

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA KROVU

STATIC ANALYSIS OF THE ROOF

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE **Josef Hořínek**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **Ing. JOSEF MARTINÁSEK, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Josef Hořínek
Název	Statická analýza krovu
Vedoucí práce	Ing. Josef Martinásek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Kadlčák, J. a J. Kytýr - Statika stavebních konstrukcí II

Martinásek J. – Řešené příklady k předmětu BD003

Platné předpisy a normy (včetně změn a oprav):

- ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí.
- ČSN EN 1991-1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení.
- ČSN EN 1991-1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem.
- ČSN EN 1991-1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem.

Manuály k programu RFEM

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Student vypracuje prostorový výpočtový model krovu zvolené konstrukce. Zpracuje zatížení dle platných norem, které následně aplikuje na daný model. Vybrané výsledky ověří 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

Bakalářská práce se zabývá statickou analýzou dřevěného krovu. Tento krov je součástí sedlové střechy na rodinném domě. Zatížení na konstrukci je spočítáno ručně dle platných norem. Zatížení je rozděleno do celkem 11 zatěžovacích stavů. Výpočtový model konstrukce je vytvořen v programu RFEM. Výsledky vnitřních sil a deformací jsou zkontrolovány ručním výpočtem silovou metodou. Tyto hodnoty jsou na závěr porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

střecha, dřevěný krov, dřevěná konstrukce, statická analýza, vnitřní síly, silová metoda, krokev, kleština, deformace, RFEM

ABSTRACT

The Bachelor Thesis focuses on a static analysis of a timber roof truss. This roof trust is part of the saddle roof on the family home. The load on the structure is calculated manually according to valid standards. The load is divided into a total of 11 load cases. The calculation model of the structure is created in RFEM. Results of internal forces and deformations are checked by manual calculation using force method. These values are compared at the end.

KEYWORDS

roof, timber roof truss, timber structure, structural analysis, internal forces, force method, rafter, tie, deformation, RFEM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Josef Hořínek *Statická analýza krovu.* Brno, 2022. 120 s. 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 krovu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2022

Josef Hořínek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

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

V Brně dne 25.5. 2022

Josef Hořínek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Josefu Martináskovi, Ph.D. za jeho trpělivost, ochotu a cenné rady a připomínky při tvorbě této práce. Zároveň bych také rád poděkoval mé rodině a přátelům za podporu při mém studiu.

OBSAH

1. ÚVOD 11
2. POPIS KONSTRUKCE 12
   2.1 MATERIÁL KROVU 12
   2.2 DIMENZE PRVKŮ KROVU 13
      2.2.1 PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY 13
3. ZATÍŽENÍ 14
   3.1 ZATĚŽOVACÍ ŠÍŘKA 14
   3.2 STÁLÉ ZATÍŽENÍ 15
      3.2.1 VLASTNÍ TÍHA PRVKŮ 15
      3.2.2 SKLADBA S1 16
      3.2.3 SKLADBA S2 17
      3.2.4 SKLADBA S3 18
      3.2.5 SKLADBA S4 19
      3.2.6 STŘEŠNÍ ŽLABY 20
   3.3 PROMĚNNÉ ZATÍŽENÍ 21
      3.3.1 UŽITNÉ ZATÍŽENÍ 21
      3.3.2 ZATÍŽENÍ SNĚHEM 22
      3.3.3 ZATÍŽENÍ VĚTREM 26
4. KOMBINACE 37
5. ŘEŠENÍ V PROGRAMU RFEM 38
   5.1 STATICKÝ MODEL KONSTRUKCE 38
      5.1.1 VARIANTA 1 - JEDNA PEVNÁ PODPORA 38
      5.1.2 VARIANTA 2 - DVĚ PEVNÉ PODPORY 39
   5.2 VÝSLEDKY VARIANTY 1 39
      5.2.1 ZATÍŽENÍ VLASTNÍ TÍHOU 39
      5.2.2 KOMBINACE ZATÍŽENÍ 42
   5.3 VÝSLEDKY VARIANTY 2 44
      5.3.1 ZATÍŽENÍ VLASTNÍ TÍHOU 44
      5.3.2 KOMBINACE ZATÍŽENÍ 47
6. RUČNÍ VÝPOČET 50
   6.1 SILOVÁ METODA 50
      6.1.1 ZÁKLADNÍ SOUSTAVA 50
      6.1.2 ŘEŠENÍ 52

6.2 METODA JEDNOTKOVÝCH SIL 85
6.2.1 VÝPOČET SVISLÉHO POSUNU V BODĚ „g“ 85
6.2.2 VÝPOČET VODOROVNÉHO POSUNU V BODĚ „b´“ 98
7. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ 113
7.1 REAKCE PODPOR OD ZATÍŽENÍ 113
7.2 VNITŘNÍ SÍLY NA KONSTRUKCI 113
7.3 VYBRANÉ POSUNY KONSTRUKCE 114
8. ZÁVĚR 115
9. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 117
10. SEZNAM OBRÁZKŮ 118
11. SEZNAM TABULEK 120

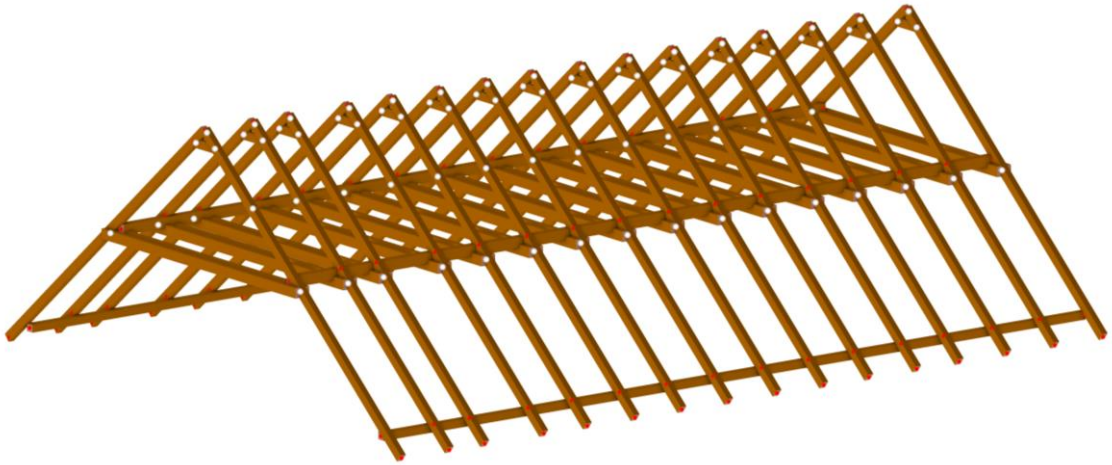
1. ÚVOD

Úkolem mé bakalářské práce je zpracování statické analýzy dřevěného krovu nad rodinným domem s obdélníkovým půdorysem. Jedná se o sedlový vaznicový krov. Bude proveden výpočtový model v programu RFEM 6 pro zjištění vnitřních sil v konstrukci a následně budou výsledky porovnány s ručním výpočtem.

Sedlový krov vymezuje podkrovní prostor rodinného domu, ale také půdní úložný prostor pro skladování. Půdní prostor je pochozí.

Zatížení působící na konstrukci krovu bude spočítáno ručně a vypočtené hodnoty budou zadány do programu RFEM 6, ve kterém provedu namodelování vazby dřevěné konstrukce krovu. Jako zatížení bude uvažována vlastní tíha konstrukce, užitné zatížení na půdě a střeše, zatížení sněhem a větrem. V programu RFEM budou vytvořeny dva statické modely s odlišným podepřením konstrukce.

Ručním výpočtem budou spočítány vnitřní síly na konstrukci od zatížení vlastní tíhou pomocí silové metody a vybraný posun konstrukce pomocí metody jednotkových sil. Ruční výpočet bude proveden na konstrukci podepřené čtyřmi kloubovými podporami, z nichž pouze jedna bude pevná. Výsledky vypočtené ručním výpočtem budou porovnány s hodnotami z výpočetního programu RFEM 6.

