížení sněhem



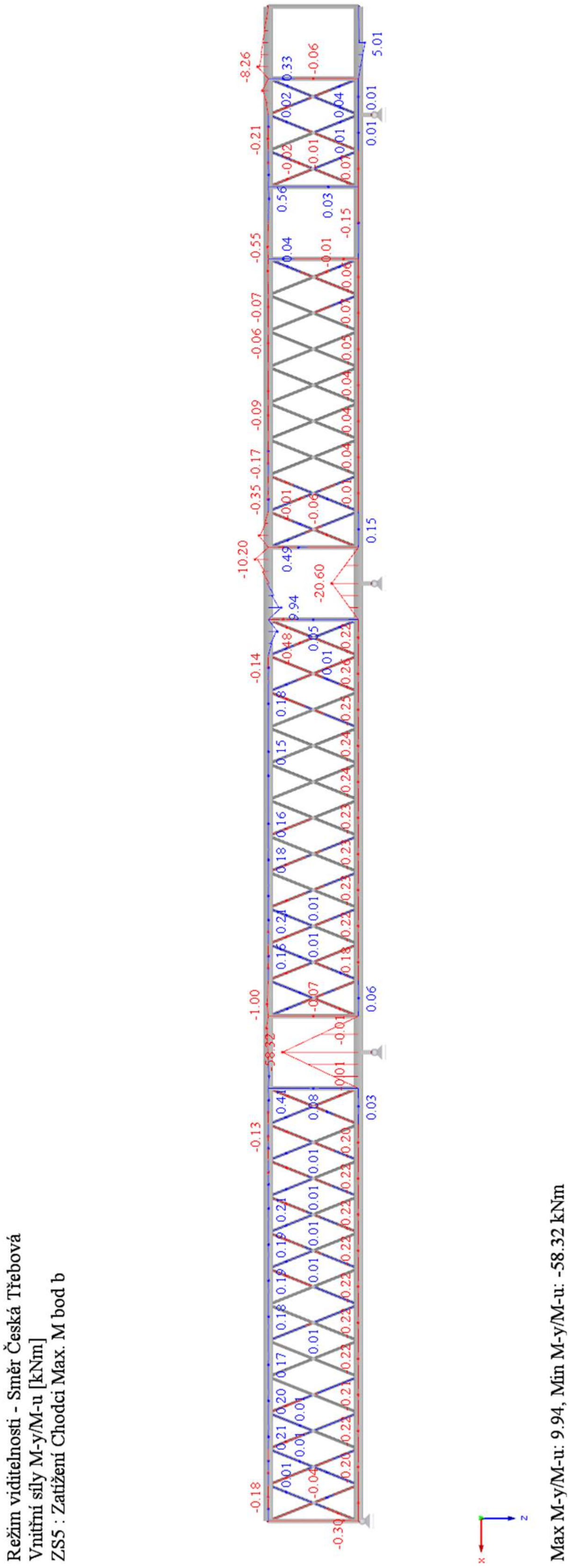
Obr. 125 Ohybový moment My od zatížení větrem

(směr od Brna.)

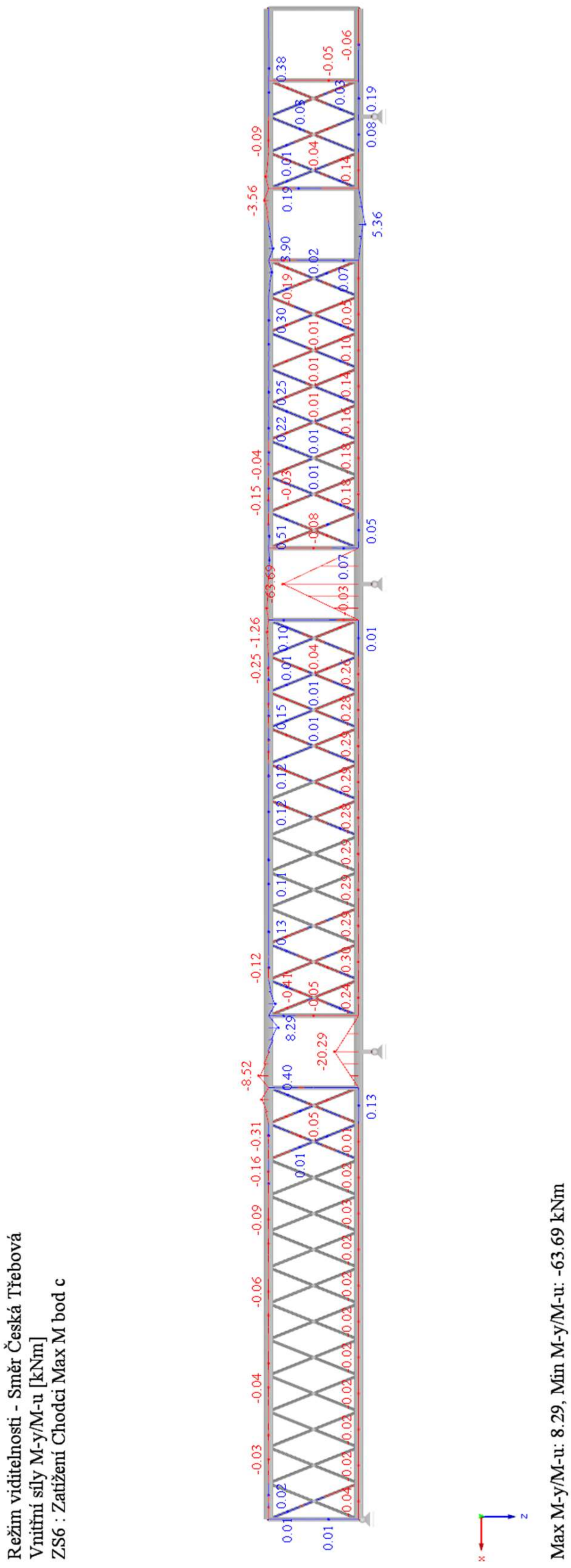


Obr. 126 Ohybový moment My od zatížení větrem

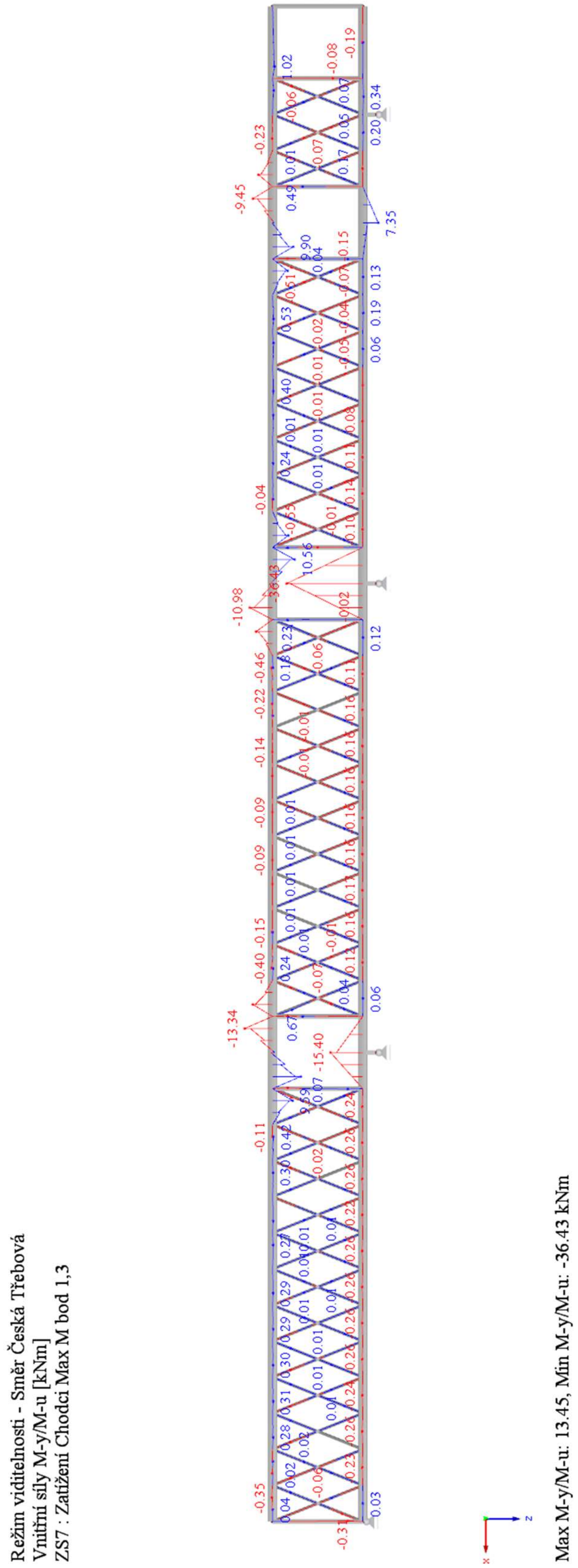
(směr od Č. T.)

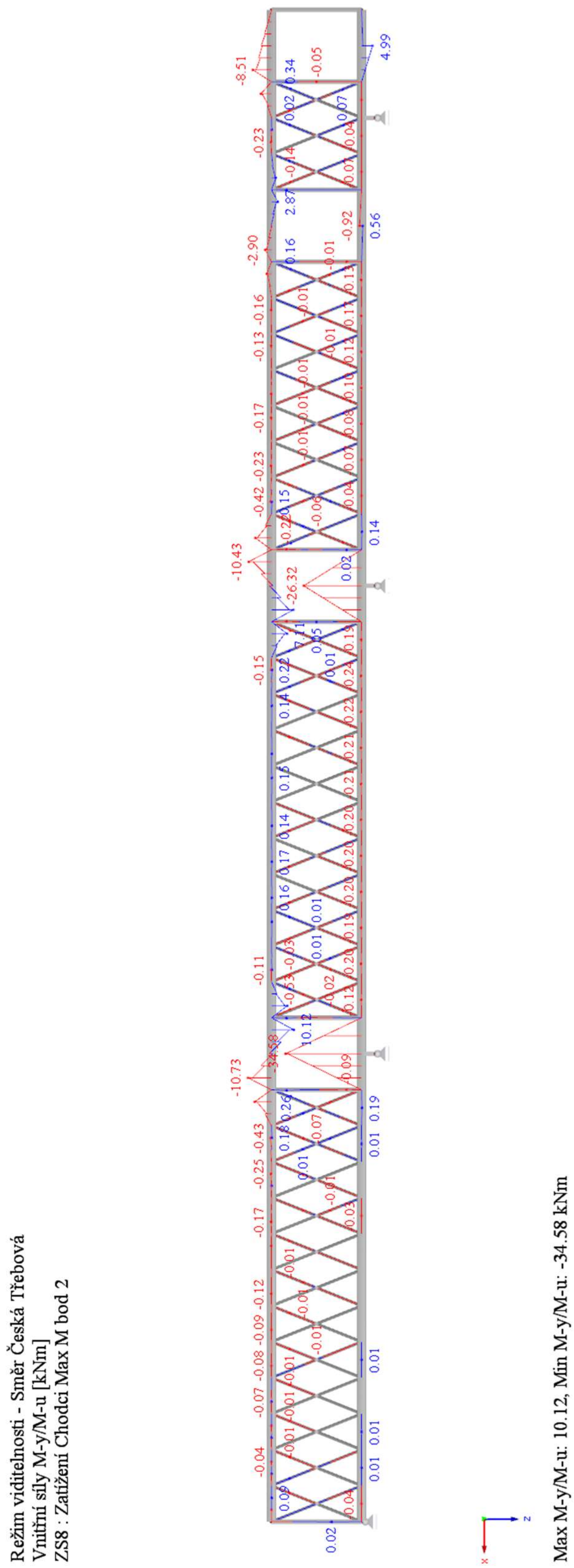


Obr. 127 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 128 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (podpora c)



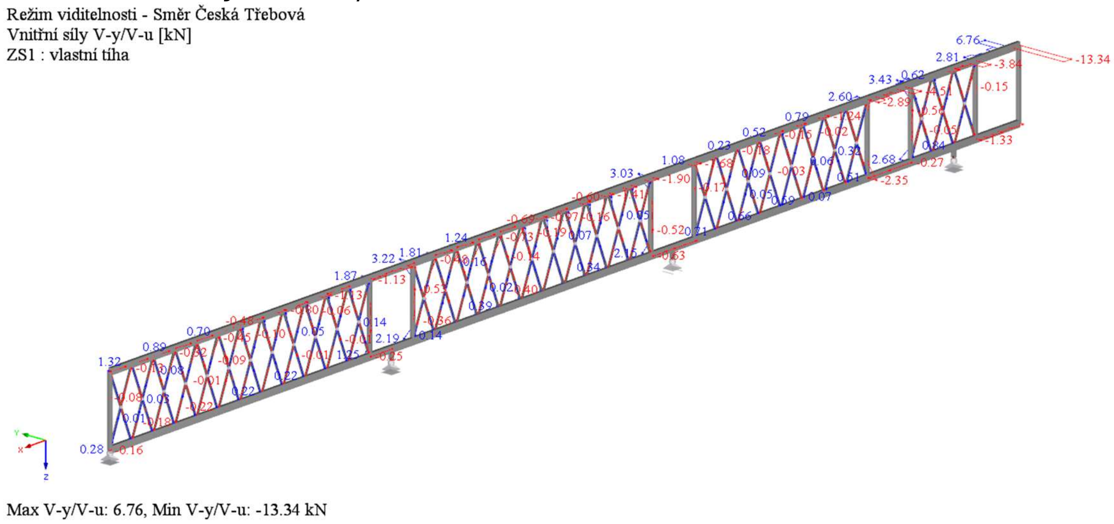


Obr. 129 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (bod 1, 3)

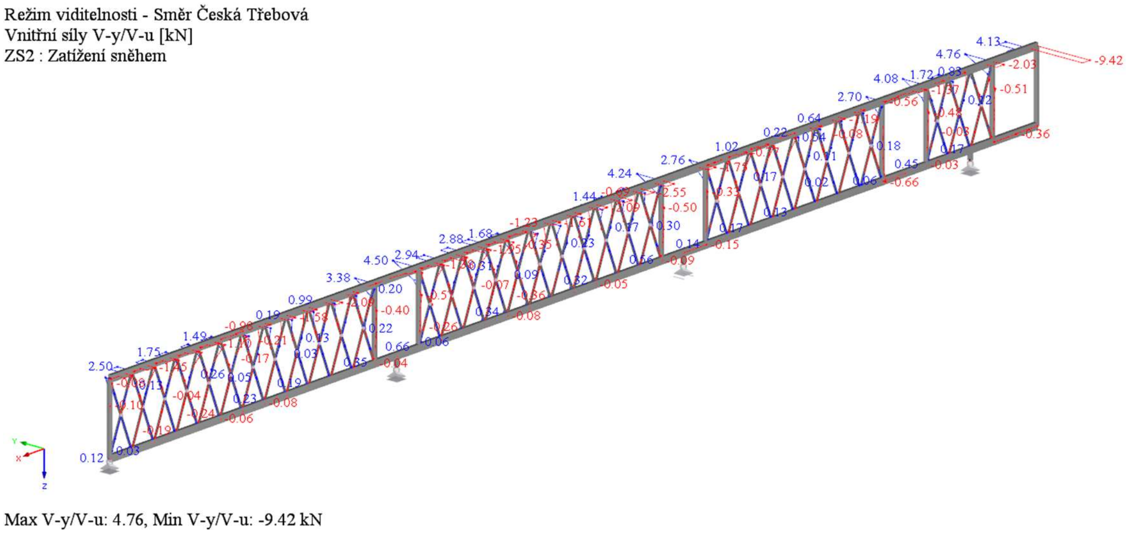
Obr. 130 Ohybový moment My od zatížení chodci max M (bod 2)

Průběh je podobný jako u kapitoly 10.1.3 Ohybový moment M_y.
Vlivem vynechání diagonál v místě otvorů u podpory d vznikají v této části ohybové momenty v horním a dolním pásu (obrázek 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130). Vyskytují se prakticky v každém zatěžovacím stavu. U sloupků vznikají špičky ohybových momentů.

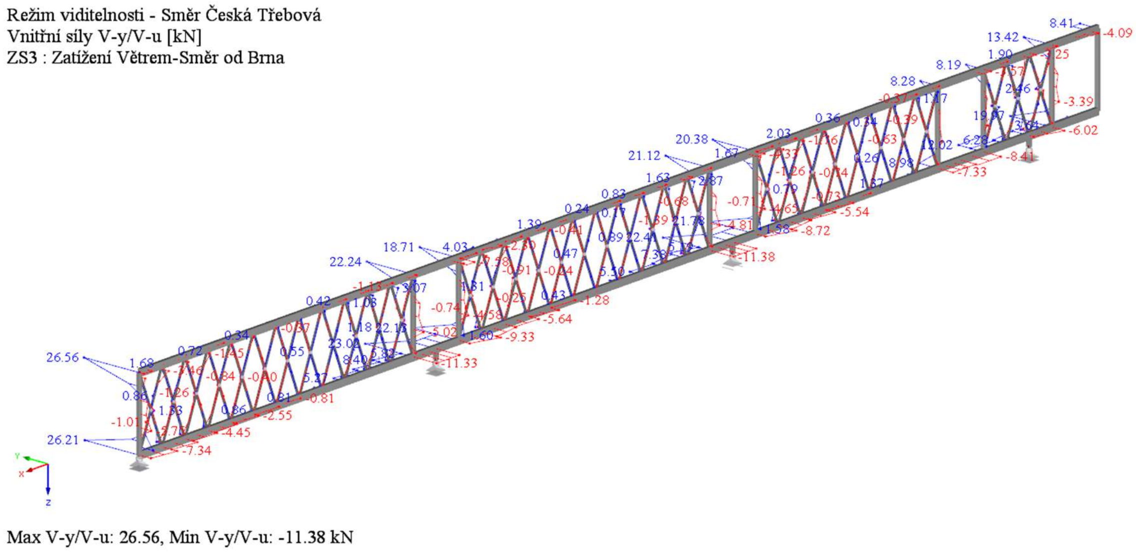
10.2.4. Posouvající síla V_y



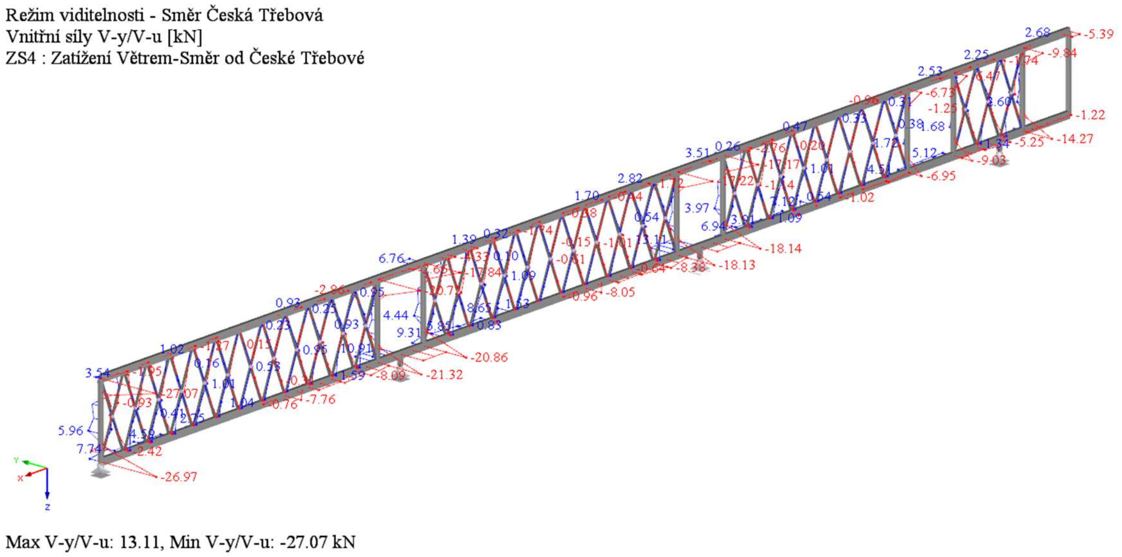
Obr. 131 Posouvající síla V_y od vlastní tíhy