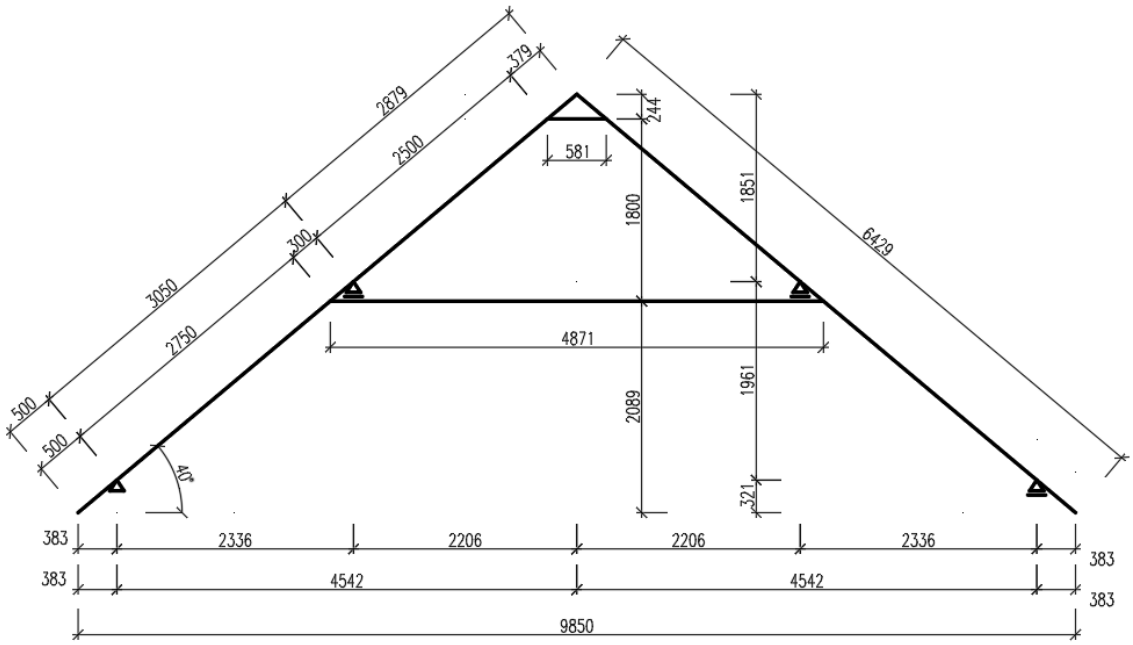


Obr. 1.1 3D model řešeného krovu

2. POPIS KONSTRUKCE

Pro účely mé bakalářské práce byla použita již stojící konstrukce dřevěného krovu, která byla zhotovena pro rodinný dům s obdélníkovým půdorysem. Tento rodinný dům byl postaven v 90. letech 20. století.

Sedlový krov je součástí střešní konstrukce, která ohraničuje stavbu shora. Střešní konstrukce na vybraném domě vymezuje obytné podkroví. Součástí domu je také pochozí půda, která je umístěna nad podkrovím. Do prostoru půdy je umožněn přístup pouze z venku pomocí dvířek na štítové stěně. Základní rozměrové řešení konstrukce je uvedeno na schématu konstrukce (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Statické schéma konstrukce s rozměry [mm]

2.1 MATERIÁL KROVU

Jelikož nebylo možné zjistit, jaká pevnostní třída dřeva byla použita pro stavbu tohoto dřevěného krovu, použil jsem pro výpočet dřevo z jehličnatých dřevin smrkové pevnostní třídy C24. Jedná se o běžné konstrukční dřevo.

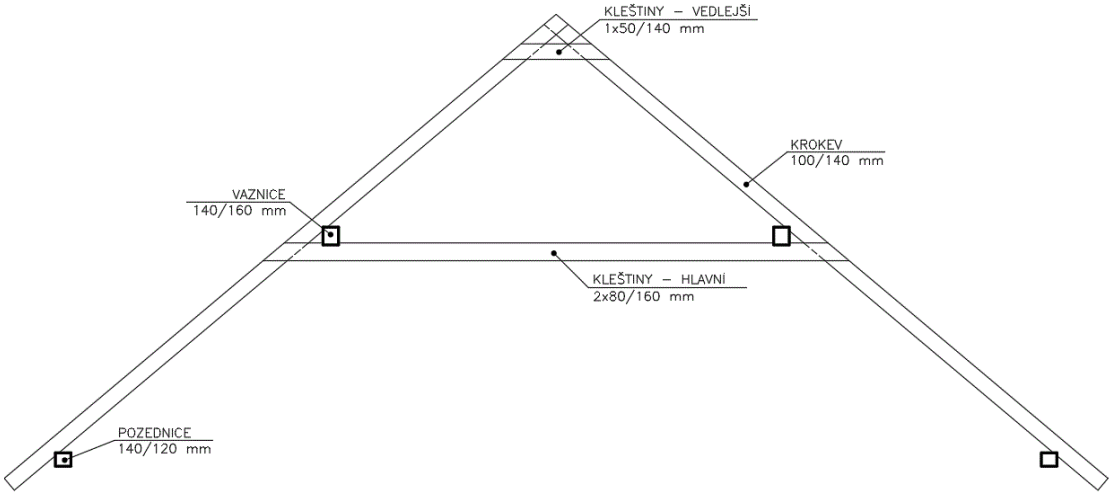
Vybrané materiálové charakteristiky dřeva použité ve výpočtech:

Tab. 2.1 Vybrané materiálové charakteristiky dřeva

Popis	Označení	Hodnota
Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	E [GPa]	11
Průměrná hustota dřeva	ρ [kg/m^3]	420

2.2 DIMENZE PRVKŮ KROVU

- Pozednice 140/120 mm
- Vaznice 140/160 mm
- Krokve 100/140 mm
- Kleštiny hlavní 2 x 80/160 mm
- Kleštiny vedlejší 1 x 50/140 mm



Obr. 2.2 Rozměry prvků krovu

2.2.1 PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY

KROKEV

$A = 0{,}100 \cdot 0{,}140 = 0{,}014\ \mathrm{m}^2$

$I_1 = \frac{1}{12} 0{,}100 \cdot 0{,}140^3 = 2{,}28 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}^4$

$EI_1 = 11000 \cdot 2{,}28 \cdot 10^{-5} = 0{,}251533\ \mathrm{MNm}^2$

HLAVNÍ KLEŠTINY

$A = 2 \cdot 0{,}080 \cdot 0{,}160 = 0{,}0256\ \mathrm{m}^2$

$I_2 = \frac{1}{12} 2 \cdot 0{,}080 \cdot 0{,}160^3 = 5{,}46 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}^4$

$EI_2 = 11000 \cdot 5{,}46 \cdot 10^{-5} = 0{,}600747\ \mathrm{MNm}^2$

VEDLEJŠÍ KLEŠTINY

$A = 0{,}050 \cdot 0{,}140 = 0{,}007\ \mathrm{m}^2$

$I_3 = \frac{1}{12} 0{,}050 \cdot 0{,}140^3 = 1{,}14 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}^4$

$EI_3 = 11000 \cdot 1{,}14 \cdot 10^{-5} = 0{,}125767\ \mathrm{MNm}^2$

3. ZATÍŽENÍ

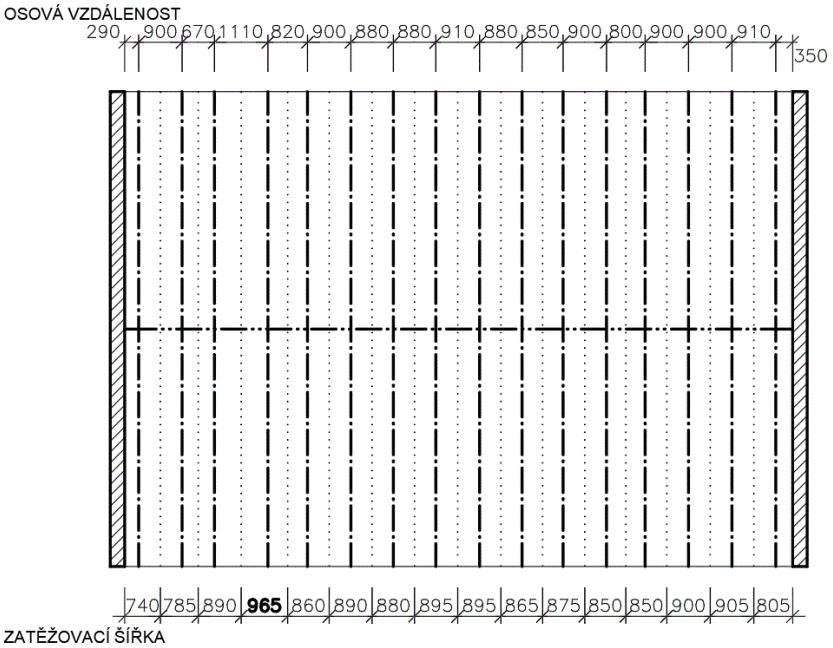
Pro vypracování statické analýzy krovu je důležité vypočítat všechna zatížení, která působí nebo mohou působit na použitou konstrukci. Každá zatížení jsou rozdělena do jednotlivých zatěžovacích stavů, se kterými se následně provedou početní kombinace pro výpočet maximálních možných vnitřních sil na konstrukci krovu. Výsledky kombinací zatěžovacích stavů určí maximální průběhy vnitřních sil, kterým by mohla být konstrukce krovu vystavena.

Veškeré skladby střešních plášťů a podlahy v místě půdního prostoru byly zjištěny z dochované projektové dokumentace rodinného domu. U některých materiálů nebylo možné dohledat objemovou tíhu materiálu danou výrobcem, byla proto použita objemová tíha materiálu podobného, nebo tabulková hodnota zatížení materiálu dle ČSN EN 1991-1-1[1].

Zatížení na dřevěný krov je počítáno ručně, včetně vlastní tíhy konstrukce. Zatížení vlastní tíhou bude použito pouze pro kontrolu ručním výpočtem. Zbylé výsledky zatížení budou zadány do početního softwaru RFEM 6, vlastní tíhu konstrukce si software počítá sám po namodelování jednotlivých prvků konstrukce.

3.1 ZATĚŽOVACÍ ŠÍŘKA

Na stávající konstrukci jsem provedl zaměření osové vzdálenosti krokví pro určení zatěžovací šířky pro zatížení. Po pasportizaci stávajícího stavu dřevěného krovu bylo zjištěno, že osová vzdálenost jednotlivých krokví není stejná. Ve výsledcích pasportu bylo provedeno rozdělení zatěžovacích šířek pro jednotlivé krokve a největší zatěžovací šířka je použita do výpočtů statické analýzy krovu, jelikož tato šířka vyvolá největší zatížení, a tedy i největší hodnoty vnitřních sil na konstrukci. Osovou vzdálenost krokví a zatěžovací šířky viz přiložený obrázek (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Zatěžovací šířky

3.2 STÁLÉ ZATÍŽENÍ

Stálé zatížení je rozděleno do dvou samostatných zatěžovacích stavů. Jedná se o ZS1 – stálé zatížení – vlastní tíha konstrukce; a ZS2 – ostatní stálé zatížení, do kterého se řadí skladby střešního pláště, skladba podlahové konstrukce v půdním prostoru a střešní okapové žlaby.

3.2.1 VLASTNÍ TÍHA PRVKŮ

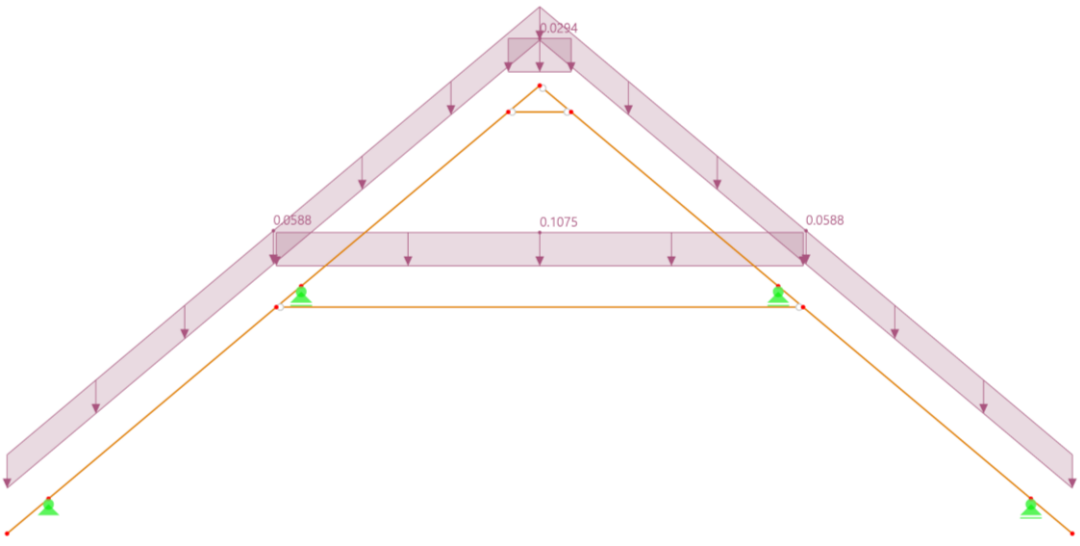
Vlastní tíha jednotlivých prvků konstrukce je přepočítána na zatížení jednotlivého prvku na 1 m jeho délky. Objemová tíha materiálu je pro konstrukční dřevo pevnostní třídy C24 rovno 4,2 kN/m^3.

Výpočet tíhy prvků krovu:

Tab. 3.1 Výpočet zatížení od prvků krovu

	Tl. [m]	Obj. tíha [kN/m^3]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Pozednice 140/120	0,120	4,20	0,140	**0,0706**
Vaznice 140/160	0,160	4,20	0,140	**0,0941**
Krokev 100/140	0,140	4,20	0,100	**0,0588**
Kleštiny hlavní 2x80/160	0,160	4,20	2x0,080	**0,1075**
Kleštiny vedlejší 50/140	0,140	4,20	0,050	**0,0294**

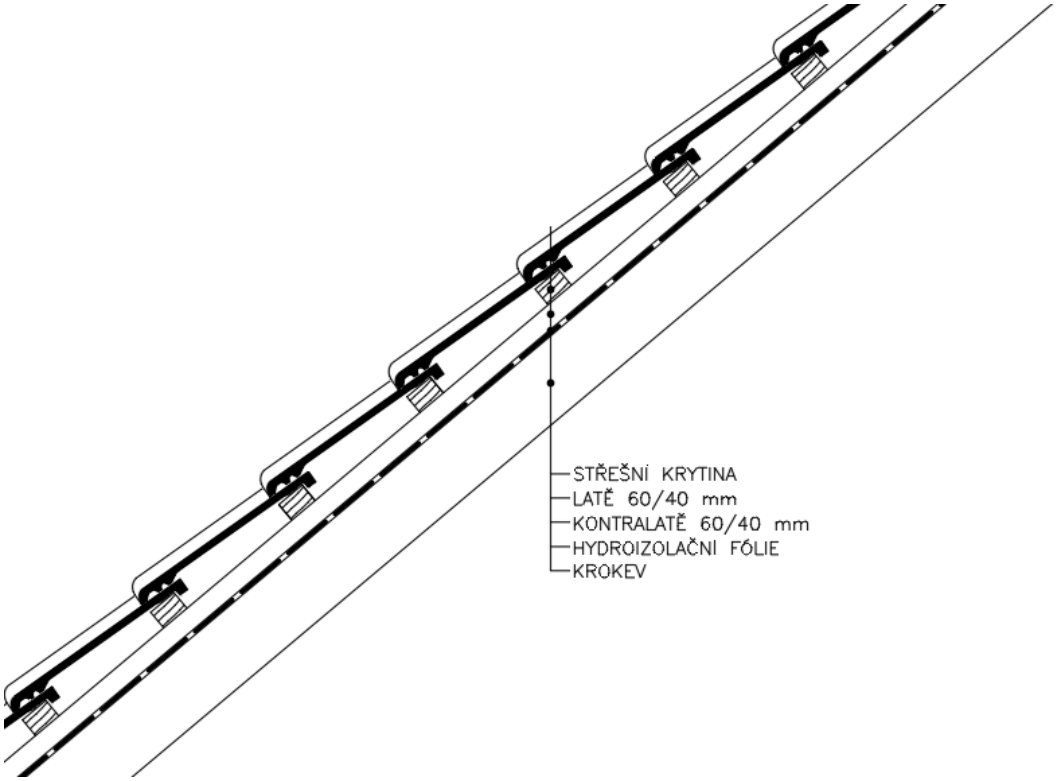
<u>Zatížení vlastní tíhou - schéma</u>



Obr. 3.2 Stálá zatížení - vlastní tíha [kN/m]

3.2.2 SKLADBA S1

Skladba S1 je skladba střešního pláště v místě půdního prostoru. Na obr. 3.3 je znázorněn schematický řez touto skladbou. Výpočet zatížení od skladby S1 uveden v tab. 3.2.



Obr. 3.3 Skladba S1 – půdní prostor

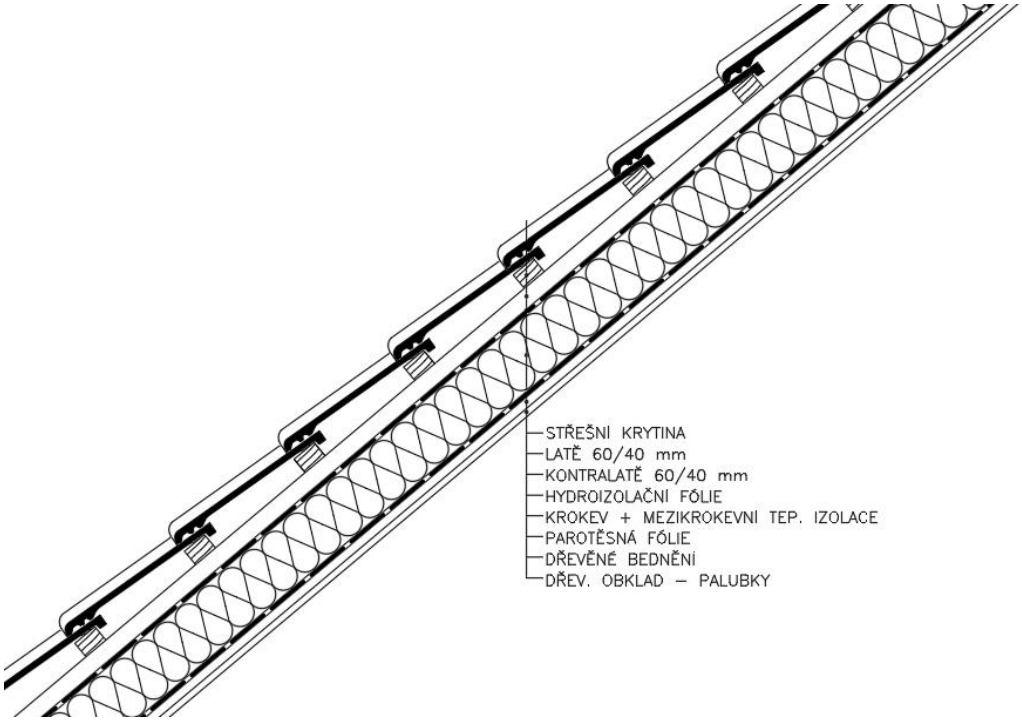
Výpočet zatížení střešní skladby S1:

Tab. 3.2 Výpočet zatížení od skladby S1

	Tl. [m]	Obj. tíha [kN/m3]	Ploš. tíha [kN/m2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Střešní krytina	-	-	0,424	0,965	0,4092
Latě 60/40	0,040	-	0,040	0,965	0,0386
Kontralatě 60/40	0,040	4,20	0,168	0,060	0,0101
Hydroizolační fólie	0,0005	2,80	0,0014	0,965	0,0014
				Celkem:	**0,4593 kN/m**

3.2.3 SKLADBA S2

Skladba S2 je skladba střešního pláště v místě s podkrovním prostorem s podhledem provedeným s obkladem z dřevěných palubek. Na obr. 3.4 je znázorněn schematický řez touto skladbou. Výpočet zatížení skladby S2 je uveden v tab. 3.3.