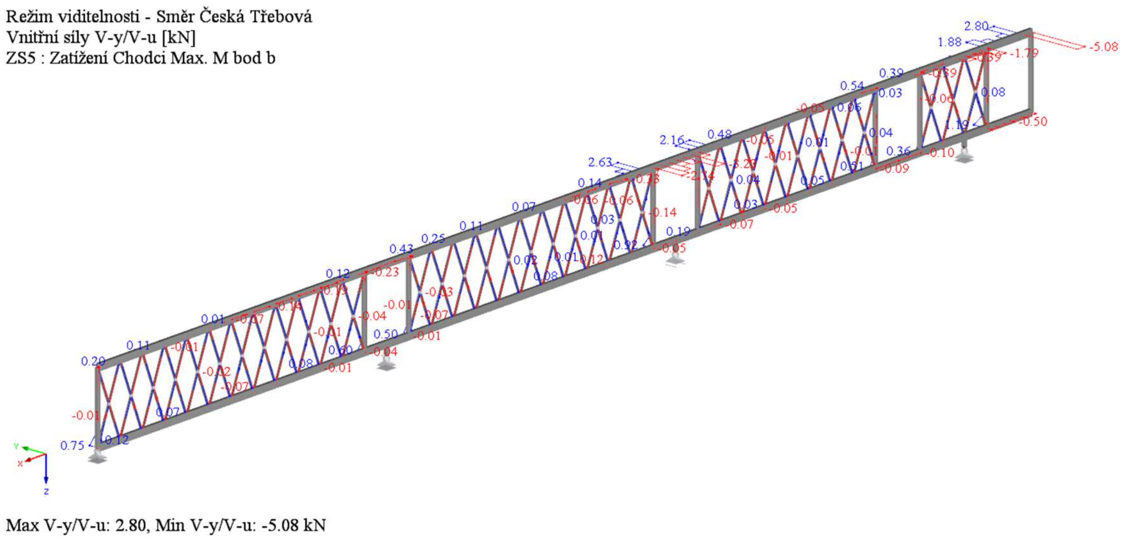
Obr. 132 Posouvající síla V_y od zatížení sněhem



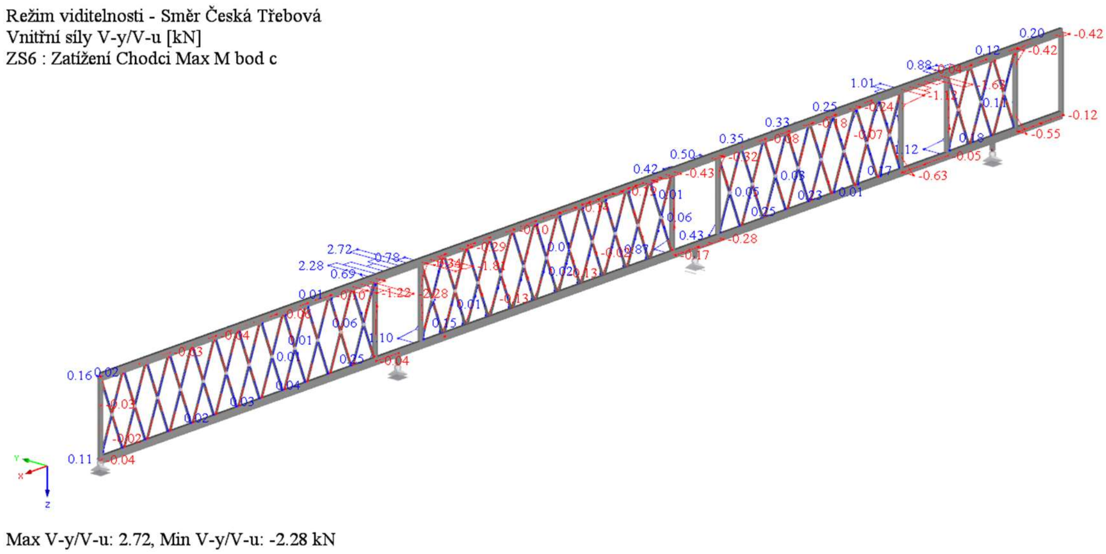
Obr. 133 Posouvající síla V_y od zatížení větrem (směr od Brna)



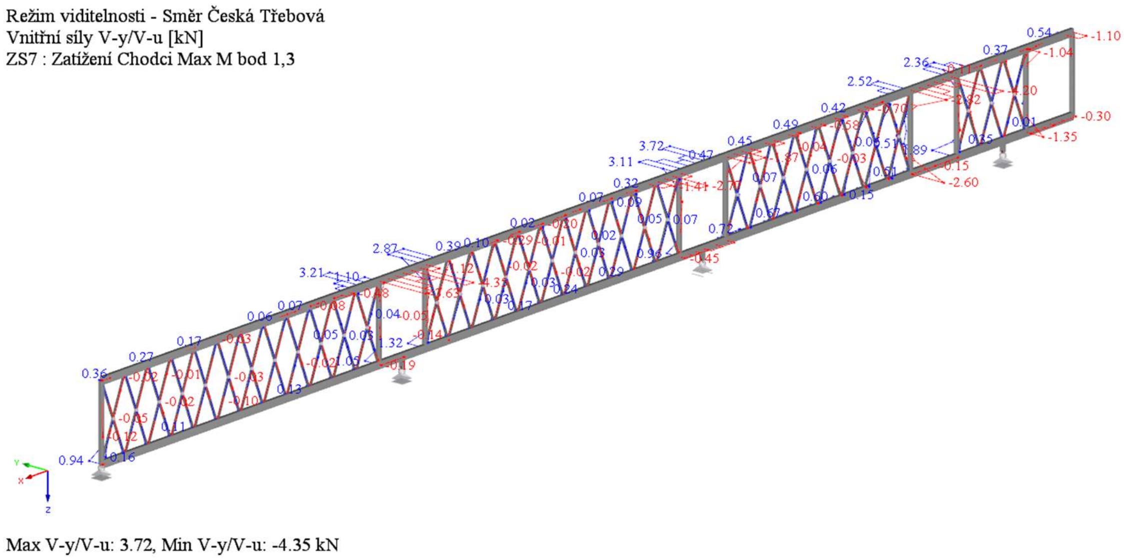
Obr. 134 Posouvající síla V_y od zatížení větrem (směr od Č. T.)



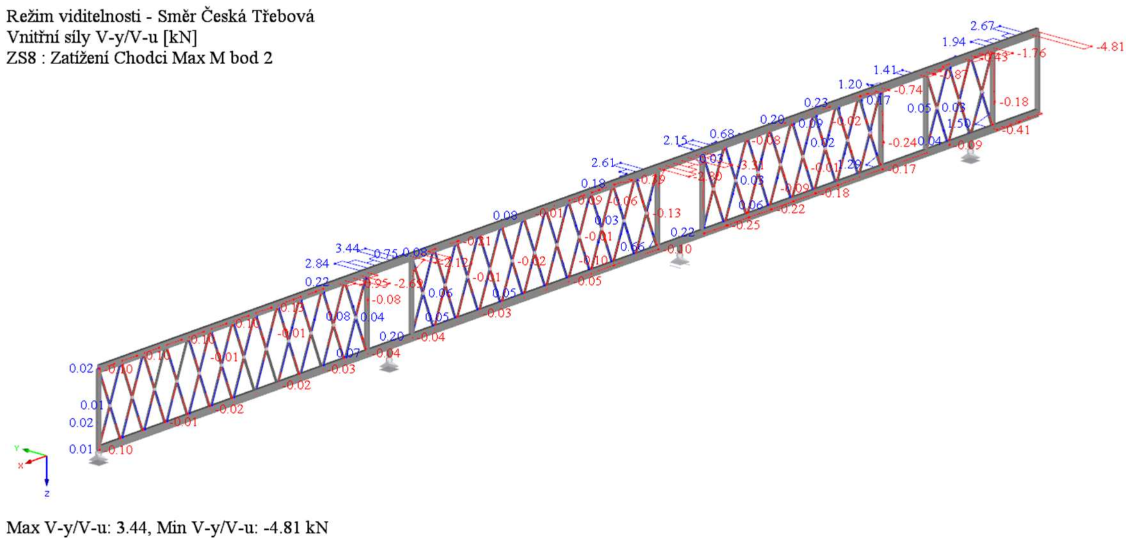
Obr. 135 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 136 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (podpora c)



Obr. 137 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (bod 1, 3)

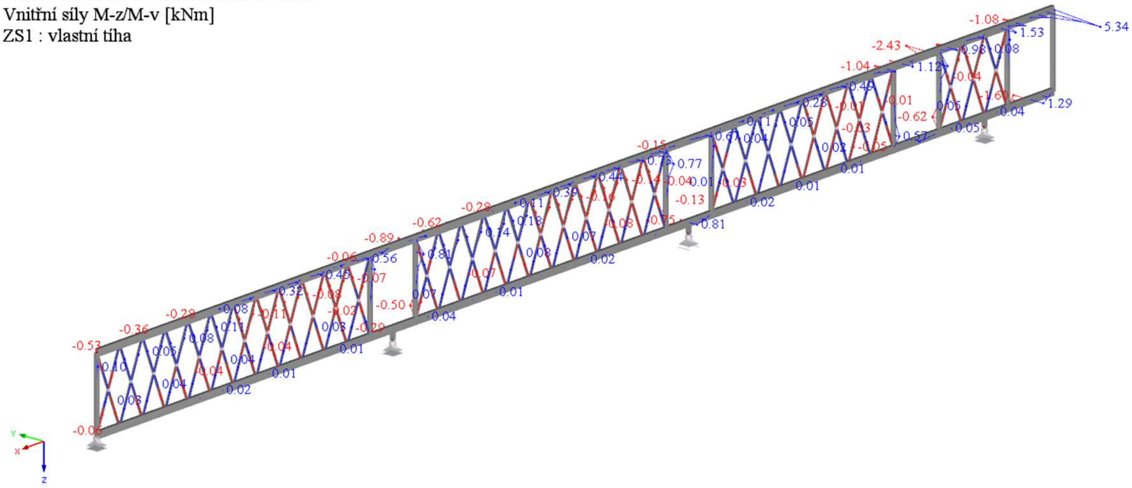


Obr. 138 Posouvající síla V_y od zatížení chodci max M (bod 2)

Průběh je podobný jako u 10.1.4 Posouvající síla V_y.
Na okraji pásu u podpory d v horním páse vznikají posouvající síly V_y (obrázek 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138). V tomto místě se nachází maximum V_y.
Na sloupky v blízkosti podpory d vzniklé vynecháním příhradového pásu pro otvory pro vstup působí posouvající síly V_y.

10.2.5. Ohybový moment M_z

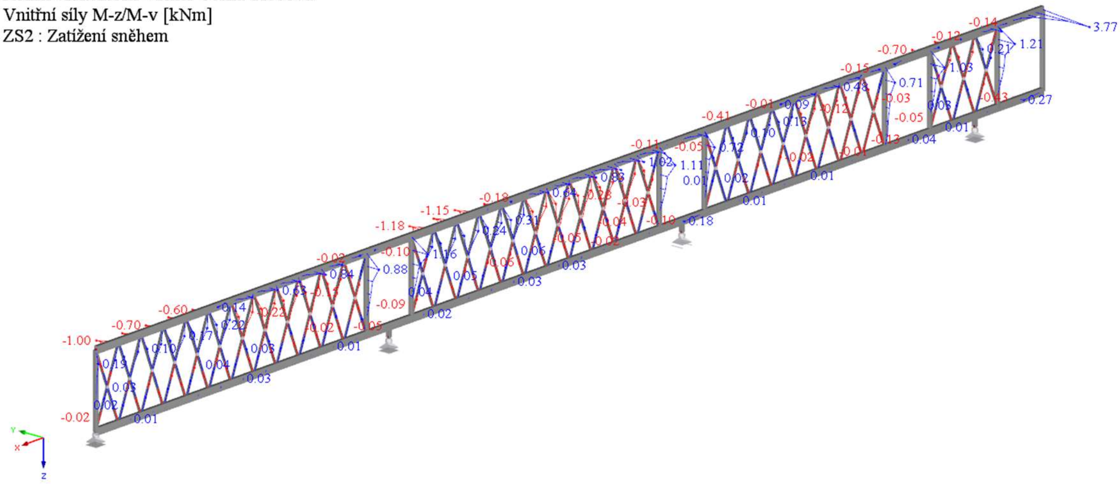
Režim viditelnosti - Směr Česká Třebová
Vnitřní síly M-z/M-v [kNm]
ZS1 : vlastní tíha



Max M-z/M-v: 5.34, Min M-z/M-v: -2.43 kNm

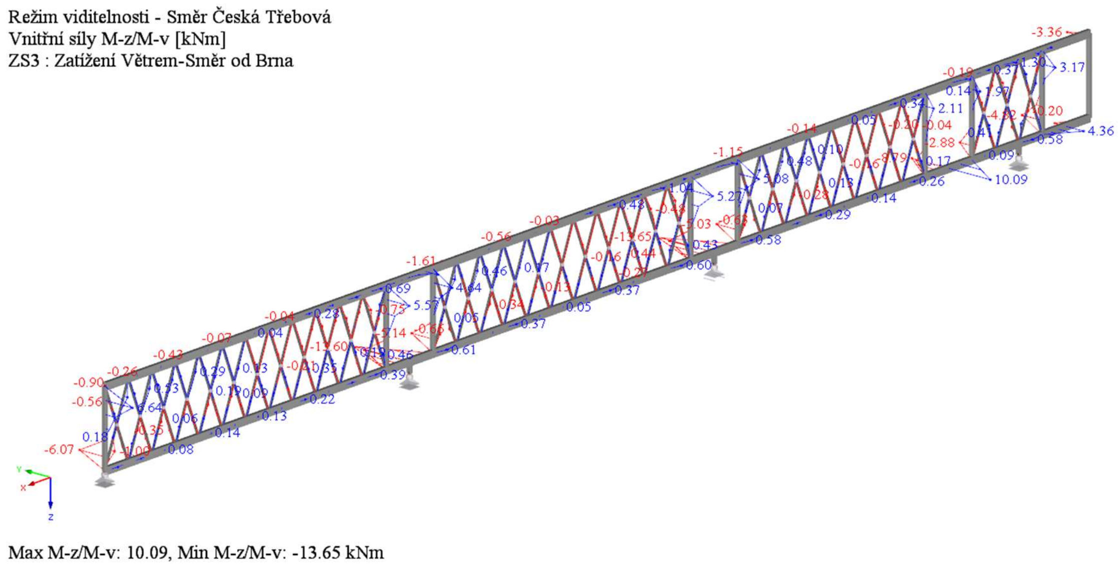
Obr. 139 Ohybový moment M_z od vlastní tíhy

Režim viditelnosti - Směr Česká Třebová
Vnitřní síly M-z/M-v [kNm]
ZS2 : Zatížení sněhem

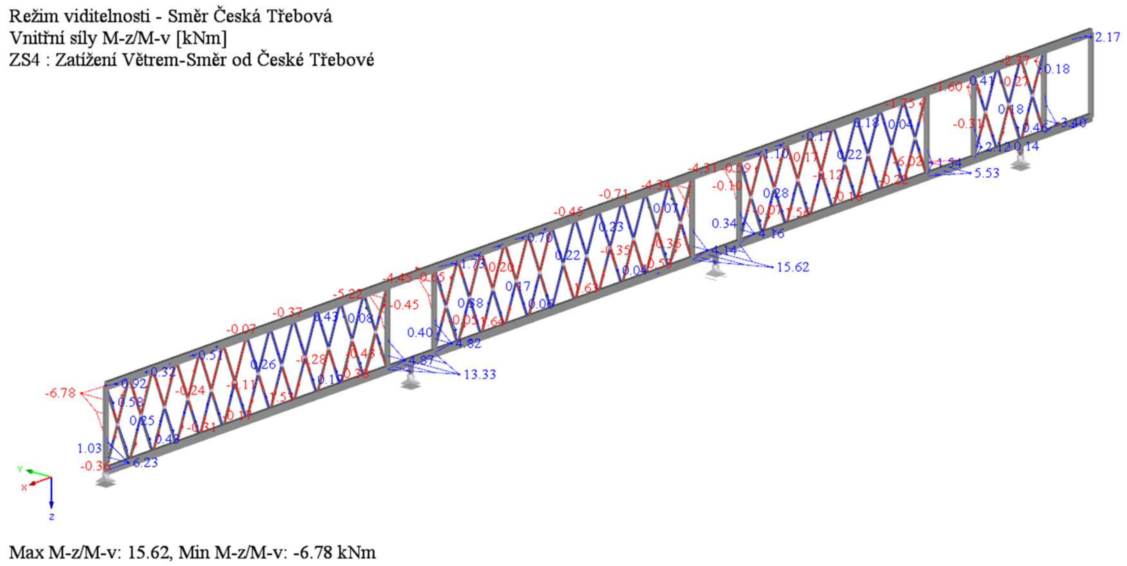


Max M-z/M-v: 3.77, Min M-z/M-v: -1.18 kNm

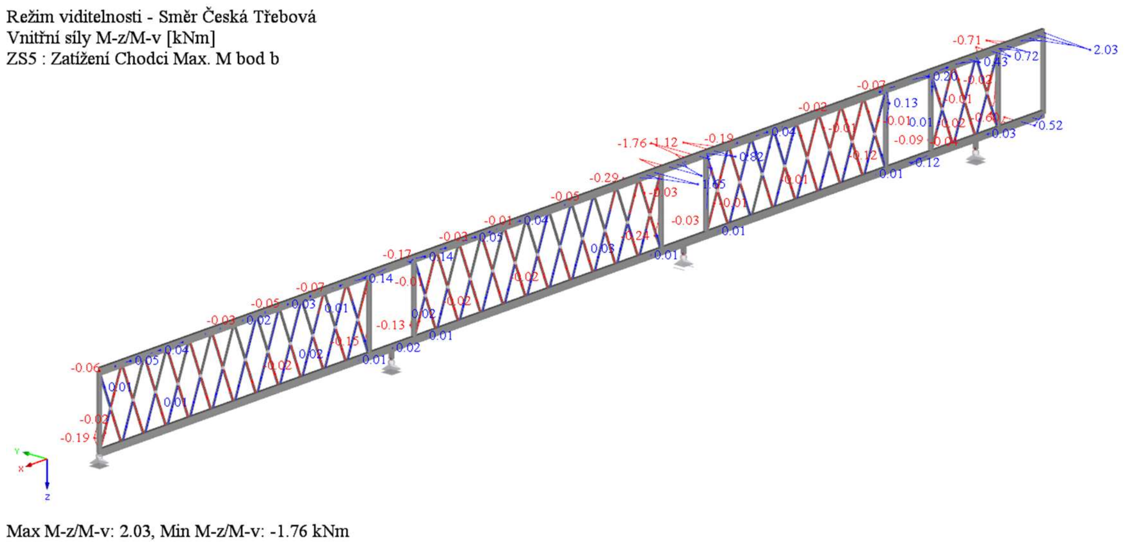
Obr. 140 Ohybový moment M_z od zatížení sněhem



Obr. 141 Ohybový moment M_z od zatížení větrem (směr od Brna)

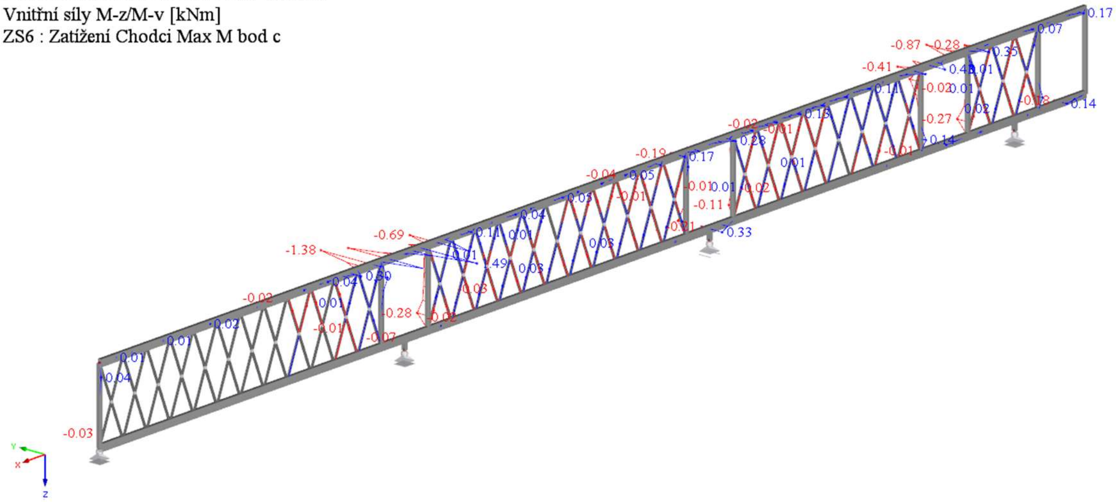


Obr. 142 Ohybový moment M_z od zatížení větrem (směr od Č. T.)