Obr. 3.4 Skladba S2 – prostor podkroví

Výpočet zatížení střešní skladby S2:

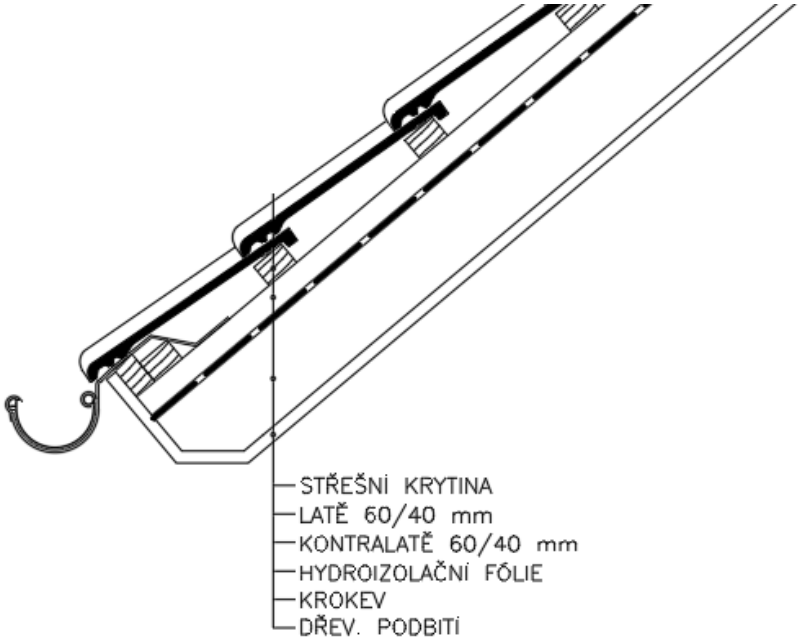
Tab. 3.3 Vypočet zatížení od skladby S2

	Tl. [m]	Obj. tíha [kN/m3]	Ploš. tíha [kN/m2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Střešní krytina	-	-	0,424	0,965	0,4092
Latě 60/40	0,040	-	0,040	0,965	0,0386
Kontralatě 60/40	0,040	4,20	0,168	0,060	0,0101
Hydroizolační fólie	0,0005	2,80	0,0014	0,965	0,0014
Tep. izolace mezi krok.	0,140	0,31	0,0434	0,865*	0,0375
Parotěsná fólie	0,0002	5,00	0,0011	0,965	0,0011
Dřevěné bednění	0,020	4,40	0,088	0,965	0,0849
Dřev. obklad - palubky	0,014	4,40	0,0616	0,965	0,0594
				Celkem:	**0,6422 kN/m**

*Při výpočtu zatěžovací šířky tepelné izolace mezi krokvemi je proveden odečet šířky krokve : 965 - 100 = 865 mm.

3.2.4 SKLADBA S3

Skladba S3 je skladba střešního pláště v okapní části střešní konstrukce. Na obr. 3.5 je znázorněn schematický řez touto skladbou. Výpočet zatížení skladby S3 je uveden v tab. 3.4.



Obr. 3.5 Skladba S3 – okapní část

Výpočet zatížení střešní skladby S3:

Tab. 3.4 Výpočet zatížení od skladby S3

	Tl. [m]	Obj. tíha [kN/m3]	Ploš. tíha [kN/m2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Střešní krytina	-	-	0,424	0,965	0,4092
Latě 60/40	0,040	-	0,040	0,965	0,0386
Kontralatě 60/40	0,040	4,20	0,168	0,060	0,0101
Hydroizolační fólie	0,0005	2,80	0,0014	0,965	0,0014
Dřevěné podbití	0,020	4,40	0,088	0,965	0,0849
				Celkem:	**0,5442 kN/m**

3.2.5 SKLADBA S4

Skladba S4 je skladba podlahy v půdním prostoru a podkrovního podhledu. Jedná se o podlahu s nášlapnou vrstvou z cementotřískových desek. Podhledovou část v podkroví tvoří obklad z dřevěných palubek. Na obr. 3.6 je znázorněn schematický řez touto skladbou. Výpočet zatížení skladby S3 je uveden v tab. 3.5.



Obr. 3.6 Skladba S4 – podlaha na půdě

Výpočet zatížení skladby S4:

Tab. 3.5 Výpočet zatížení od skladby S4

	Tl. [m]	Obj. tíha [kN/m3]	Ploš. tíha [kN/m2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Cementotřískové desky	0,018	13,50	0,243	0,965	0,2345
Asfaltová lepenka	0,0035	10,85	0,038	0,965	0,0366
Dřevěný záklop	0,025	4,40	0,110	0,965	0,1062
Tep. izolace mezi kleš.	0,160	0,31	0,0496	0,805*	0,0399
Parotěsná fólie	0,0002	5,00	0,0011	0,965	0,0011
Dřevěné bednění	0,020	4,40	0,088	0,965	0,0849
Dřev. obklad - palubky	0,014	4,40	0,0616	0,965	0,0594
				Celkem:	**0,5626 kN/m**

*Při výpočtu zatěžovací šířky tepelné izolace mezi kleštinami v podlaze (ve stropní části podkroví) je proveden odečet šířky kleštin: 965 – 2x80 = 805 mm.

3.2.6 STŘEŠNÍ ŽLABY

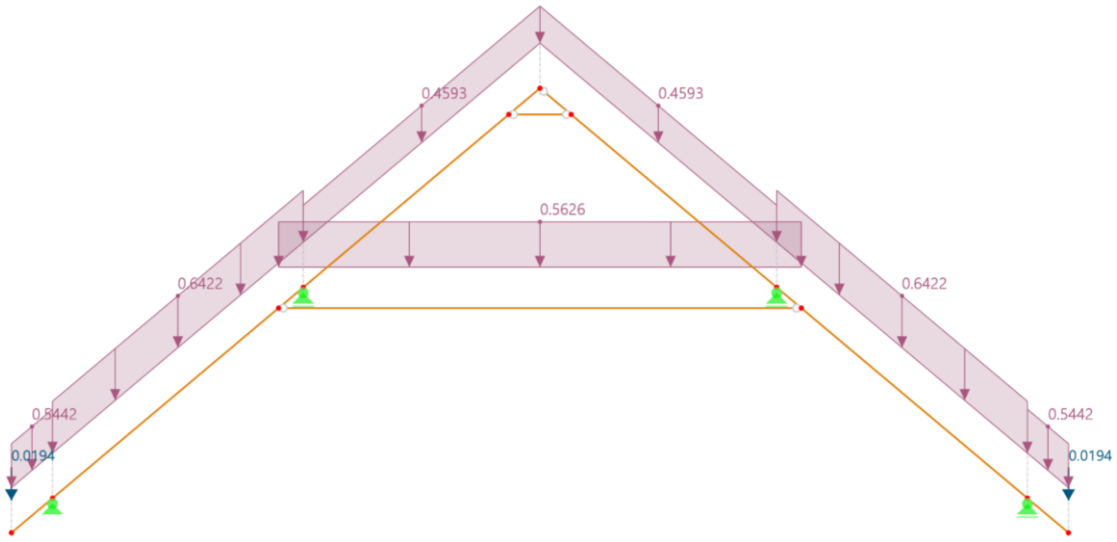
Střešní žlaby na konstrukci působí jako bodové zatížení v okapové části krovu. Zatížení střešními žlaby je součet zatížení od žlabových háků připevněných na krokve a střešních žlabů, které jsou háky podpírány. Na každou krokev připadá jeden žlabový hák držící střešní žlab. Výpočet tohoto zatížení je uveden v tab. 3.6.

Výpočet zatížení střešními žlaby:

Tab. 3.6 Výpočet zatížení od střešních žlabů

	Kusů [ks]	Zatížení [kN/m]	Tíha [kN/ks]	ZŠ [m]	Zatížení [kN]
Žlabový hák	1	-	0,003	-	0,0030
Střešní žlab	-	0,017	-	0,965	0,0164
				Celkem:	**0,0194 kN**

Ostatní stálá zatížení – schéma



Obr. 3.7 Ostatní stálá zatížení [kN/m; kN]

3.3 PROMĚNNÉ ZATÍŽENÍ

Mezi proměnná zatížení se řadí užitné zatížení podlah a střešních konstrukcí, dále zatížení sněhem a podélným a příčným větrem.

3.3.1 UŽITNÉ ZATÍŽENÍ

Užitným zatížením rozumíme zatížení vyvolané vlastním užíváním stavby – konstrukce. Toto zatížení může být vyvoláno v mém případě například uskladněnými předměty a pohybem osob v půdním prostoru a nebo pohybem osob po střešní krytině z důvodu údržby a oprav. Výpočet užitného zatížení je uveden v tab. 3.7.

Hodnota pro užitné zatížení podlahy na pochozí půdě, na které dochází k uskladnění předmětů byla navržena 1,50 kN/m^2.