Obr. 143 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (podpora b)

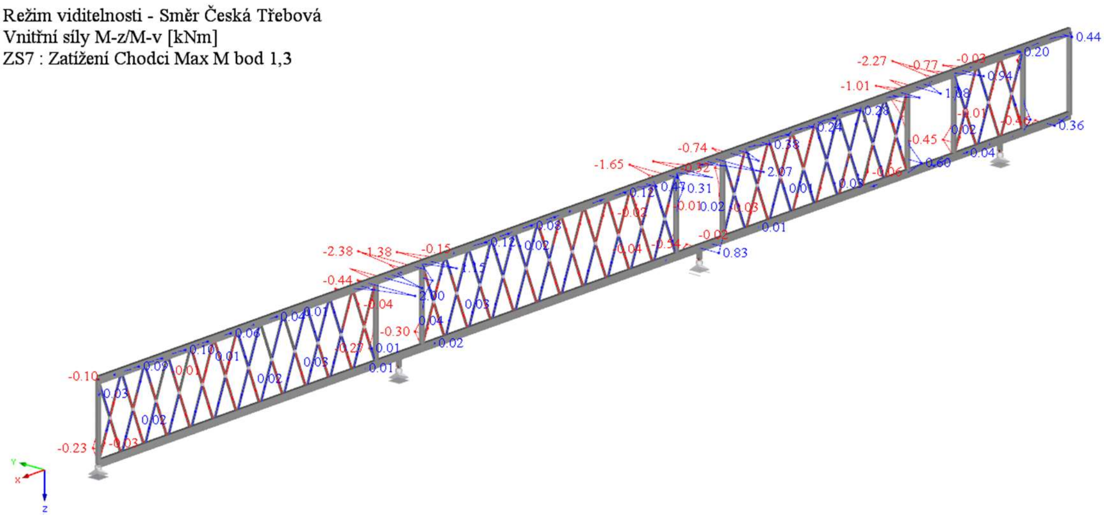
Režim viditelnosti - Směr Česká Třebová
Vnitřní síly M-z/M-v [kNm]
ZS6 : Zatížení Chodci Max M bod c



Max M-z/M-v: 1.49, Min M-z/M-v: -1.38 kNm

Obr. 144 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (podpora c)

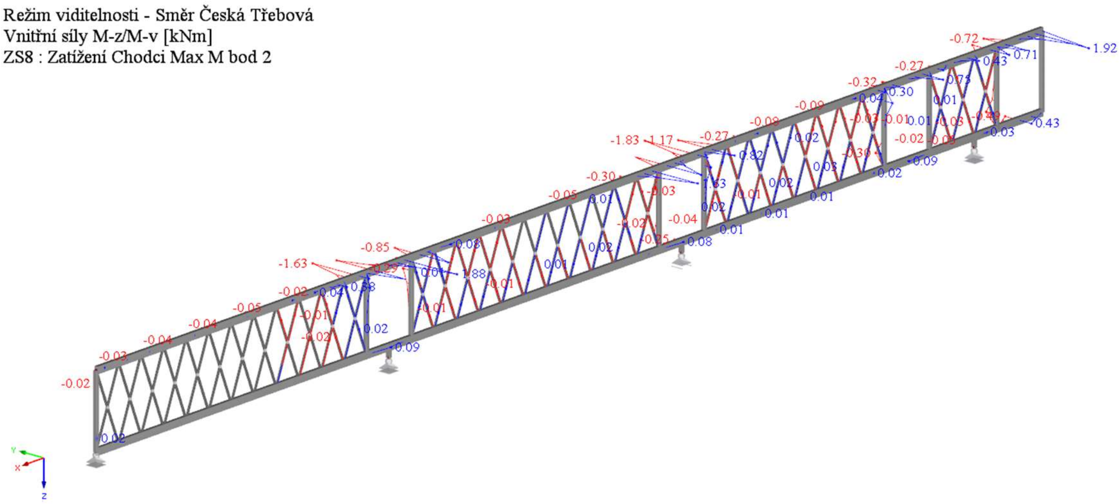
Režim viditelnosti - Směr Česká Třebová
Vnitřní síly M-z/M-v [kNm]
ZS7 : Zatížení Chodci Max M bod 1,3



Max M-z/M-v: 2.07, Min M-z/M-v: -2.38 kNm

Obr. 145 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (bod 1, 3)

Režim viditelnosti - Směr Česká Třebová
Vnitřní síly M-z/M-v [kNm]
ZS8 : Zatížení Chodci Max M bod 2

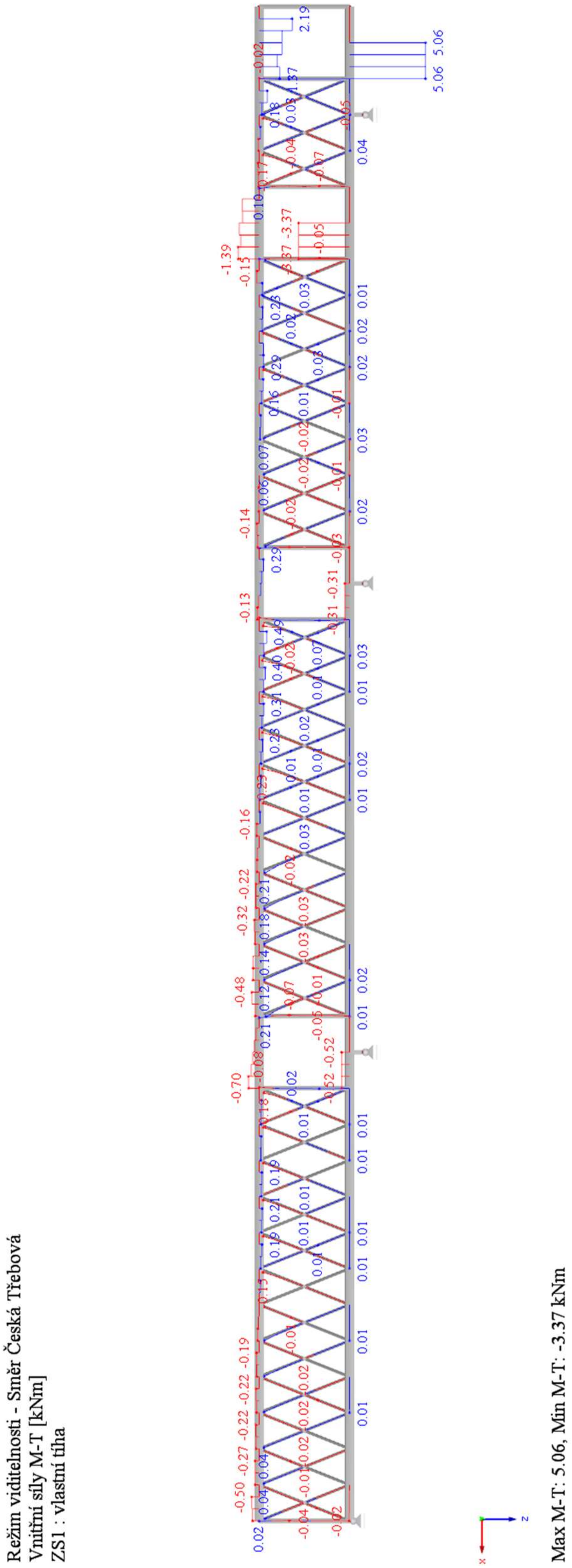


Max M-z/M-v: 1.92, Min M-z/M-v: -1.83 kNm

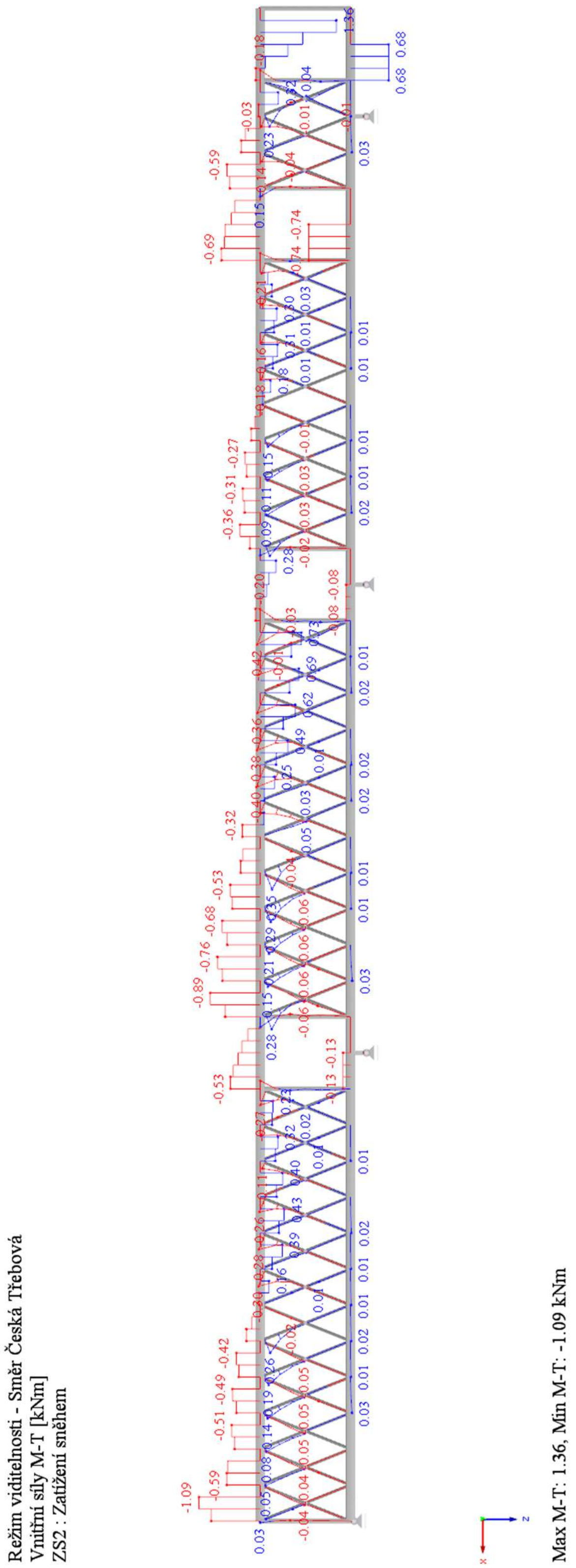
Obr. 146 Ohybový moment M_z od zatížení chodci max M (bod 2)

Průběh je podobný jako u kapitoly 10.1.5 Ohybový moment M_z.
V horním pásu na převislém konci u krajního sloupku vznikají špičky ohybových momentů (obrázek 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146).

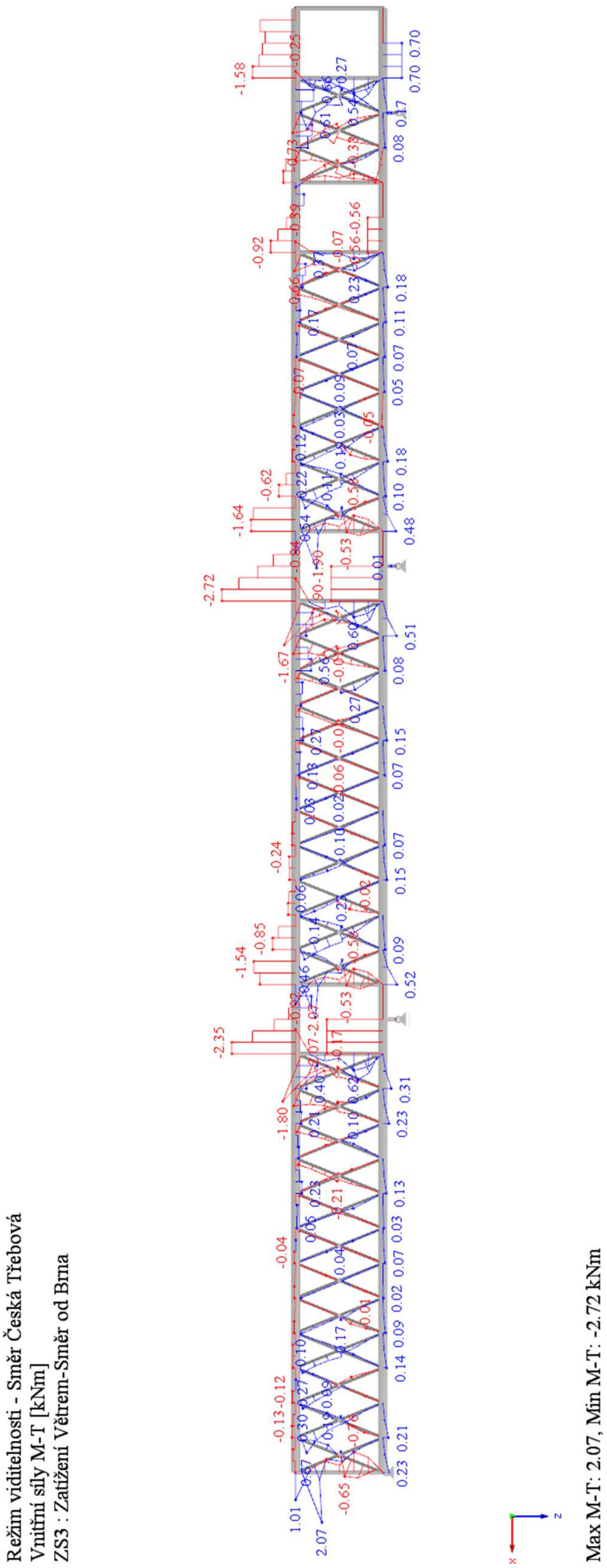
10.2.6. Kroutící moment M_t



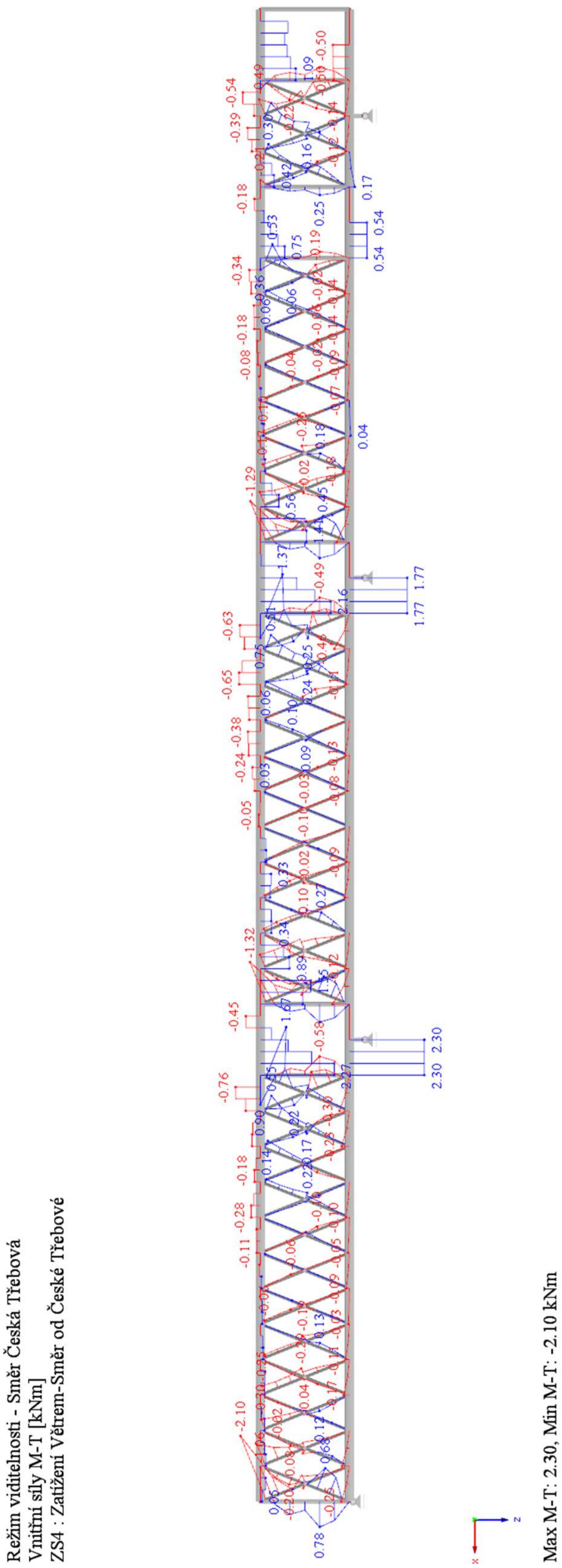
Obr. 147 Kroutící moment M_t od vlastní tíhy



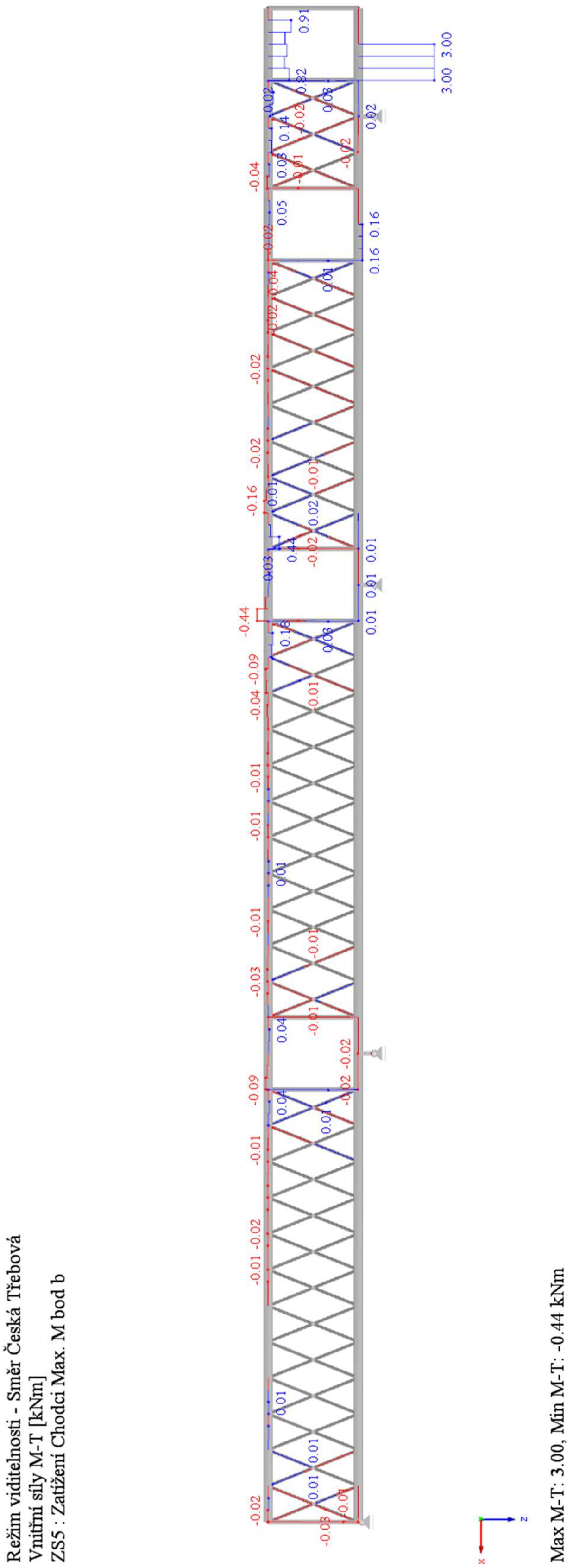
Obr. 148 Kroutící moment M_t od zatížení sněhem



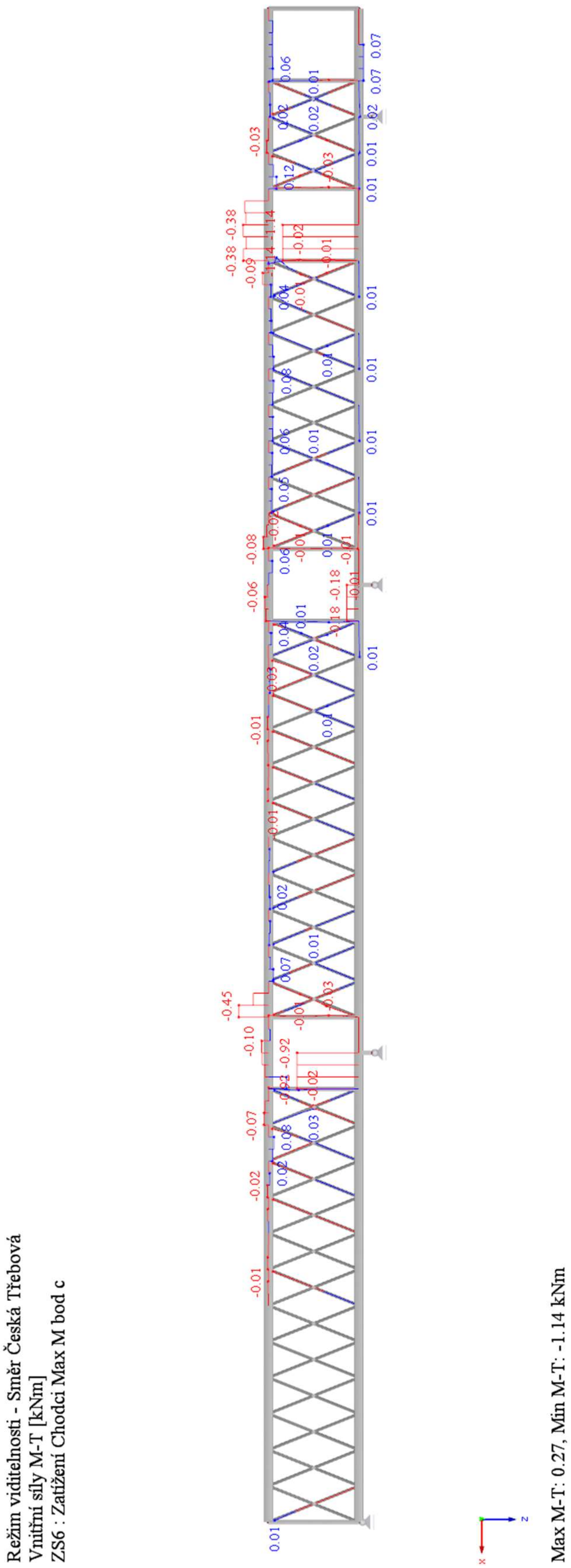
Obr. 149 Kroutící moment M_t od zatížení větrem (směr od Brna)



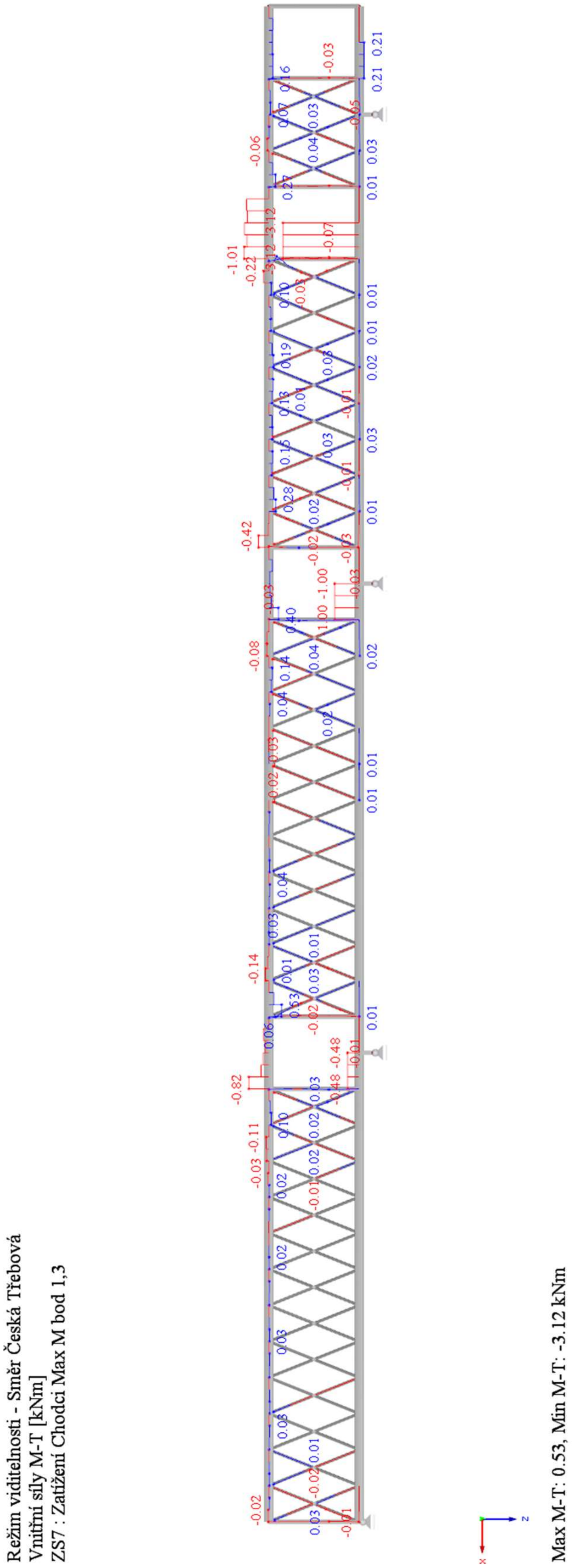
Obr. 150 Kroutící moment M_t od zatížení větrem (směr od Č. T.)



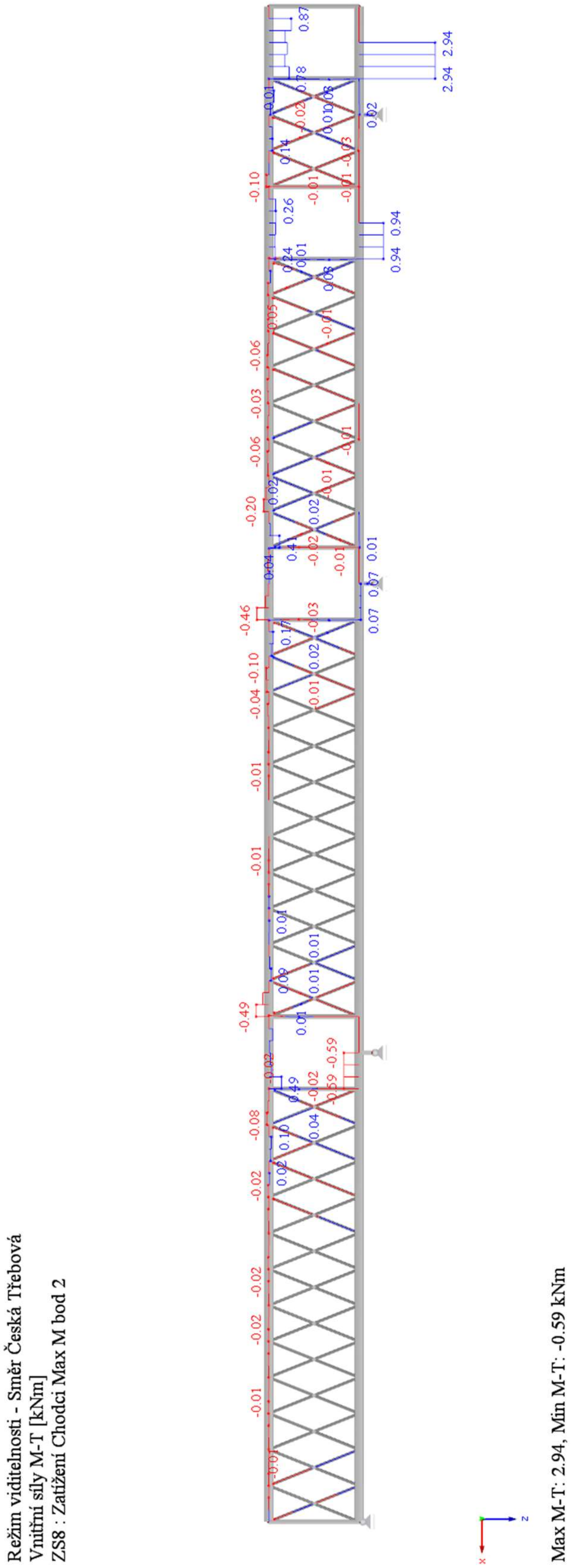
Obr. 151 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (podpora b)



Obr. 152 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (podpora c)



Obr. 153 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (bod 1, 3)



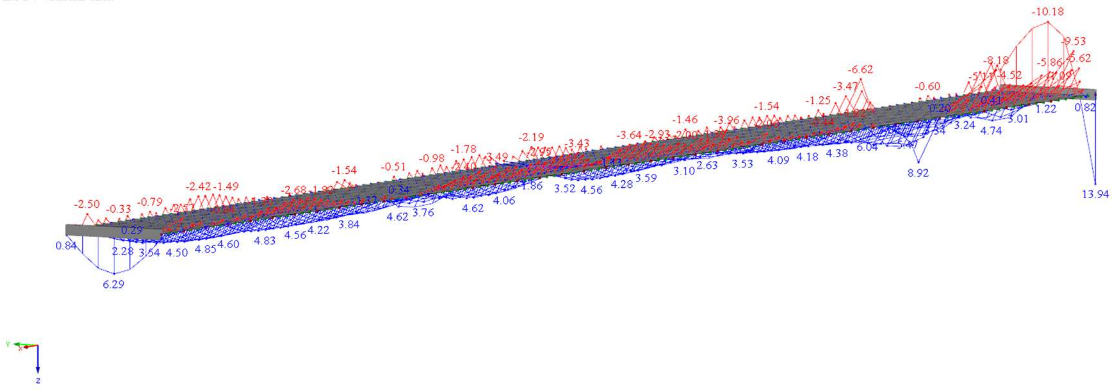
Obr. 154 Kroutící moment M_t od zatížení chodci max M (bod 2)

Průběh kroutícího momentu je podobný na 10.1.6 Kroutící moment M_t.
U sloupků v okolí podpory d je viditelné, že u horního a dolního pásu je zvětšená hodnota kroutícího momentu (obrázek 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154).

10.3. Zastřešení

10.3.1. Normálové síly N

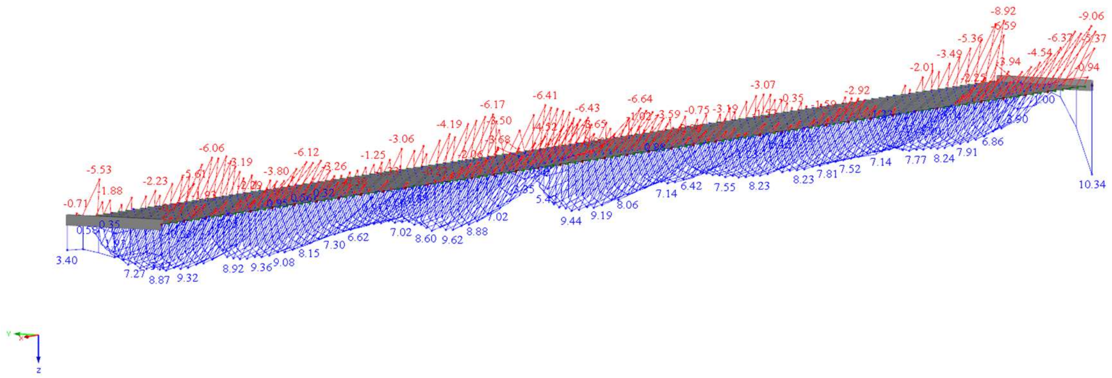
Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly N [kN]
ZS1 : vlastní tíha



Max N: 13.94, Min N: -10.18 kN

Obr. 155 Normálová síla od vlastní tíhy

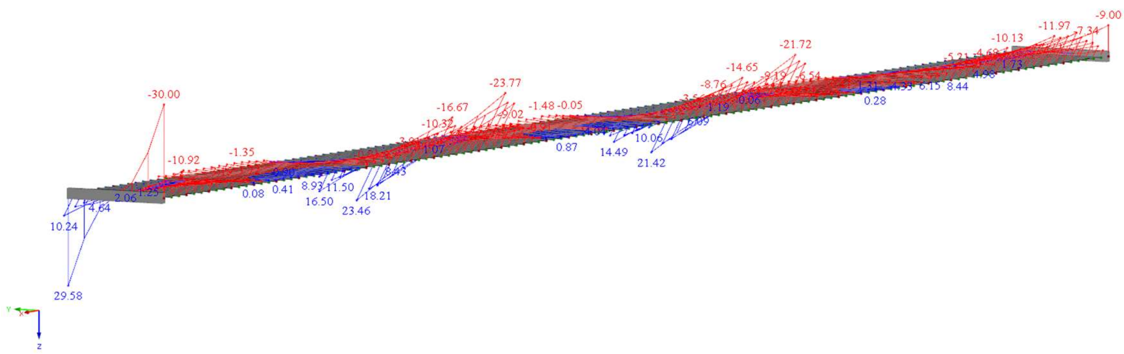
Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly N [kN]
ZS2 : Zatížení sněhem



Max N: 10.34, Min N: -9.06 kN

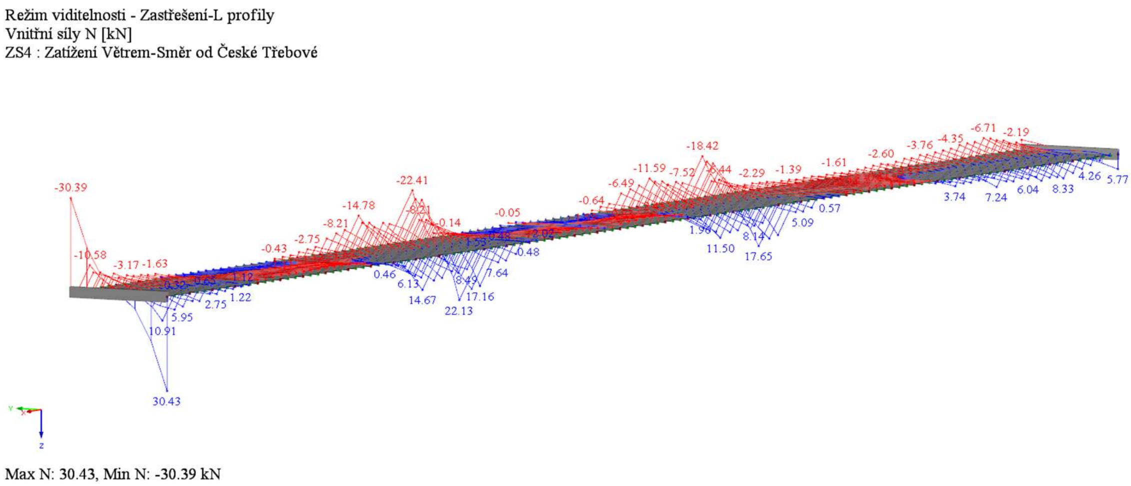
Obr. 156 Normálová síla N od zatížení sněhem

Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly N [kN]
ZS3 : Zatížení Větrem-Směr od Brna