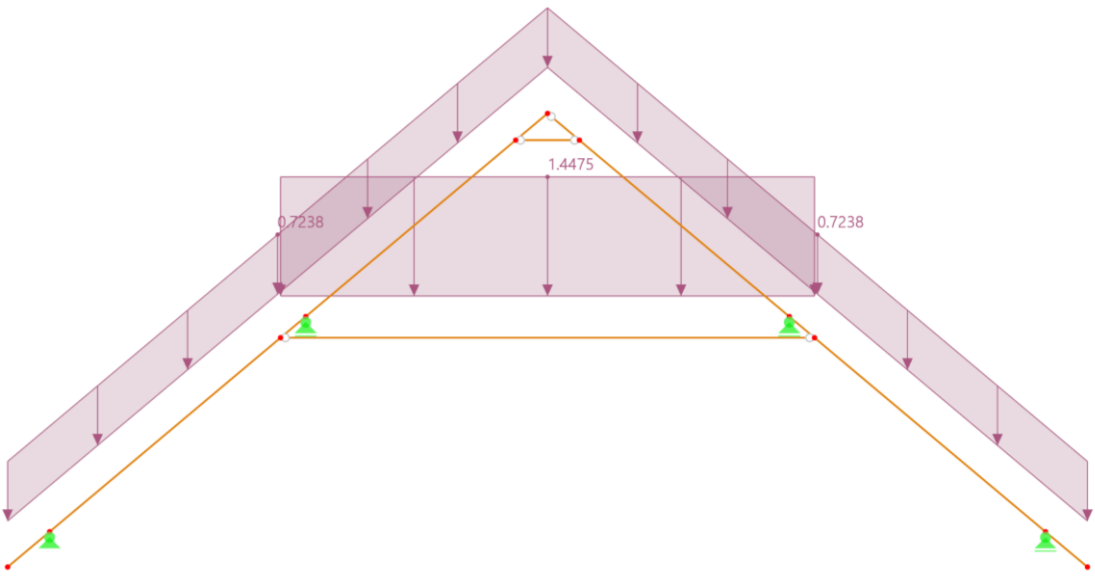
Řešená střecha není přístupná a řadí se podle ČSN EN 1991-1-1 do kategorie H – střechy nepřístupné s výjimkou údržby a oprav[1]. Plošná tíha tohoto zatížení je dána hodnotou 0,75 kN/m^2.

Výpočet užitného zatížení:

Tab. 3.7 Výpočet užitného zatížení

	Ploš. tíha [kN/m^2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Pochozí půda	1,50	0,965	**1,4475**
Nepochozí střecha	0,75	0,965	**0,7238**

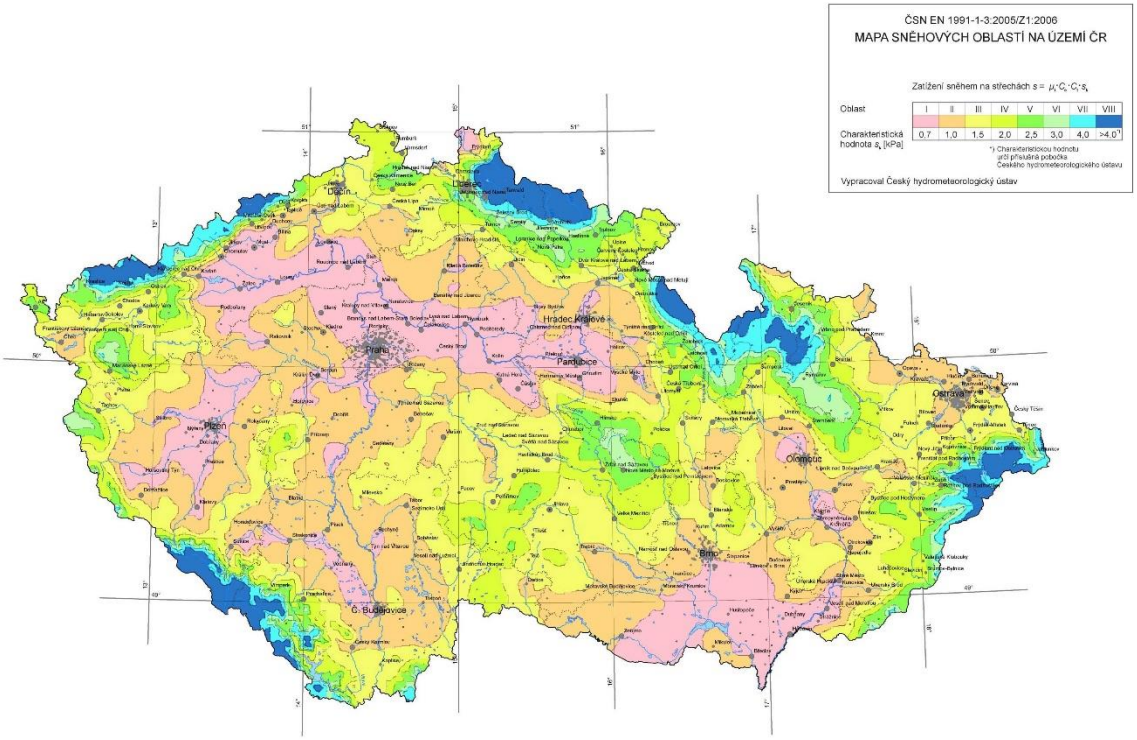
Užitné zatížení – schéma



Obr. 3.8 Užitné zatížení [kN/m]

3.3.2 ZATÍŽENÍ SNĚHEM

Objekt rodinného domu s řešenou střešní konstrukcí leží v malé obci v České republice v oblasti Luhačovického zálesí. Hodnota zatížení sněhem závisí na lokalitě umístění posuzované střechy takzvané sněhové oblasti[2]. Po nahlédnutí do mapy sněhových oblastí (obr. 3.9) České republiky jsem budovu zařadil do III. sněhové oblasti. Dle ČSN EN 1991-1-3 je pro tuto sněhovou oblast charakteristická hodnota zatížení sněhem 1,5 kN/m^2. Výsledné zatížení sněhem je vypočteno v tab. 3.



Obr. 3.9 Mapa sněhových oblastí na území ČR[3]

Výpočet zatížení sněhem na šikmé střeše bude proveden dle normy ČSN EN 1991-1-3 Zatížení sněhem, podle vztahu pro trvalé, nebo dočasné situace[2]:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

kde:

μ_i – tvarový součinitel zatížení sněhem, hodnota dle sklonu střechy (tab. 3.8)

C_e – součinitel expozice (tab. 3.9)

C_t – tepelný součinitel

s_k – charakteristická hodnota zatížení sněhem dle sněhové oblasti

Tvarový součinitel zatížení sněhem

Tvarový součinitel závisí na sklonu střechy. V mém případě má střecha sklon 40˚.

Tab. 3.8 Tvarové součinitele zatížení sněhem[2]

Úhel sklonu střechy α	$0° \leq \alpha \leq 30°$	$30° \leq \alpha \leq 60°$	$60° \leq \alpha$
μ_1	0,80	$0{,}8(60-\alpha)/30$	0,0
μ_2	$0{,}8+0{,}8\alpha/30$	1,6	--

Pro šikmé střechy se tvarový součinitel zatížení sněhem dle tab. 3.8 pro úhel sklonu střechy v intervalu od 30˚ do 60˚ určí dle vztahu:

$$\mu_1 = 0{,}8 \cdot \frac{(60-\alpha)}{30} = 0{,}8 \cdot \frac{(60-40)}{30} = 0{,}533$$

kde:

α – sklon střechy

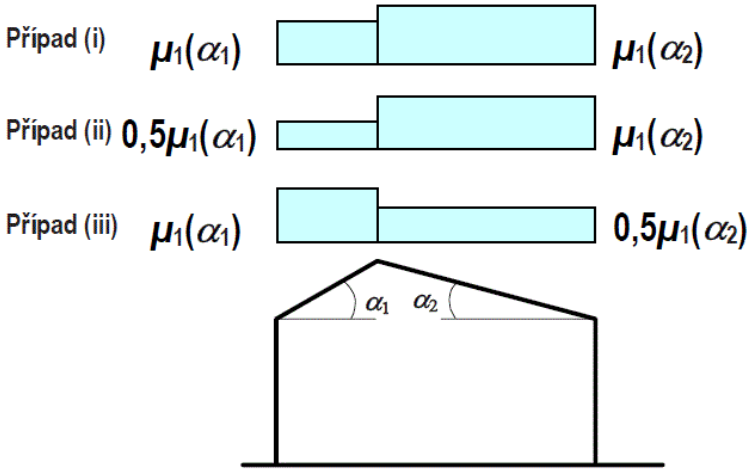
Tyto hodnoty platí pouze v případě, že není zabráněno sklouzávání sněhu ze střechy[2]. V mém případě, jelikož na konstrukci střechy nejsou žádné sněžníky nebo jiné překážky, lze vypočtenou hodnotu použít. V opačném případě by hodnota nesměla klesnout pod 0,8[2].

Uspořádání plného a navátého sněhu pro sedlové střechy se určí dle ČSN EN 1991-1-3 postupem podle obr. 3.10. Vzhledem k tomu, že se jednotlivé úhly střešní konstrukce rovnají, výsledné uspořádání sněhu bude následovné:

Případ (i): $\mu_1 - \mu_1$

Případ (ii): $0{,}5\mu_1 - \mu_1$

Případ (iii): $\mu_1 - 0{,}5\mu_1$



Obr. 3.10 Tvarové součinitele zatížení sněhem pro sedlové střechy[2]

Součinitel expozice

Součinitel expozice je hodnota, která závisí na struktuře okolní výstavby. Pro součinitel expozice lze použít doporučenou hodnotu dle ČSN EN 1991-1-3, které jsou znázorněny a vysvětleny v tab. 3.9.