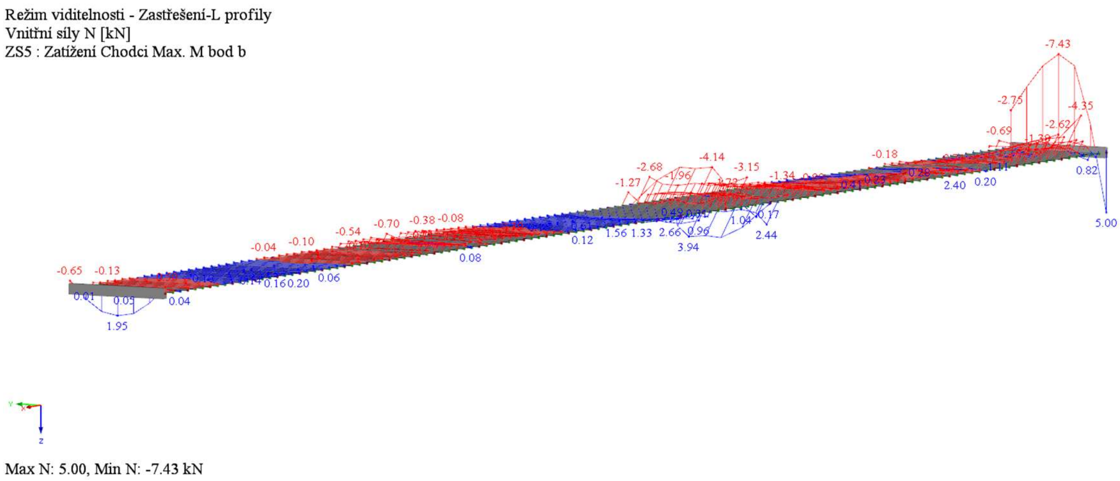


Max N: 29.58, Min N: -30.00 kN

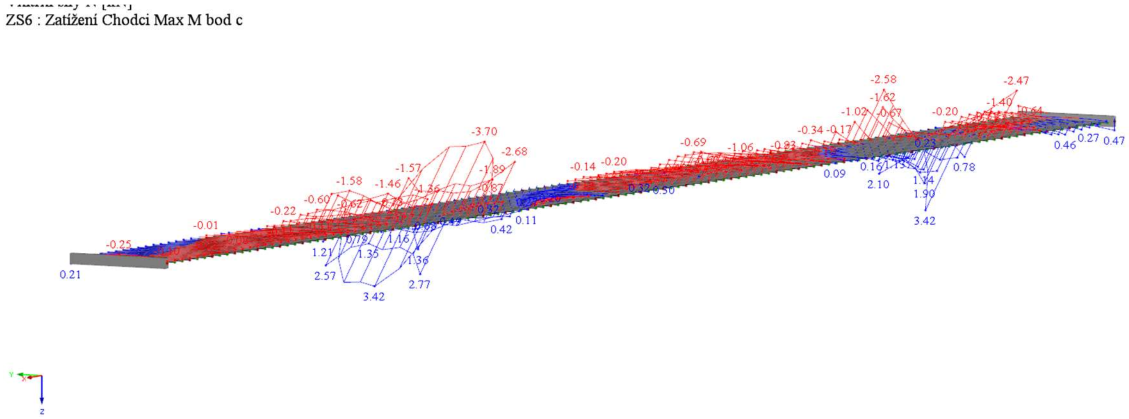
Obr. 157 Normálová síla N od zatížení větrem (směr od Brna)



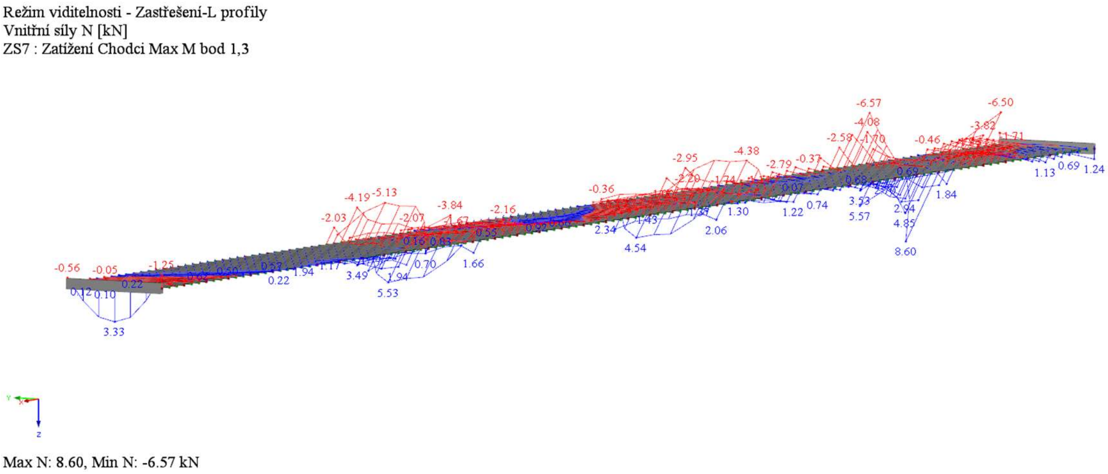
Obr. 158 Normálová síla od zatížení větrem (směr od Č. T.)



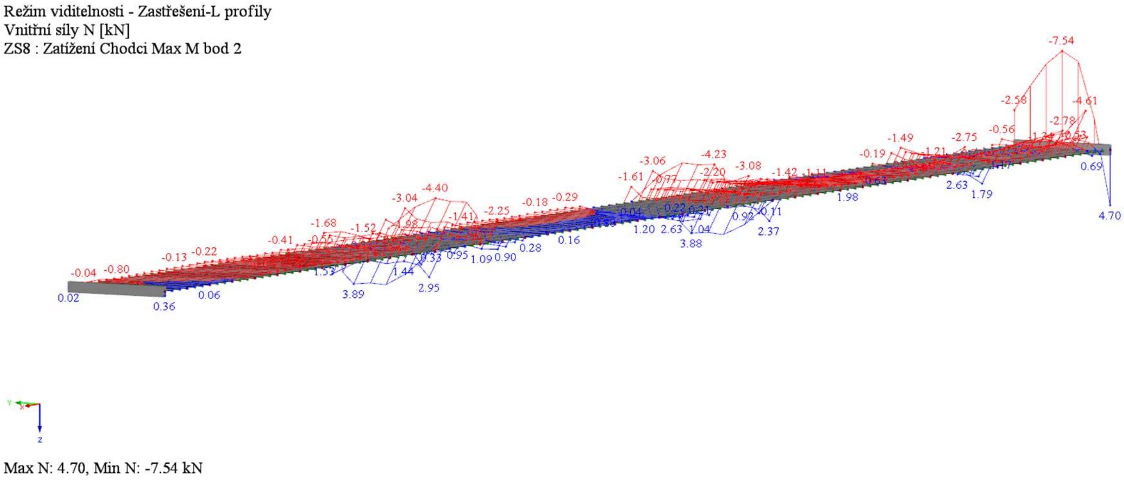
Obr. 159 Normálová síla N od zatížení chodci (podpora b)



Obr. 160 Normálová síla N od zatížení chodci (podpora c)



Obr. 161 Normálová síla N od zatížení chodci (bod 1, 3)



Obr. 162 Normálová síla N od zatížení chodci (bod 2)

Od zatížení vlastní tíhou (obrázek 155) vznikají normálové síly takovým způsobem, že uprostřed nosníku je tah a v místě kotvení k hornímu pásu tlak. Maximální hodnoty normálových sil jsou dosaženy na okrajích v RHS profilech.

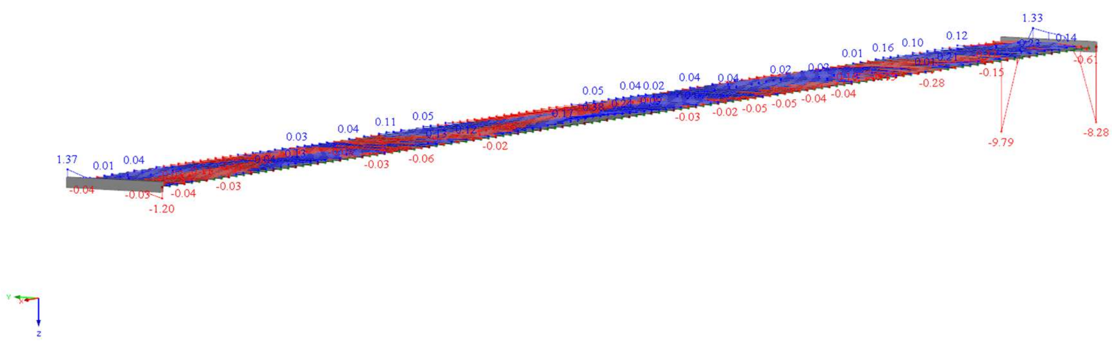
U zatížení sněhem (obrázek 156) je průběh normálových sil na L-profilech obdobný jako u vlastní tíhy. Jen normálové síly u RHS profilů jsou menší než u L-profilů.

Zatížení větrem (obrázek 157, 158) nejvíce namáhá L-profily v místě vynechání diagonál v příhradovém pásu. Vždy je část profilu tlačená a část tažená. Tento jev je závislý na směru větru.

Zatížení chodci vyvozuje největší normálovou sílu v místě vynechání diagonál (obrázek 159, 160, 161, 162).

10.3.2. Posouvající síla V_z

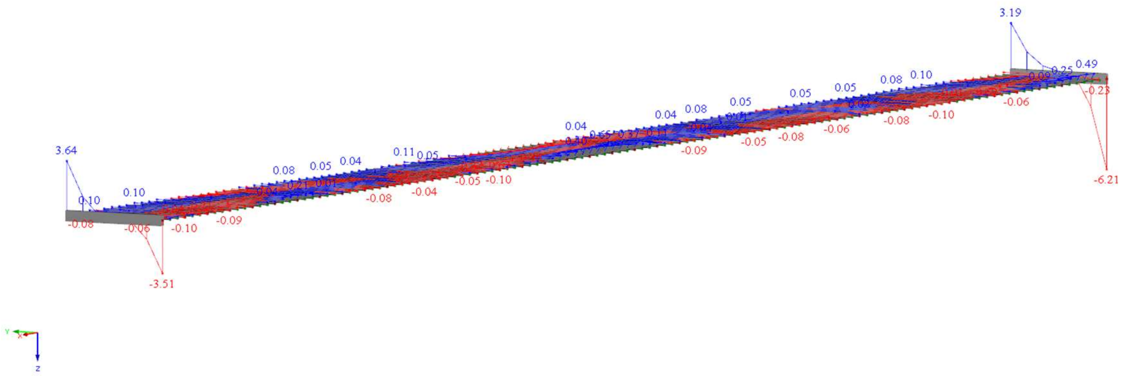
Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly V-z/V-v [kN]
ZS1 : vlastní tíha



Max V-z/V-v: 1.37, Min V-z/V-v: -9.79 kN

Obr. 163 Posouvající síla V_z od vlastní tíhy

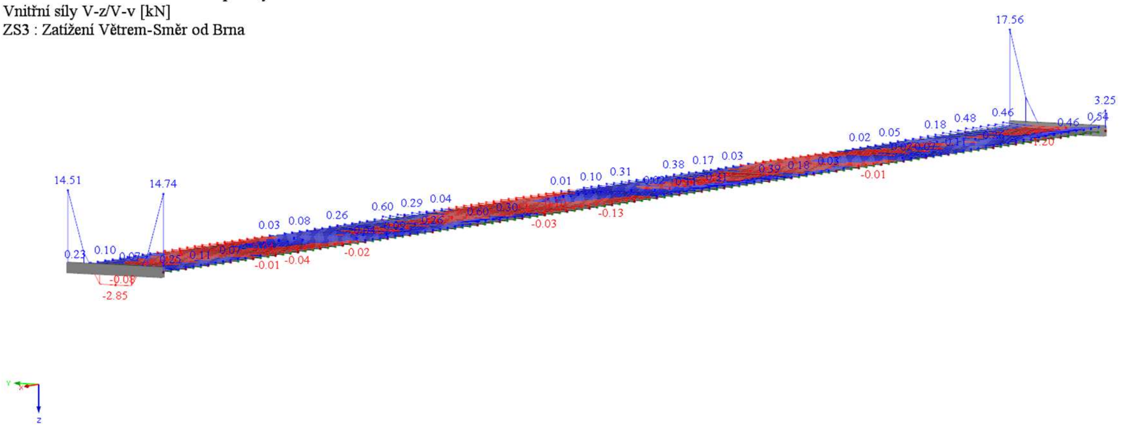
Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly V-z/V-v [kN]
ZS2 : Zatížení sněhem



Max V-z/V-v: 3.64, Min V-z/V-v: -6.21 kN

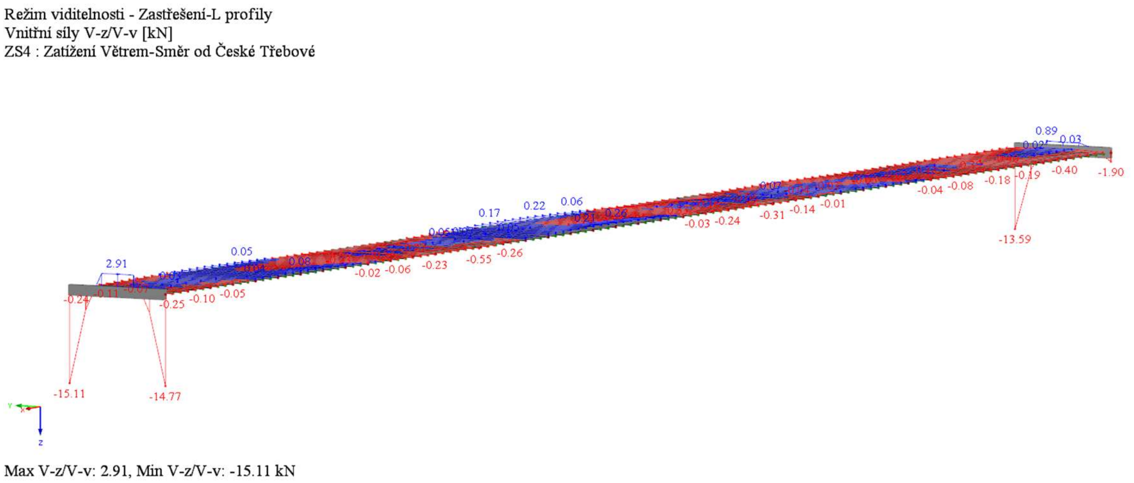
Obr. 164 Posouvající síla V_z od zatížení sněhem

Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly V-z/V-v [kN]
ZS3 : Zatížení Větrem-Směr od Brna

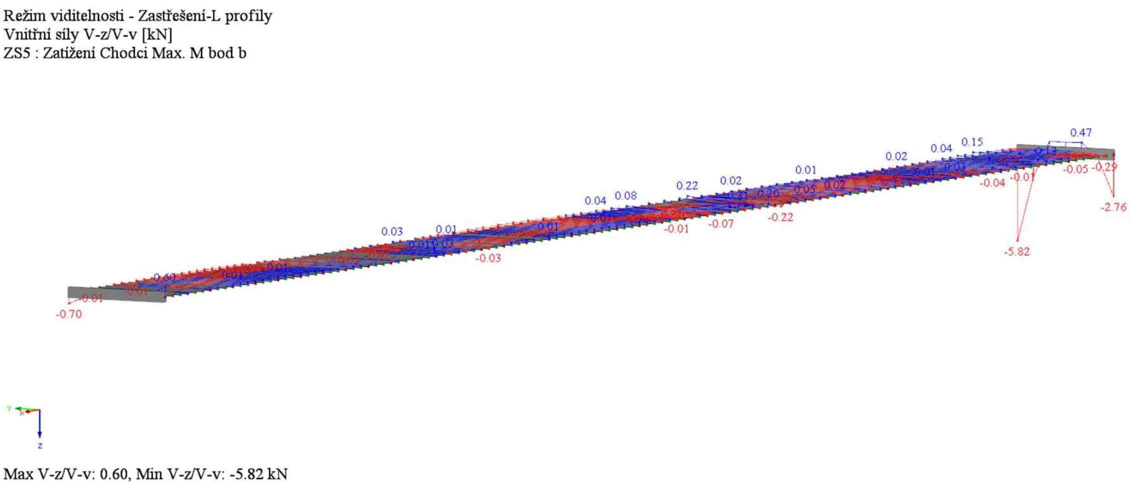


Max V-z/V-v: 17.56, Min V-z/V-v: -2.85 kN

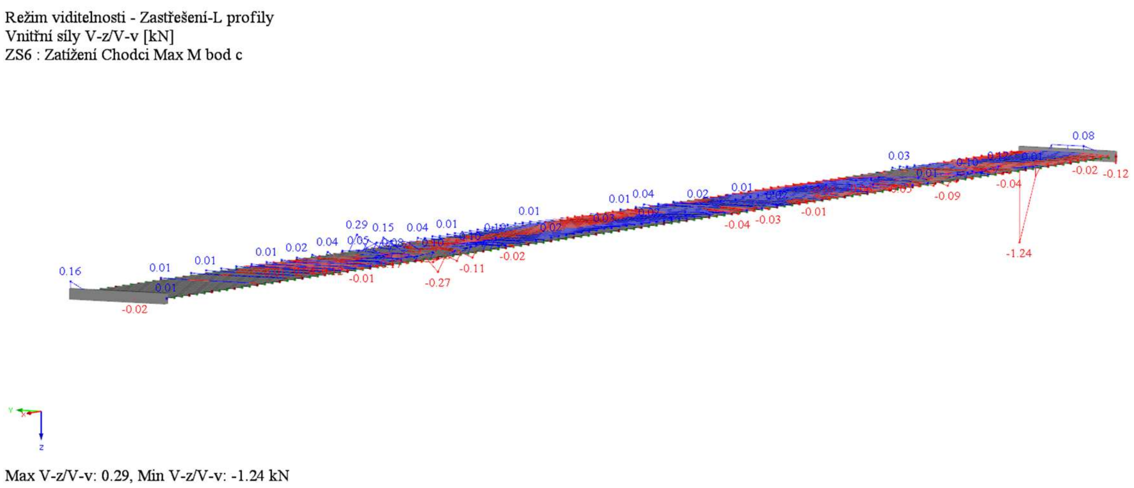
Obr. 165 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Brna)



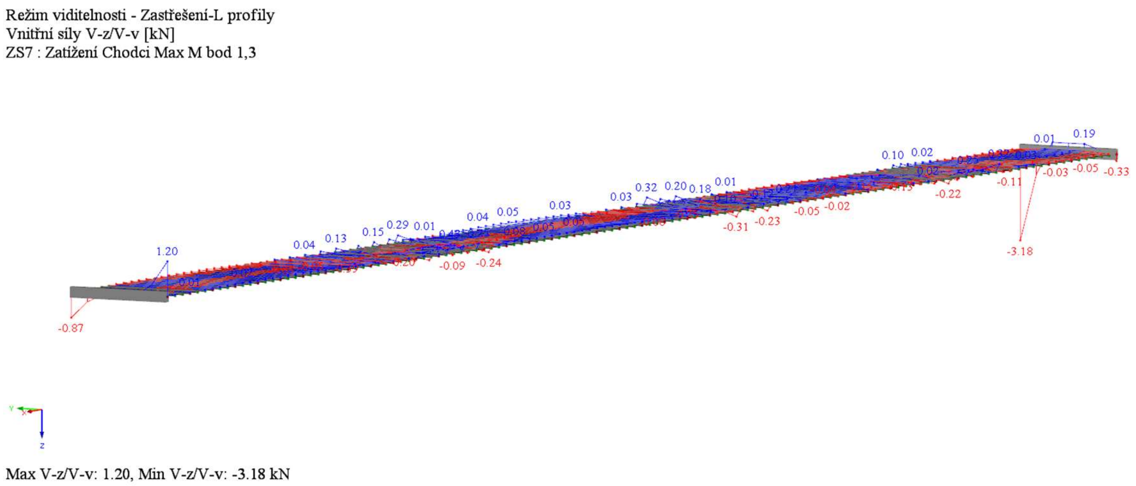
Obr. 166 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Č. T.)



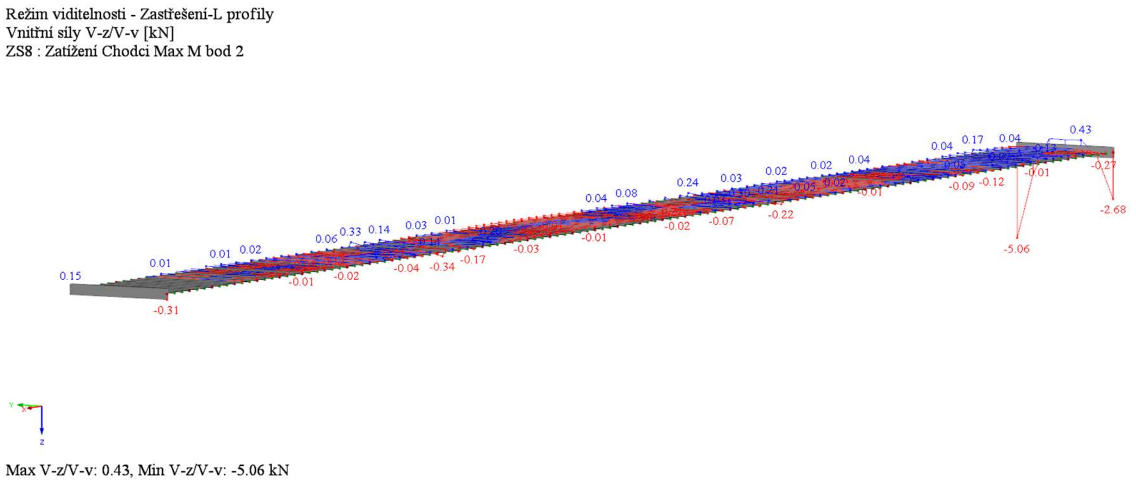
Obr. 167 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (podpora b)



Obr. 168 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (podpora c)



Obr. 169 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (bod 1, 3)

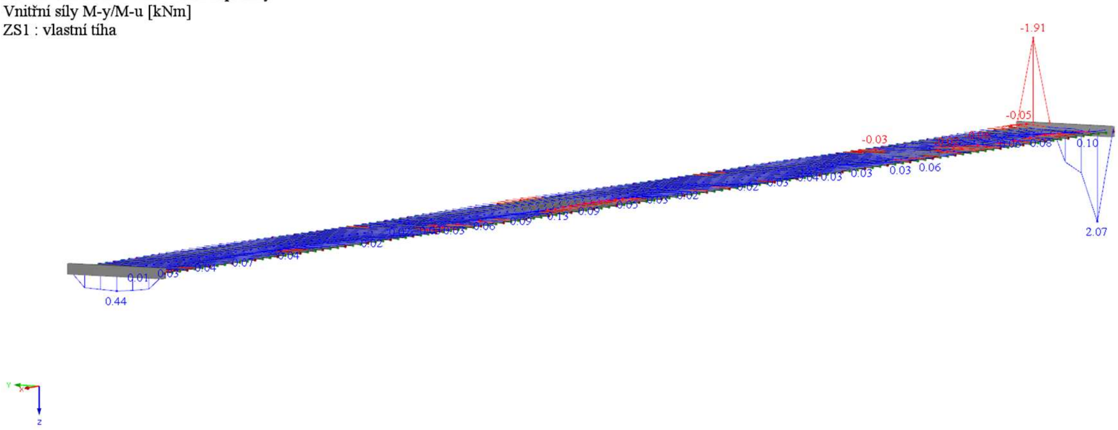


Obr. 170 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (bod 2)

Posouvající síly dosahují největších velikostí v RHS profilech na konci. V ostatních prutech mají velice malé hodnoty (obrázek 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170).

10.3.3. Ohybový moment My

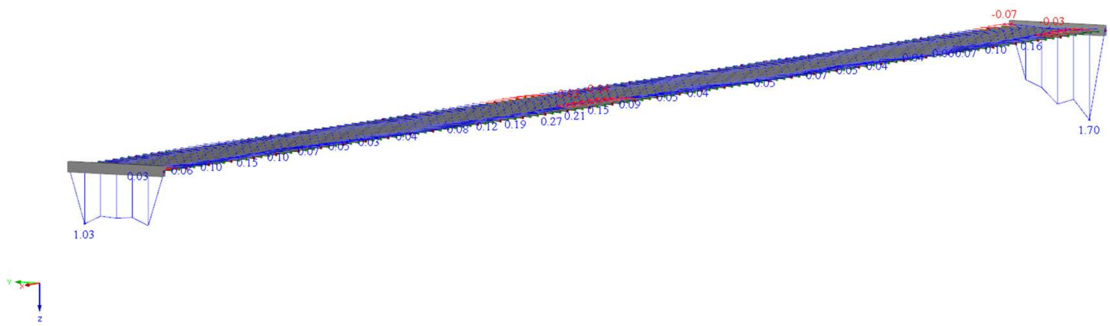
Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly M-y/M-u [kNm]
ZS1 : vlastní tíha



Max M-y/M-u: 2.07, Min M-y/M-u: -1.91 kNm

Obr. 171 Ohybový moment M_y od vlastní tíhy

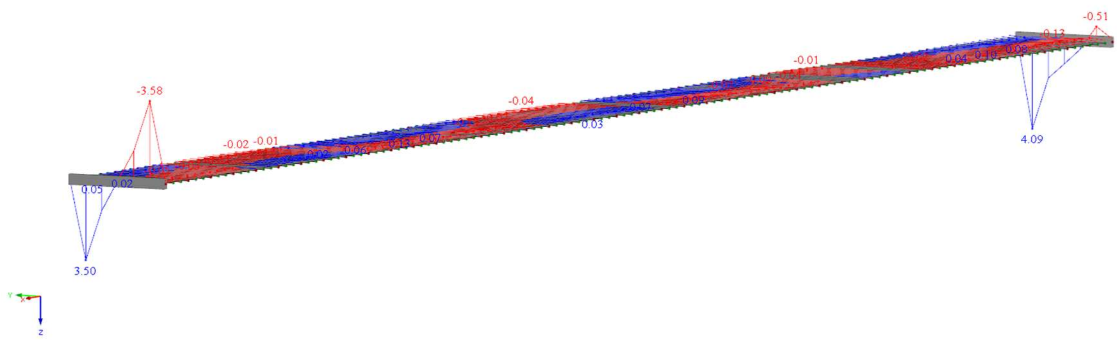
Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly M-y/M-u [kNm]
ZS2 : Zatížení sněhem



Max M-y/M-u: 1.70, Min M-y/M-u: -0.07 kNm

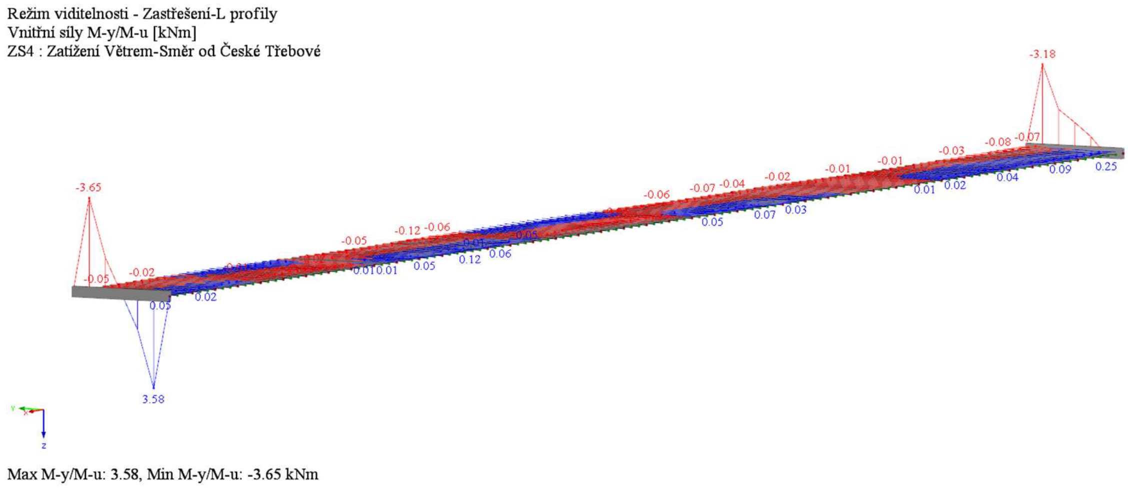
Obr. 172 Ohybový moment M_y od zatížení sněhem

Režim viditelnosti - Zastřešení-L profily
Vnitřní síly M-y/M-u [kNm]
ZS3 : Zatížení Větrem-Směr od Brna

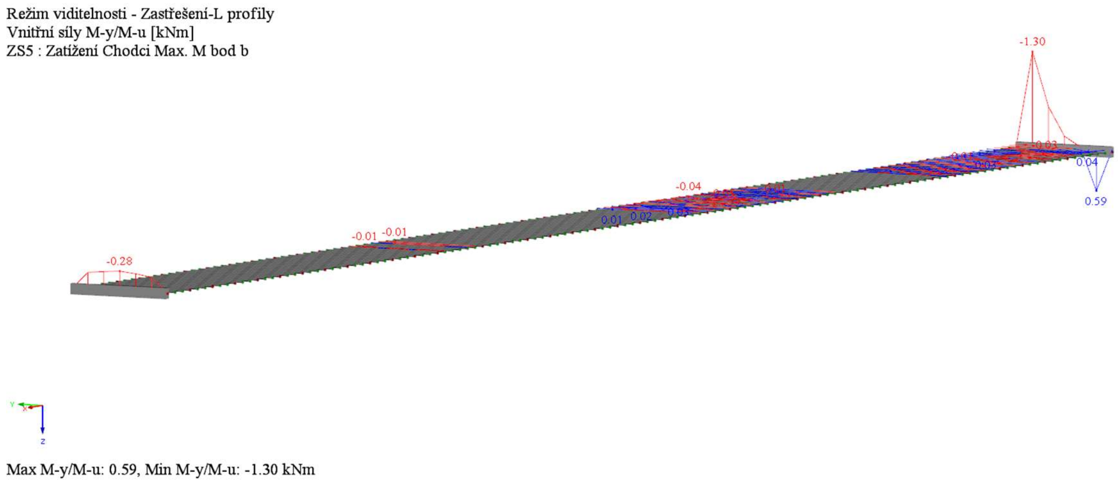


Max M-y/M-u: 4.09, Min M-y/M-u: -3.58 kNm

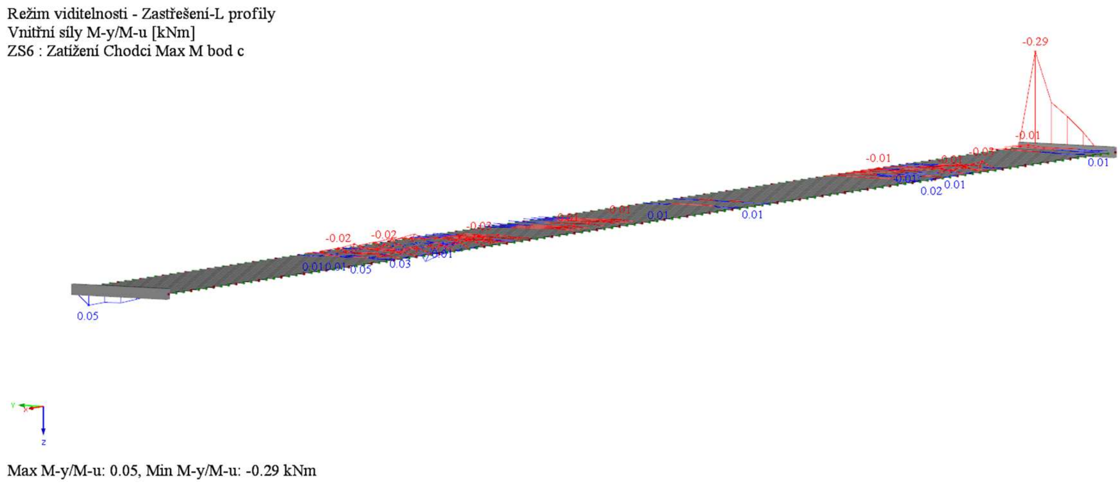
Obr. 173 Ohybový moment M_y od zatížení větrem (směr od Brna)



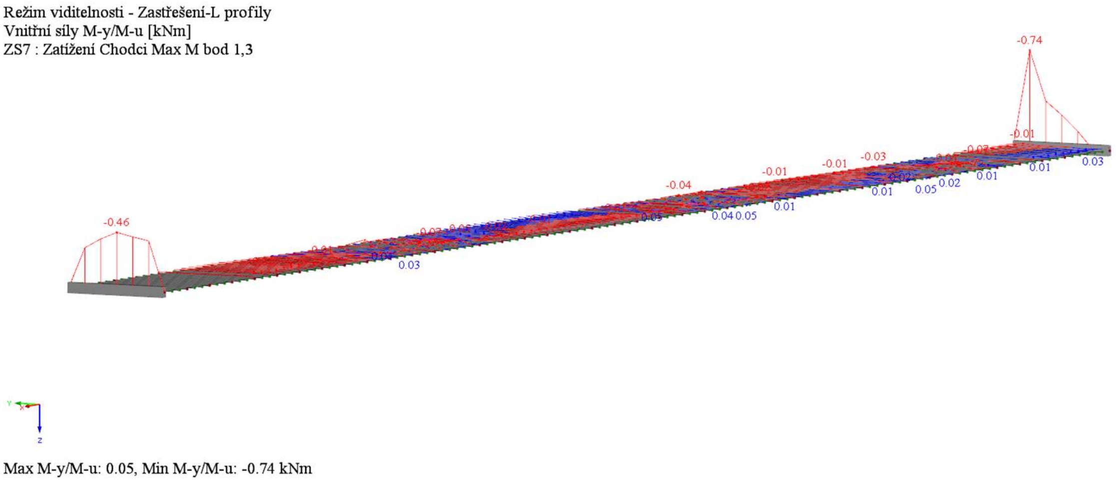
Obr. 174 Ohybový moment M_y od zatížení větrem (směr od Č. T.)



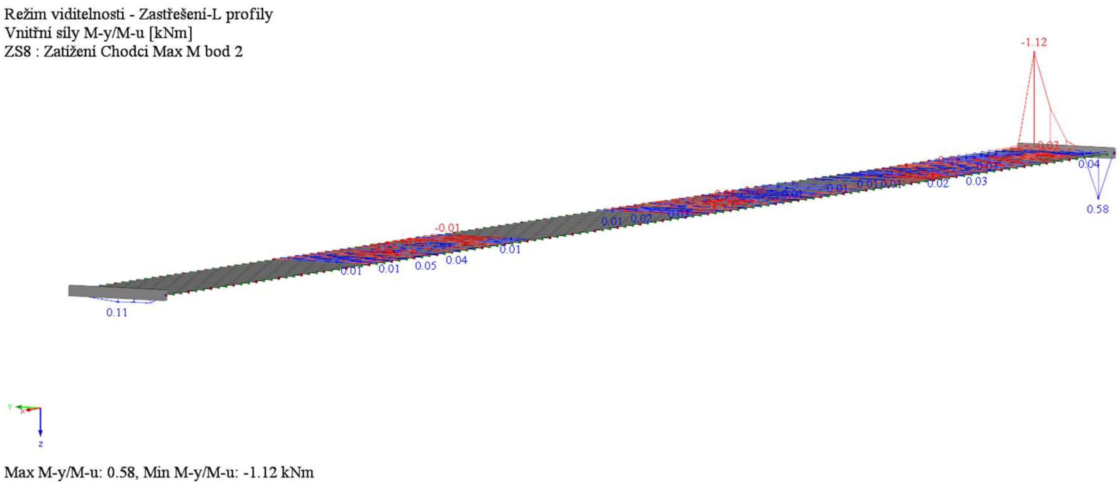
Obr. 175 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (podpora b)



Obr. 176 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (podpora c)



Obr. 177 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (bod 1, 3)

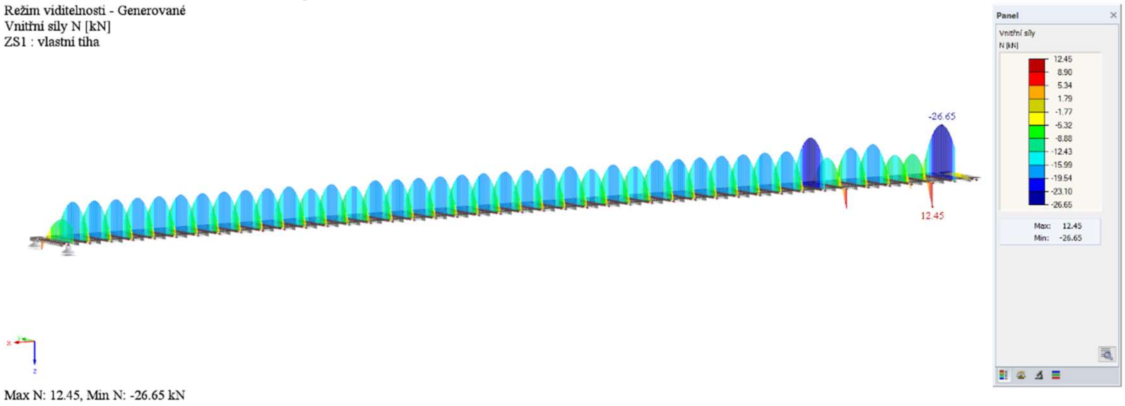


Obr. 178 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (bod 2)

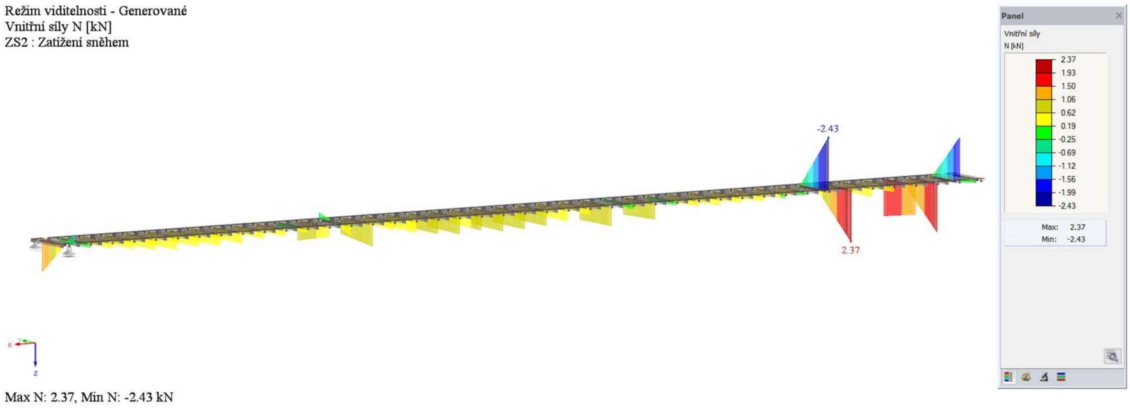
Největší ohybové momenty vznikají na koncích lávky na RHS profilech.
Zbytek úhelníku je, co se týče velikosti ohybového momentu zanedbatelný (obrázek 171, 712, 173, 174, 175, 176, 177, 178).