Tab. 3.9 Doporučené hodnoty součinitele C_e pro různé typy krajiny[2]

Typ krajiny	**C_e**
Otevřená [a)]	0,8
Normální [b)]	1,0
Chráněná [c)]	1,2

[a)] *Otevřený typ krajiny:* rovná plocha bez překážek, otevřená do všech stran, nechráněná nebo jen málo chráněná terénem, vyššími stavbami nebo stromy.

[b)] *Normální typ krajiny:* plochy, kde nedochází na stavbách k výraznému přemístění sněhu větrem kvůli okolnímu terénu, jiným stavbám nebo stromům.

[c)] *Chráněný typ krajiny:* plochy, kde je uvažovaná stavba výrazně nižší než okolní terén nebo je stavba obklopena vysokými stromy a/nebo vyššími stavbami.

Podle uvedené tabulky v mém případě použiji hodnotu pro součinitel expozice $Ce = 1{,}0$, protože se objekt nachází v normálním typu krajiny.

Tepelný součinitel

Tepelný součinitel na konstrukci se počítá pouze v případě, když lze na konstrukci použít nižší zatížení sněhem. Tyto podmínky lze použít u střech s vysokou tepelnou propustností, zejména u některých skleněných střech, kde dochází k prostupu tepla střechou[2]. Pro ostatní případy je nutné použít hodnotu tepelného součinitele $Ct = 1{,}0$.

Zatížení sněhem

Po dosazení hodnot do vztahu pro výpočet zatížení sněhem dostaneme hodnotu plného (navátého) sněhu:

$$s_1 = 0{,}533 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}5 = 0{,}8\ \mathrm{kN/m^2}$$

Dosazením do vztahů pro výpočet zatížení sněhem navátým podle obr. 3.10, v mém případě pouze vynásobení plného sněhu násobkem 0,5; dostaneme hodnotu pro navátý sníh:

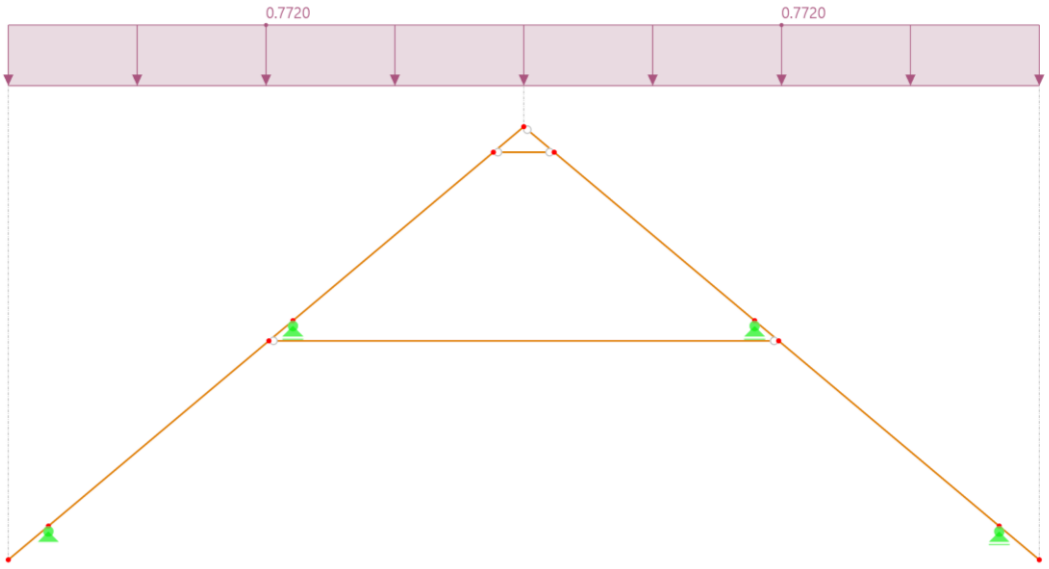
$$s_2 = 0{,}5 \cdot\ 0{,}533 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}5 = 0{,}4\ \mathrm{kN/m^2}$$

Výsledné zatížení sněhem na konstrukci:

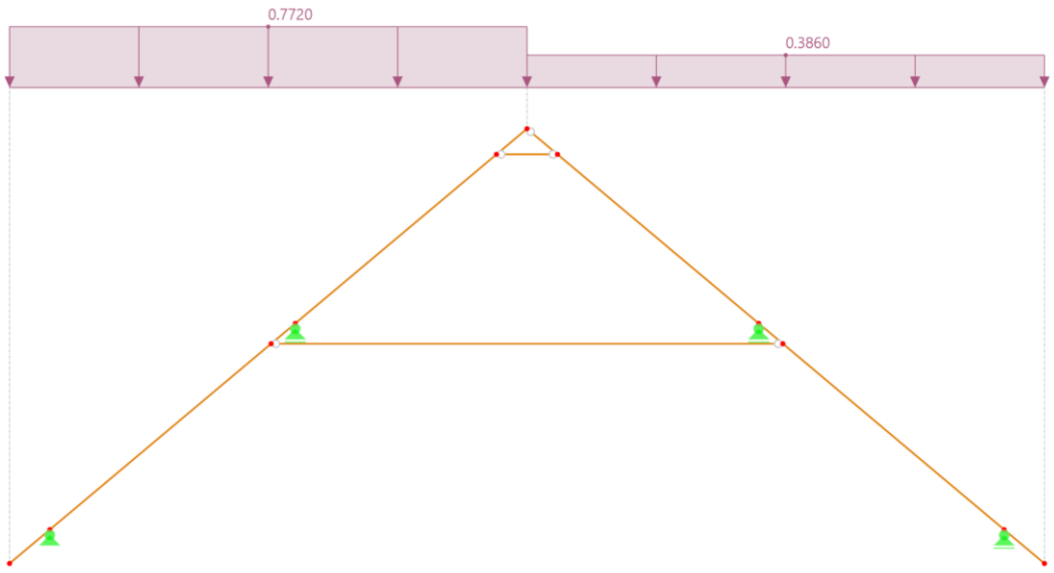
Tab. 3.10 Výpočet zatížení od sněhu

	Ploš. tíha [kN/m^2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Plný sníh – s_1	0,80	0,965	**0,772**
Navátý sníh – s_2	0,40	0,965	**0,386**

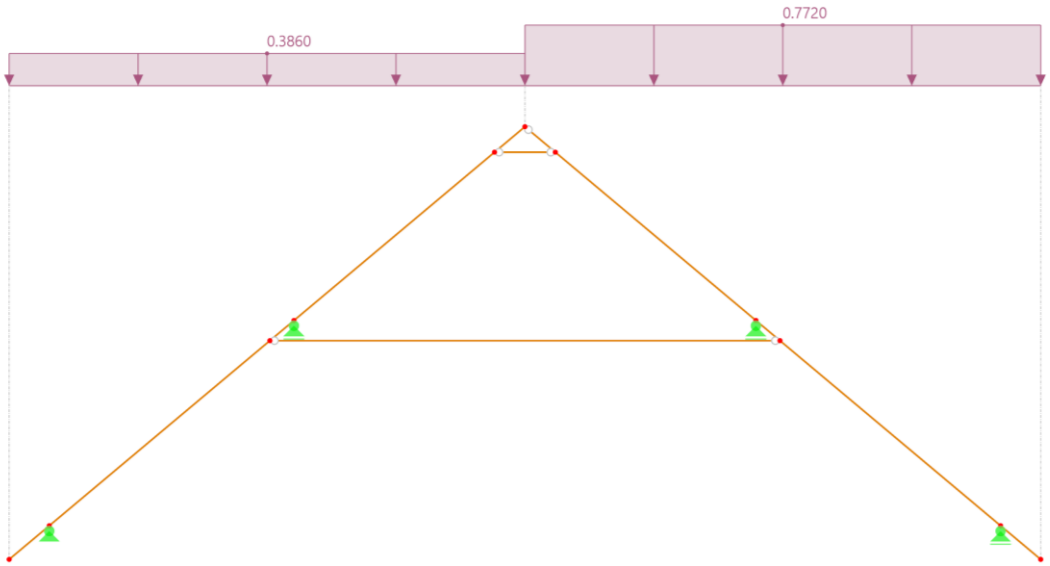
Zatížení sněhem – schéma



Obr. 3.11 Zatížení sněhem - sníh plný [kN/m]



Obr. 3.12 Zatížení sněhem - sníh navátý zleva [kN/m]