10.4. Mostovka

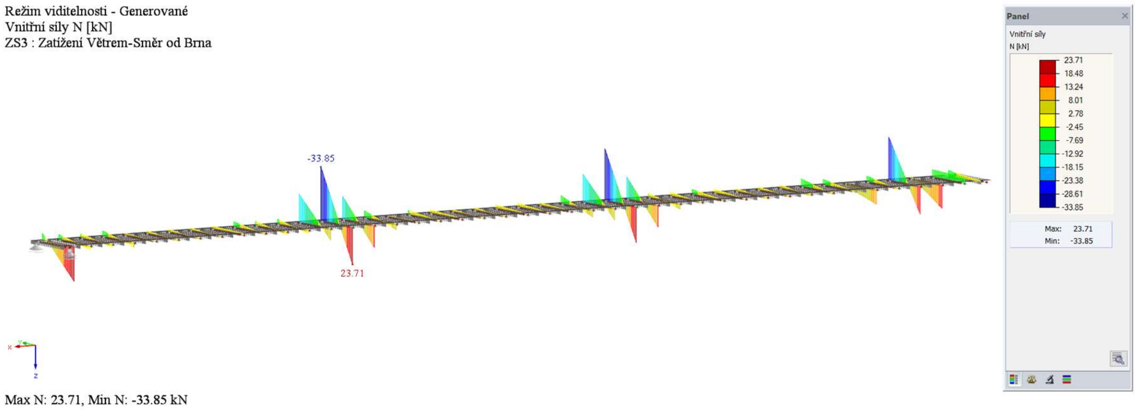
10.4.1. Normálové síly N



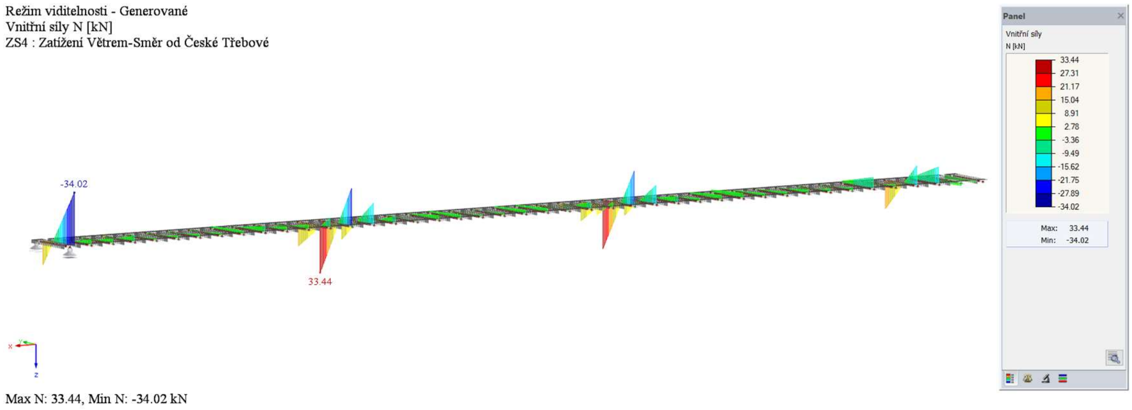
Obr. 179 Normálová síla od vlastní tíhy



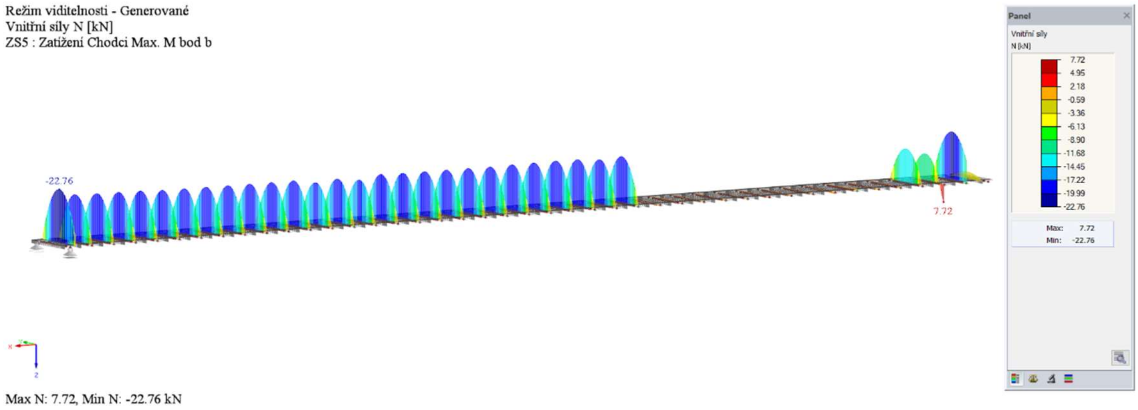
Obr. 180 Normálová síla N od zatížení sněhem



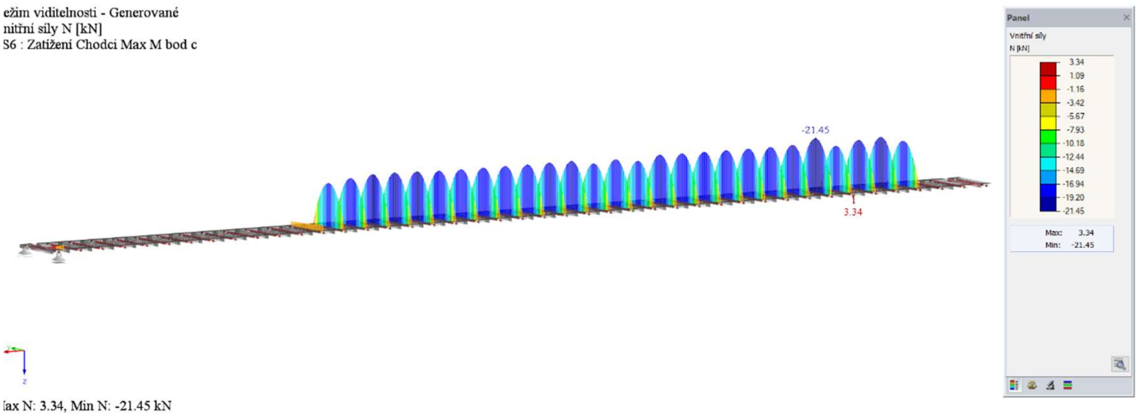
Obr. 181 Normálová síla N od zatížení větrem (směr od Brna)



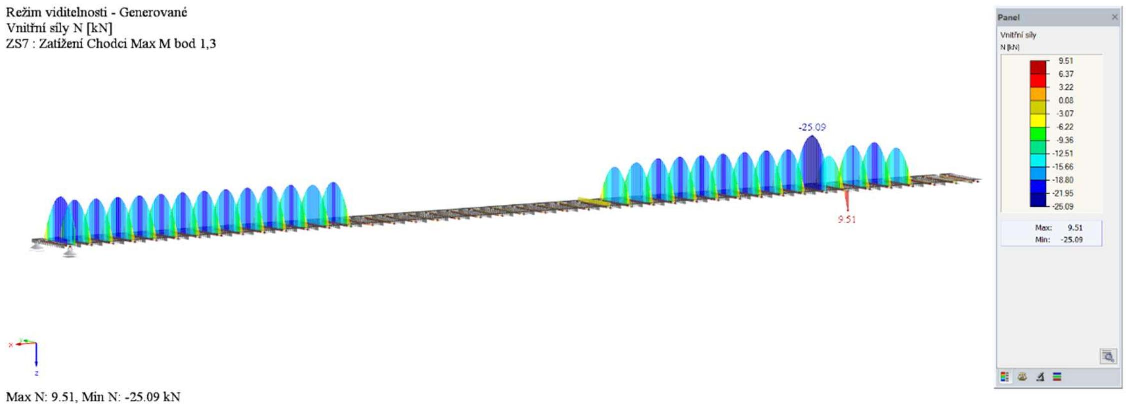
Obr. 182 Normálová síla od zatížení větrem (směr od Č. T.)



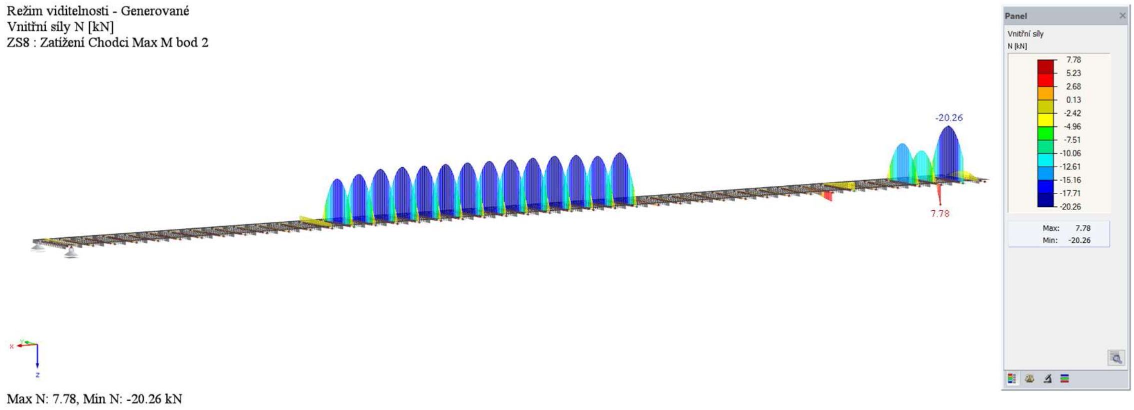
Obr. 183 Normálová síla N od zatížení chodci (podpora b)



Obr. 184 Normálová síla N od zatížení chodci (podpora c)



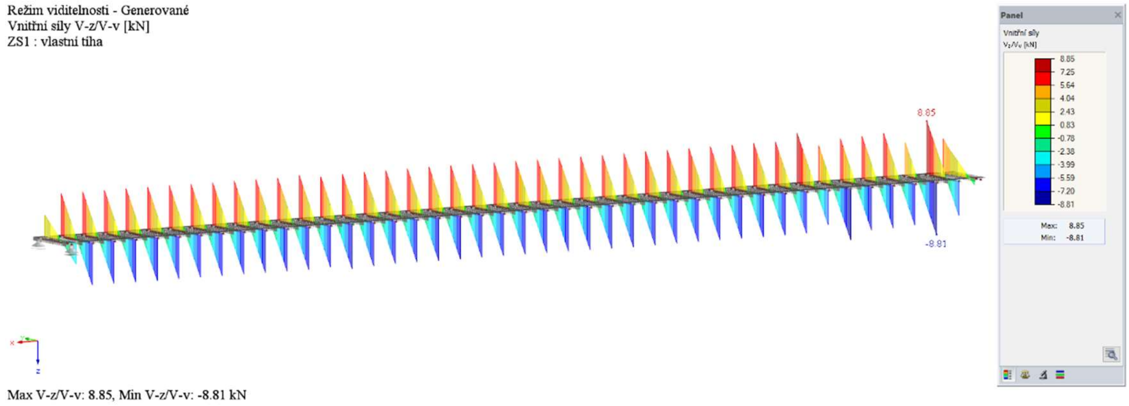
Obr. 185 Normálová síla N od zatížení chodci (bod 1, 3)



Obr. 186 Normálová síla N od zatížení chodci (bod 2)

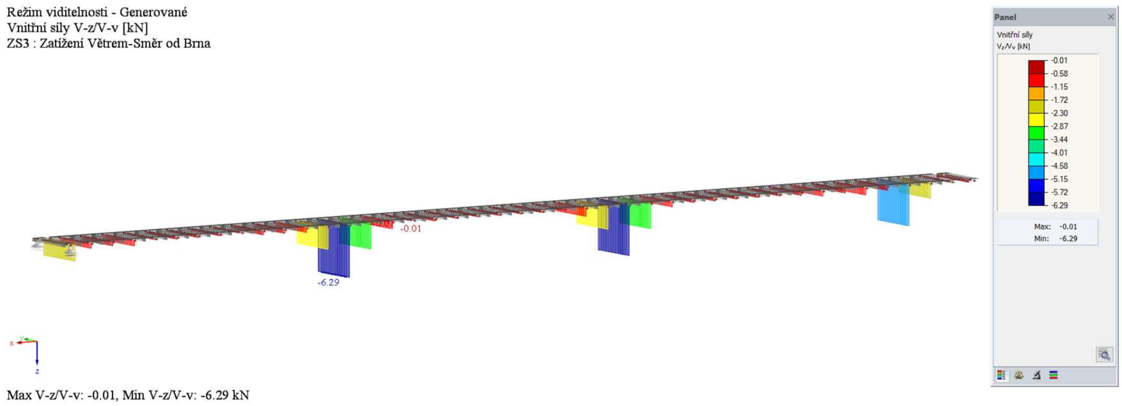
Od zatížení vlastní tíhou vznikají normálové síly ve všech prutech (obrázek 179). Maximálních hodnot dosahují u vstupů na lávku na převislém konci.
Normálové síly od zatížení sněhem mají největší hodnotu nad podporou d a na převislém konci (obrázek 180).
Zatížení větrem vyvolává největší normálové síly na mostovce, která se nachází nad podporami (obrázek 181, 182).
Normálové síly od zatížení chodci dosahují hodnot jen na té části mostovky, kam byly v rámci svého zatěžovacího stavu umístěny (obrázek 183, 184, 185, 186).

10.4.2.Posouvající síla V_z

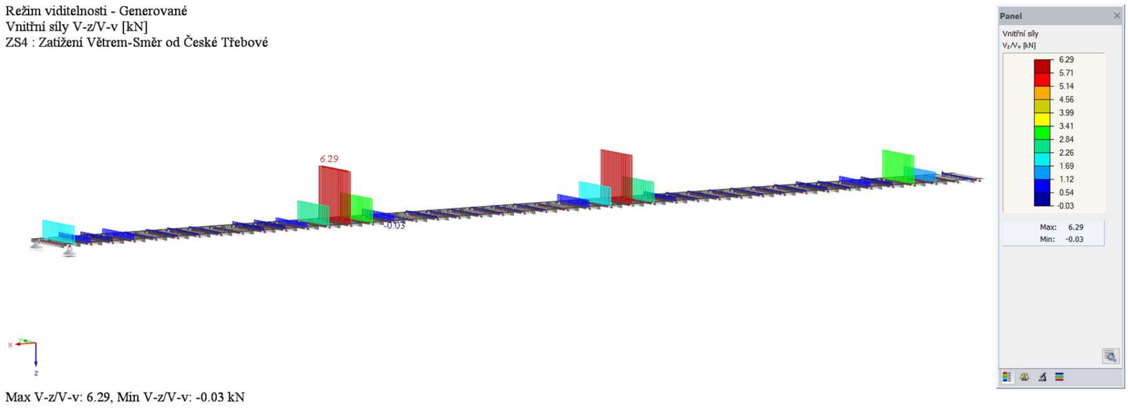


Obr. 187 Posouvající síla V_z od vlastní tíhy

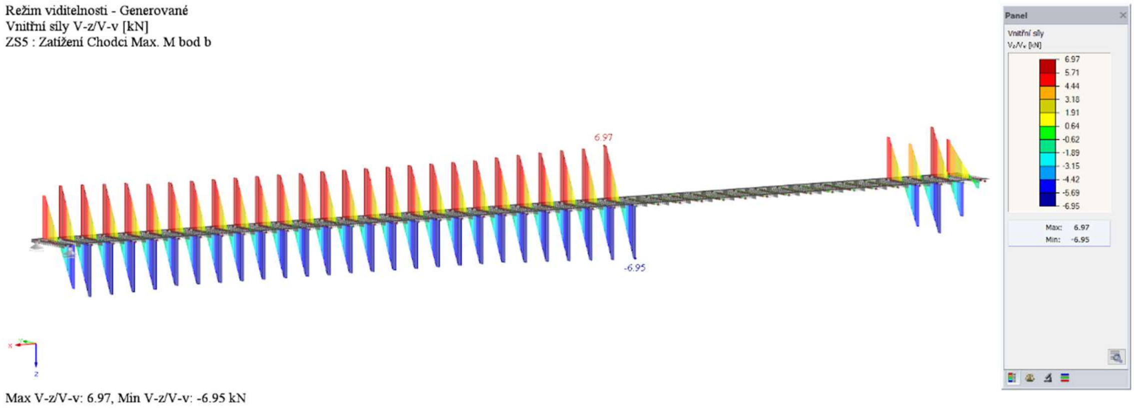
Obr. 188 Posouvající síla V_z od zatížení sněhem



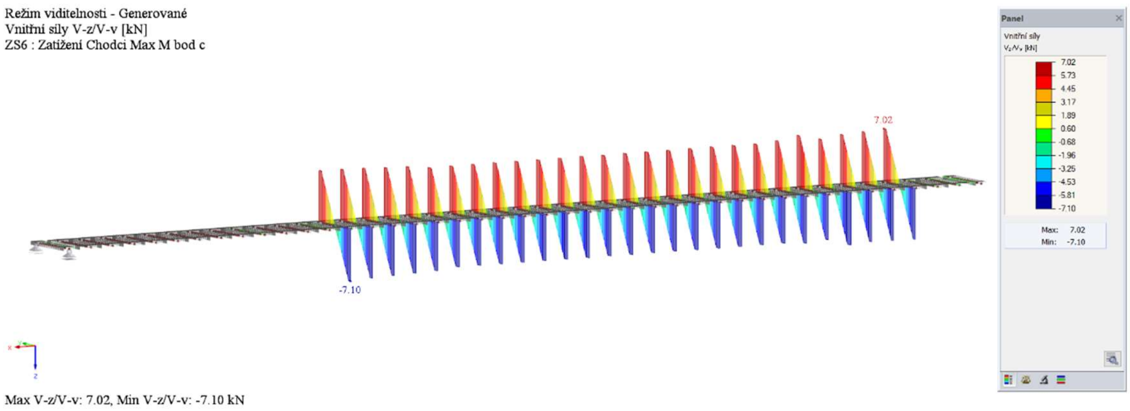
Obr. 189 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Brna)



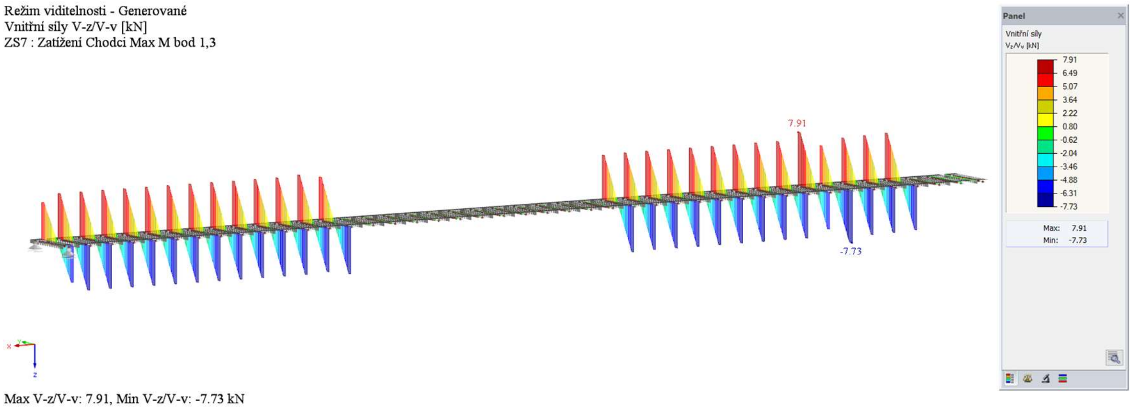
Obr. 190 Posouvající síla V_z od zatížení větrem (směr od Č. T.)