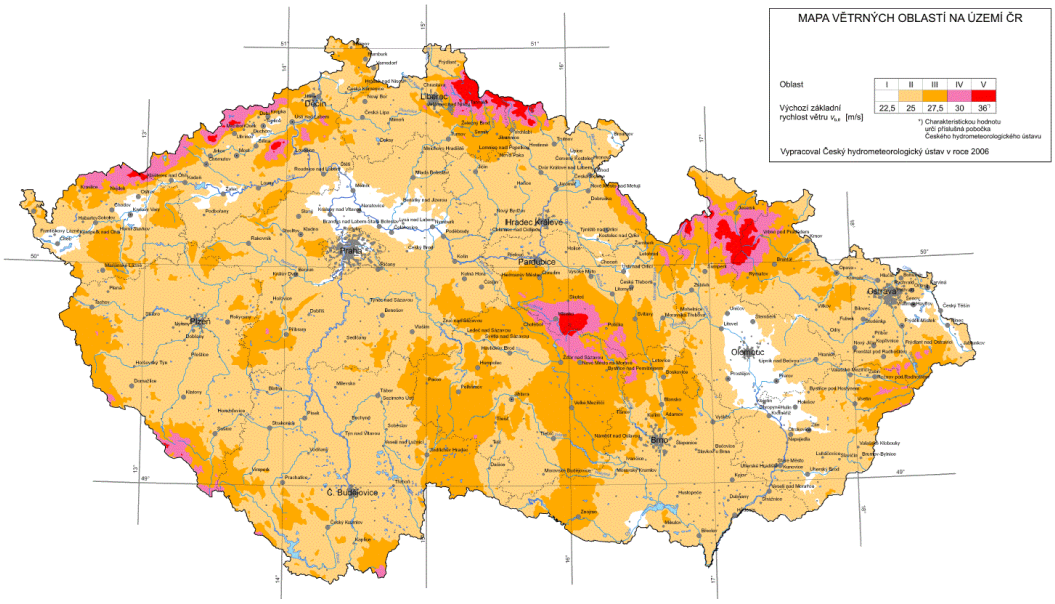


Obr. 3.13 Zatížení sněhem - sníh navátý zprava [kN/m]

3.3.3 ZATÍŽENÍ VĚTREM

Zatížení větrem je stejně jako zatížení sněhem závislé na oblasti, kde se stavební objekt nachází. Při zatížení větrem se jedná o takzvané větrné oblasti. Mnou vybraná střešní konstrukce je na objektu, který patří dle ČSN EN 1991-1-4 Zatížení větrem a mapy větrných oblastí na území ČR (obr. 3.14) do II. větrné oblasti, pro kterou platí, že základní rychlost větru je 25 m/s. Objekt s řešenou střešní konstrukcí lze zařadit do kategorie terénu III. Kategorie terénu se určí na základě tabulkových hodnot, viz tab. 3.12.

Zatížení větrem na konstrukci působí jako kombinace tlaků a sání. Jelikož vítr může působit z jakéhokoli směru na konstrukci krovu, je nutné spočítat všechny možné kombinace zatížením větrem. V první fázi budu počítat zatížení větrem v příčném směru, který může konstrukci namáhat čtyřmi různými zatěžovacími stavy. V dalším případě je nutné spočítat zatížení větrem podélným.



Obr. 3.14 Mapa větrných oblastí na území ČR[4]

Základní rychlost větru

Jedná se o základní rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí, definovaná jako funkce směru větru a ročního období[3]. Výchozí základní rychlost větru je vyjádřená z tab. 3.3. Základní rychlost větru se vypočte[3]:

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

kde:

c_{dir} – součinitel směru větru (obecně = 1,0)

c_{season} – součinitel ročního období (obecně = 1,0)

$v_{b,0}$ – výchozí základní rychlost větru (dle větrné oblasti; tab. 3.11)

Tab. 3.11 Základní rychlost větru[4]

Větrná oblast	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**
$v_{b,0}$ [m/s]	22,50	**25,00**	27,50	30,00	36,00 (dle ČHMÚ)

Charakteristická střední rychlost větru

Charakteristická střední rychlost větru je závislá na výšce nad terénem, základní rychlosti větru a drsnosti terénu. Výpočet charakteristické střední rychlosti větru dle rovnice[3]:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0{,}7241 \cdot 1{,}0 \cdot 25 = \mathbf{18{,}10 \text{ m/s}}$$

kde:

v_b – základní rychlost větru

$c_0(z)$ – součinitel orografie – horopisu (návrhová hodnota $c_0(z) = 1{,}0$)

$c_r(z)$ – součinitel drsnosti terénu

Součinitel drsnosti terénu

Součinitel drsnosti závisí na výšce z, která je rovna výšce hřebene objektu od okolního terénu a vyjadřuje změnu střední rychlosti větru[3]. Řešený objekt dosahuje výšky $z = 8{,}65\ m$.

Pro: $z \leq z_{min} \rightarrow 8{,}65\ m \leq 5\ m \rightarrow$ *Pro tento případ nevyhovuje*

$$c_r(z) = c_r(z_{min})$$

Pro: $z_{min} \leq z \leq z_{max} \rightarrow 5m \leq 8{,}65\,m \leq 200\,m \rightarrow$ *Vyhovuje pro tento případ*

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0{,}2154 \cdot \ln\left(\frac{8{,}65}{0{,}3}\right) = 0{,}7241$$

kde:

z – výška objektu nad terénem

z_{min} – minimální výška (tabulková hodnota dle kategorie terénu; tab. 3.12)

z_{max} – výchozí hodnota se uvažuje 200 m

z_0 – parametr drsnosti terénu (tab. hodnota dle kategorie terénu; tab. 3.12)

k_r – součinitel terénu

Tab. 3.12 Kategorie terénů a jejich parametry[3]

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

Řešená střešní konstrukce je na základě tab. 3.12 zařazena do kategorie terénu III. Objekt s touto střechou je postaven jako samostatně stojící dům, který je umístěn na vesnici v zástavbě rodinných domů.

Součinitel terénu

Součinitel terénu závisí na parametru drsnosti terénu z_0 zvoleného podle kategorie terénu a vypočte se podle vztahu[3]:

$$k_r = 0{,}19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0{,}07} = 0{,}19 \cdot \left(\frac{0{,}3}{0{,}05}\right)^{0{,}07} = 0{,}2154$$

kde:

z_0 – parametr drsnosti terénu (hodnota dle kategorie terénu; tab. 3.12)

$z_{0,II}$ – pro terén kategorie II $z_{0,II} = 0{,}05$ m (tab. 3.12)

Maximální dynamický tlak

Maximální dynamický tlak zahrnuje nepravidelné a nesoustavné střídání rychlosti větru. Stanovuje se pro výšku z podle vztahu[4]:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0{,}2975] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1{,}25 \cdot 18{,}10^2$$

$$q_p(z) = 630{,}4\ kPa = \mathbf{0{,}630\ kN/m^2}$$

kde:

$[1 + 7 \cdot I_v(z)]$ – vliv intenzity turbulencí

ρ – měrná hmotnost vzduchu (doporučená hodnota $\rho = 1{,}25\ \mathrm{kg/m^3}$)

$v_m(z)$ – charakteristická střední rychlost větru

Intenzita turbulence[3]

Pro: $z_{min} \leq z \leq z_{max} \rightarrow 5\ \mathrm{m} \leq 8{,}65\ \mathrm{m} \leq 200\ \mathrm{m}$

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1{,}0}{1{,}0 \cdot \ln\left(\frac{8{,}65}{0{,}3}\right)} = 0{,}2975$$

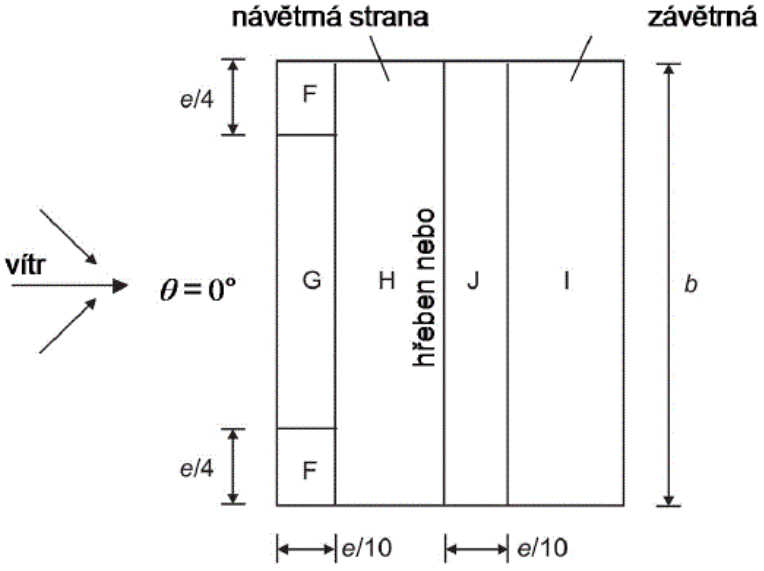
kde:

k_1 – součinitel turbulence

$c_0(z)$ – součinitel orografie – horopisu (návrhová hodnota $c_0(z) = 1{,}0$)

Zatížení příčným větrem ve směru θ = 0˚

Zatížení příčným větrem působí kolmo na hřeben střešní konstrukce – tedy rovnoběžně se štítovou stěnou.