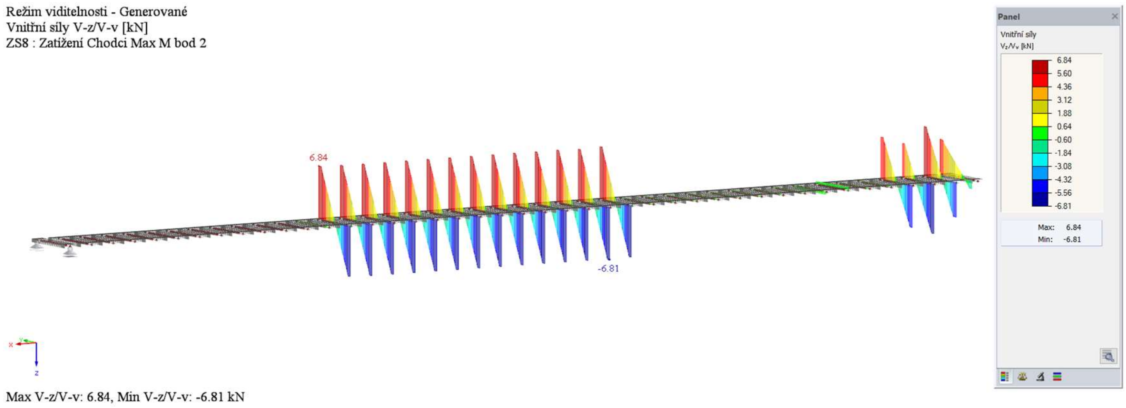
Obr. 191 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (podpora b)



Obr. 192 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (podpora c)



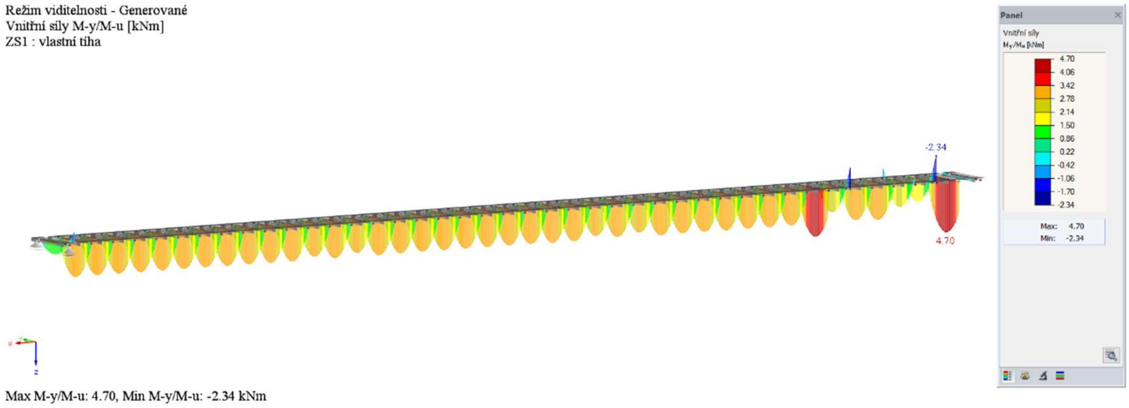
Obr. 193 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (bod 1, 3)



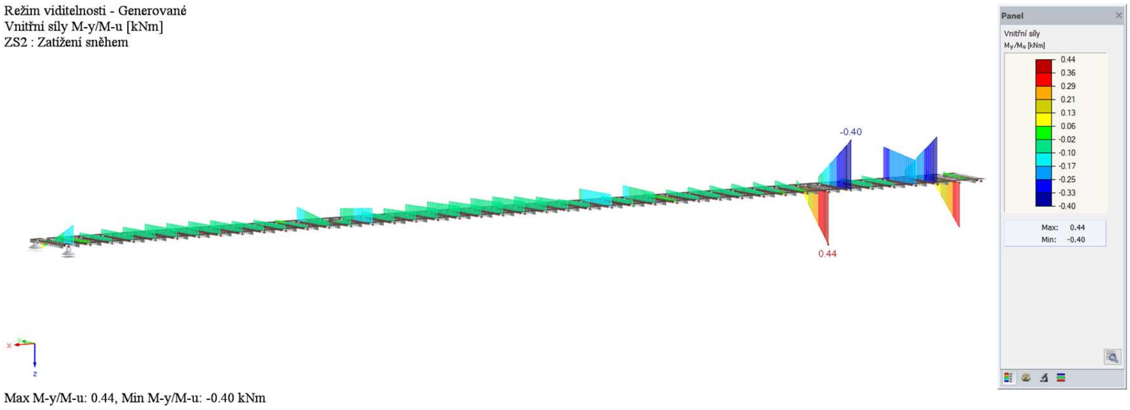
Obr. 194 Posouvající síla V_z od zatížení chodci (bod 2)

Z obrázků je viditelné, že posouvající síly od zatížení vlastní tíhou se nacházejí po celé délce lávky (obrázek 187). Zato u zatížení sněhem je nejnamáhavější část u převislého konce (obrázek 188). Od zatížení větrem je mostovka nejvíce namáhána v místech umístění podpor (obrázek 189, 190).
Zatížení chodci nejvíce namáhá mostovku v místech, kde je pro daný zatěžovací stav zatížení umístěno (obrázek 191, 192, 193, 194).

10.4.3. Ohybový moment My

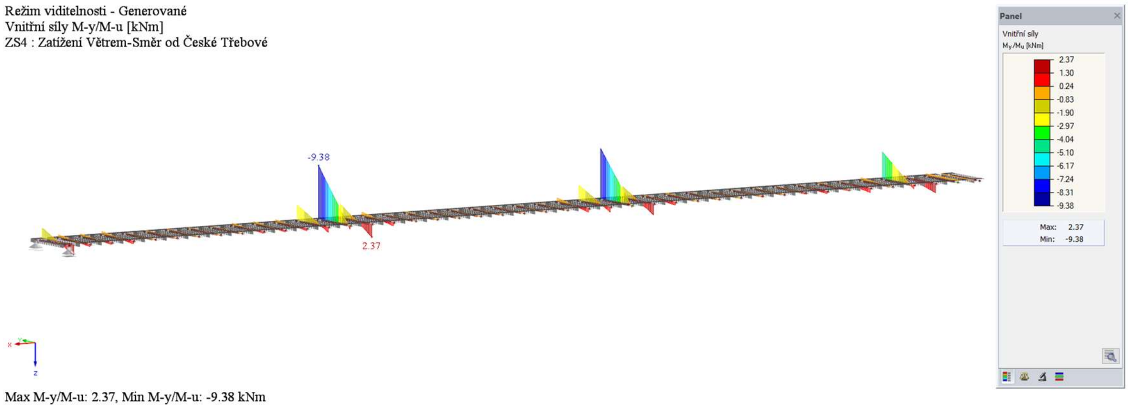


Obr. 195 Ohybový moment M_y od vlastní tíhy

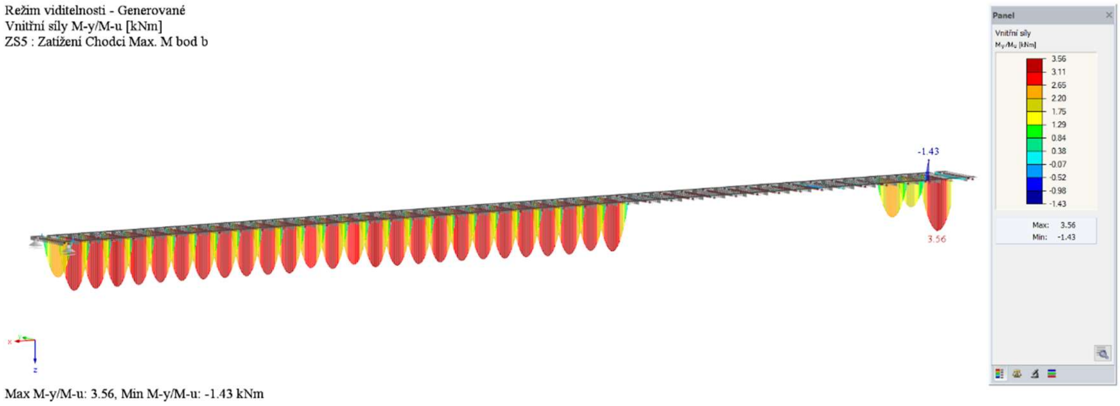


Obr. 196 Ohybový moment M_y od zatížení sněhem

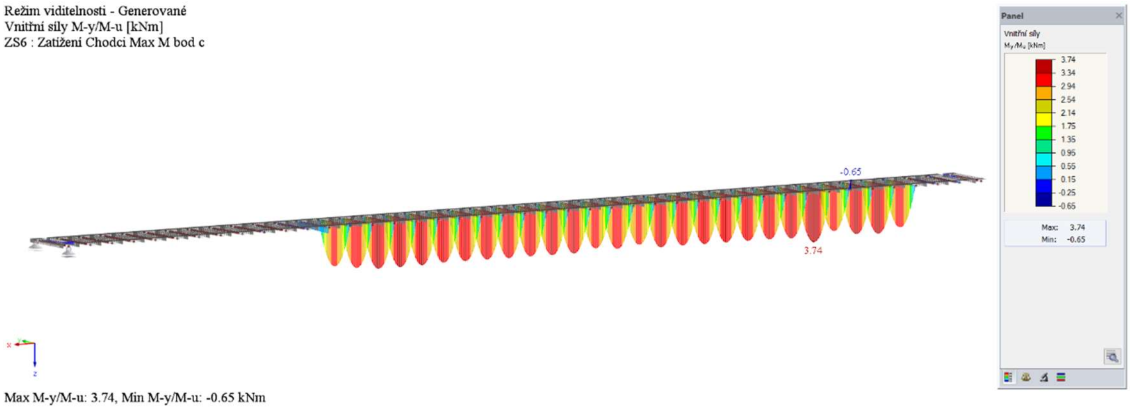
Obr. 197 Ohybový moment M_y od zatížení větrem (směr od Brna)



Obr. 198 Ohybový moment M_y od zatížení větrem (směr od Č. T.)

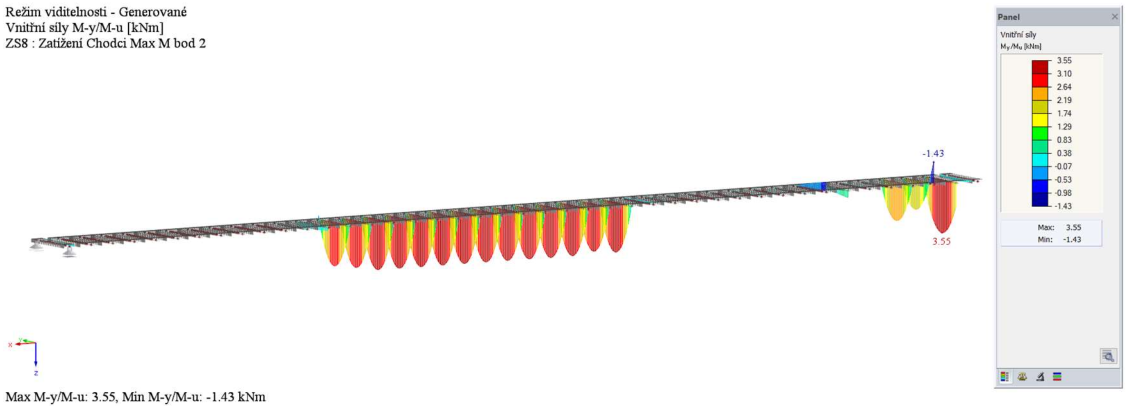


Obr. 199 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (podpora b)



Obr. 200 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (podpora c)

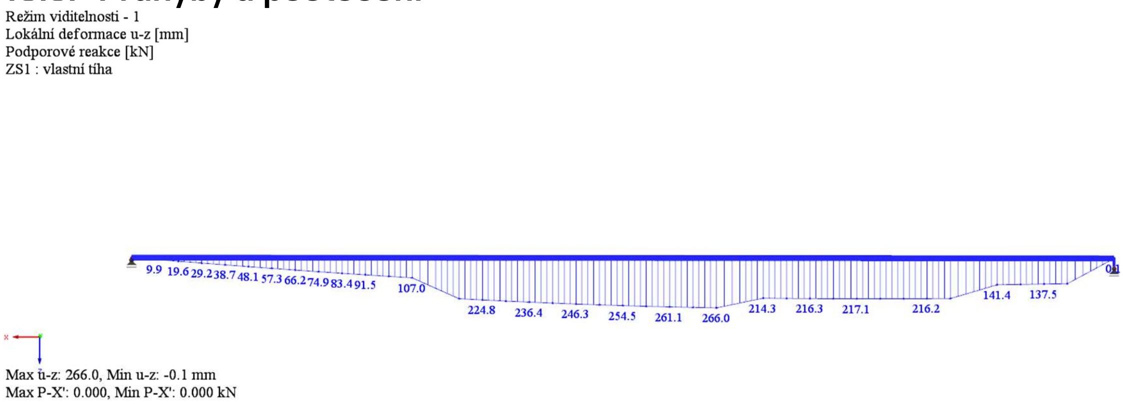
Obr. 201 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (bod 1, 3)



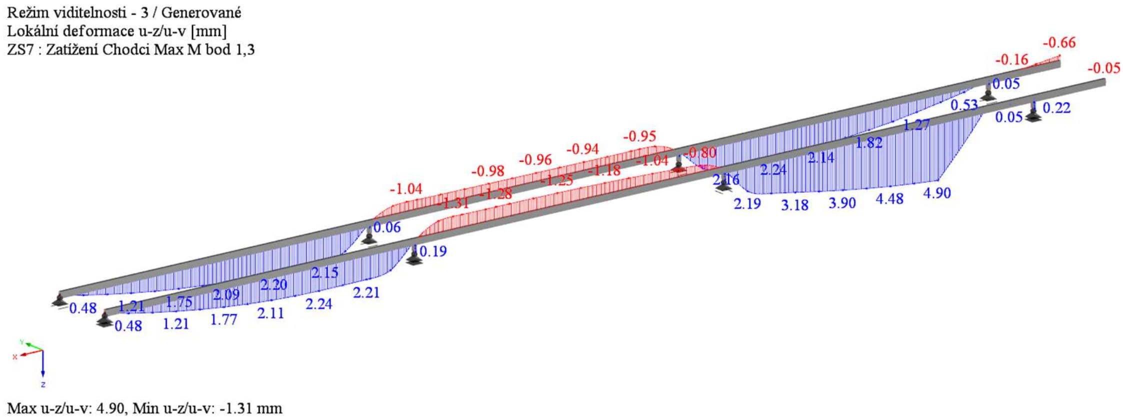
Obr. 202 Ohybový moment M_y od zatížení chodci (bod 2)

Průběh momentů je v tomto případě obdobný jako u posouvajících sil V_z.
Z obrázků je viditelné, že ohybový moment od zatížení vlastní tíhou se nachází po celé délce lávky (obrázek 195). Zato u zatížení sněhem je nejnamáhavější část u převislého konce (obrázek 196). Od zatížení větrem je mostovka nejvíce namáhána v místech umístění podpor (obrázek 197 a 198).
Zatížení chodci nejvíce namáhá mostovku v místech, kde je pro daný zatěžovací stav zatížení umístěno (obrázek 199, 200 ,201, 202).

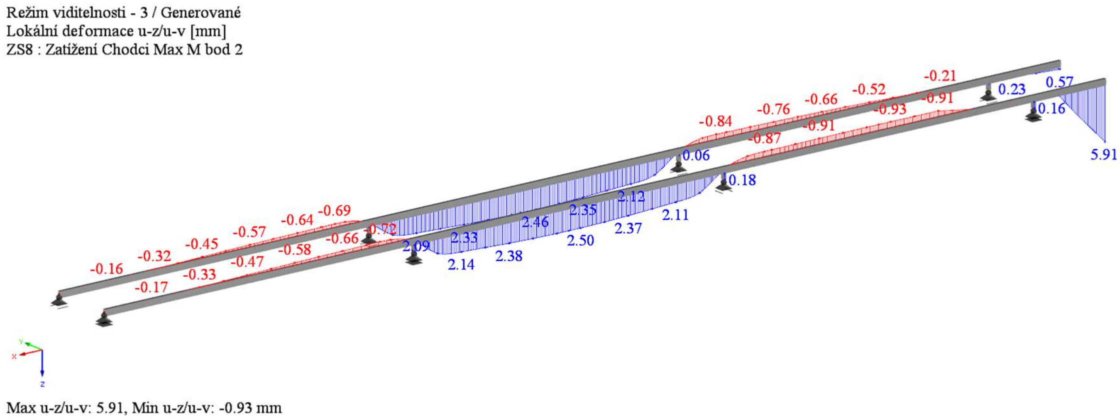
10.5. Průhyby a pootočení



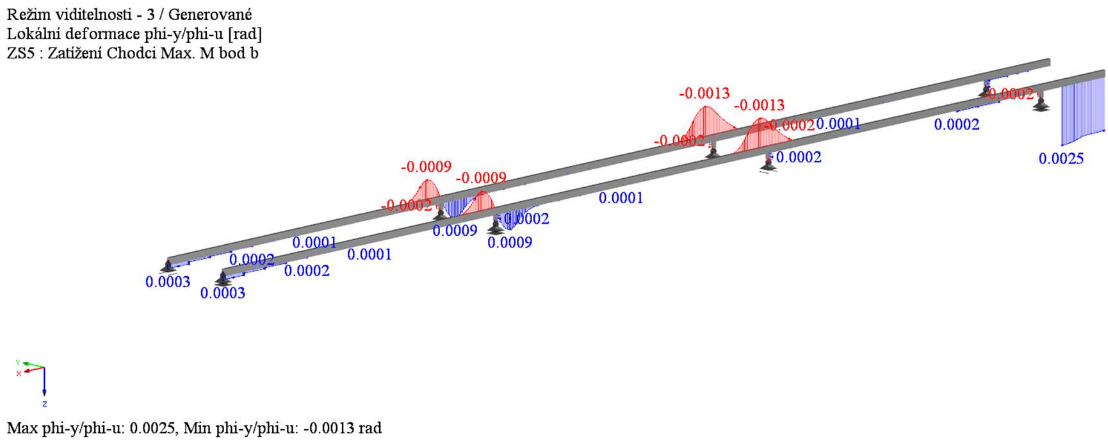
Obr. 203 Průhyb w



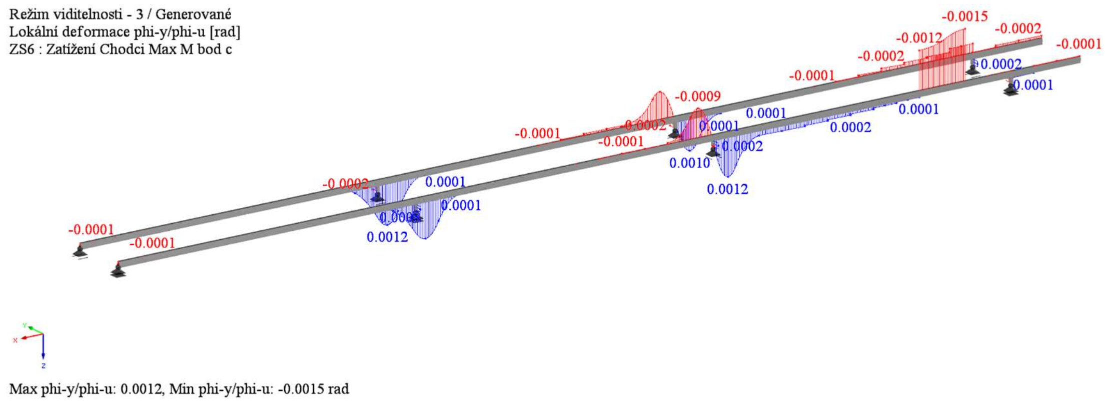
Obr. 204 Průhyb nad bodem 1



Obr. 205 Průhyb nad bodem 2



Obr. 206 Pootočení nad bodem b



Obr. 207 Pootočení nad bodem c