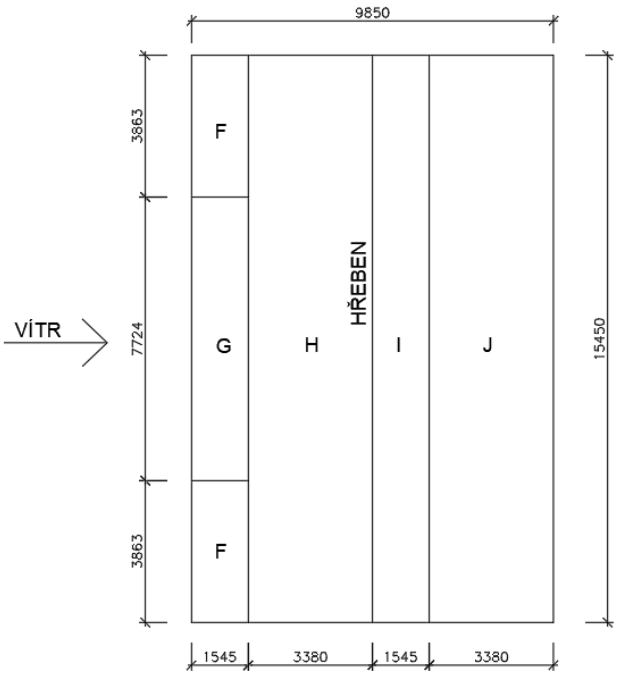
Obr. 3.15 Oblasti působení větru ve směru θ=0 ˚[4]

- Výpočet rozměrů dle [4]:

  h = 8,65 m
  b = 15,45 m
  š = 9,85 m

  $e = min\{b; 2h\} = min\{15{,}45; 2 \cdot 8{,}65\} = min\{15{,}45; 17{,}30\} = 15{,}45$ m
  $e/4 = 15{,}45/4 = 3{,}863$ m
  $e/10 = 15{,}45/10 = 1{,}545$ m

Rozdělení oblastí:



Obr. 3.16 Skutečné rozměry oblastí pro θ=0˚ [mm]

- Součinitele vnějšího tlaku $c_{pe,10}$ pro θ = 0˚

Tab. 3.13 Hodnoty součinitele vnějšího tlaku pro θ=0˚[4]

Úhel	F	G	H	I	J
30˚	-0,5	-0,5	-0,2	-0,4	-0,5
	0,7	0,7	0,4	0,0	0,0
40˚	-0,1667	-0,1667	-0,0667	-0,2667	-0,3667
	0,7	0,7	0,5333	0,0	0,0
45˚	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,3
	0,7	0,7	0,6	0,0	0,0

Norma ČSN EN 1991-1-4 uvádí pouze doporučené hodnoty součinitelů pro určité sklony střechy (tab.3.13). V mém případě musely být hodnoty

pro sklon střechy 40˚ lineárně interpolovány, přibližně vypočteny hodnoty uvnitř intervalu z krajních hodnot pro úhly 30˚ a 45˚, a následně zaokrouhleny.

- Výpočet tlaků větru w_e jednotlivých oblastí pro θ = 0˚

  Tlak větru v jednotlivých oblastech se určí součinem součinitele vnějšího tlaku pro daný úhel větru s maximálním dynamickým tlakem podle vzorce:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe,10}$$

kde:

$q_p(z_e)$ – maximální dynamický tlak větru

$c_{pe,10}$ – součinitel vnějšího tlaku (tab. 3.13)

Plošné zatížení větrem ve směru θ = 0˚:

$w_{eF} = 0{,}630 \cdot (-0{,}1667) = \mathbf{-0{,}105\ kN/m^2}$ → sání
$w_{eF} = 0{,}630 \cdot 0{,}7 = \mathbf{0{,}441\ kN/m^2}$ → tlak

$w_{eG} = 0{,}630 \cdot (-0{,}1667) = \mathbf{-0{,}105\ kN/m^2}$ → sání
$w_{eG} = 0{,}630 \cdot 0{,}7 = \mathbf{0{,}441\ kN/m^2}$ → tlak

$w_{eH} = 0{,}630 \cdot (-0{,}0667) = \mathbf{-0{,}042\ kN/m^2}$ → sání
$w_{eH} = 0{,}630 \cdot 0{,}5333 = \mathbf{0{,}336\ kN/m^2}$ → tlak

$w_{eI} = 0{,}630 \cdot (-0{,}2667) = \mathbf{-0{,}168\ kN/m^2}$ → sání
$w_{eI} = 0{,}630 \cdot 0{,}0 = \mathbf{0\ kN/m^2}$

$w_{eJ} = 0{,}630 \cdot (-0{,}3667) = \mathbf{-0{,}231\ kN/m^2}$ → sání
$w_{eJ} = 0{,}630 \cdot 0{,}0 = \mathbf{0\ kN/m^2}$

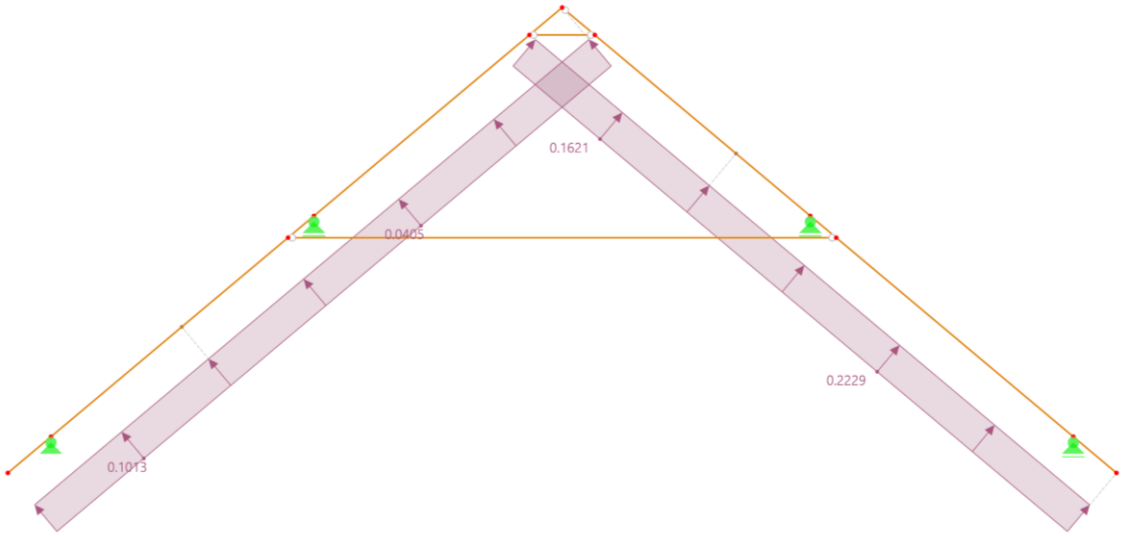
Jelikož jsem výpočtem dostal pouze plošné hodnoty zatížení větrem ve směru θ = 0˚, je nutné toto zatížení pro výpočet vnitřních sil na konstrukci převést na liniové. Tento výpočet je proveden v tab. 3.14.

Přepočet plošného zatížení větru na zatížení liniové:

Tab. 3.14 Výpočet liniového zatížení větrem ve směru θ = 0˚

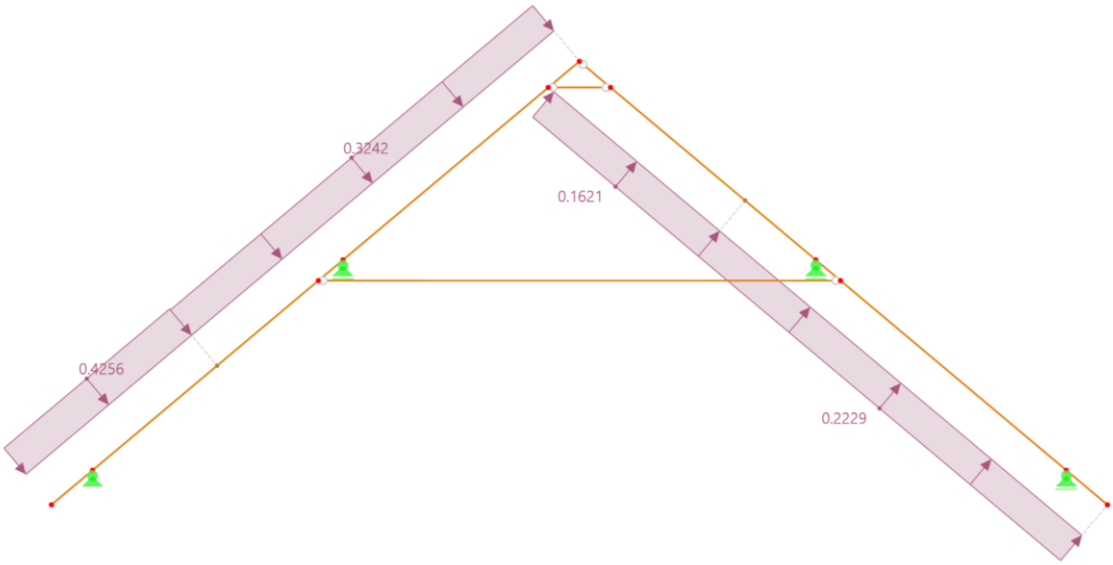
	Ploš. tíha [kN/m^2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
w_{eF} – sání	-0,105	0,965	**-0,1013**
w_{eF} – tlak	0,441	0,965	**0,4256**
w_{eG} – sání	-0,105	0,965	**-0,1013**
w_{eG} – tlak	0,441	0,965	**0,4256**
w_{eH} – sání	-0,042	0,965	**-0,0405**
w_{eH} – tlak	0,336	0,965	**0,3242**
w_{eI} – sání	-0,168	0,965	**-0,1621**
w_{eI} – tlak	0	0,965	**0**
w_{eJ} – sání	-0,231	0,965	**-0,2229**
w_{eJ} – tlak	0	0,965	**0**

- Schéma zatížení větrem ve směru θ = 0˚ zleva
  - Sání větru



Obr. 3.17 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zleva – sání [kN/m]

- Kombinace tlaku a sání větru

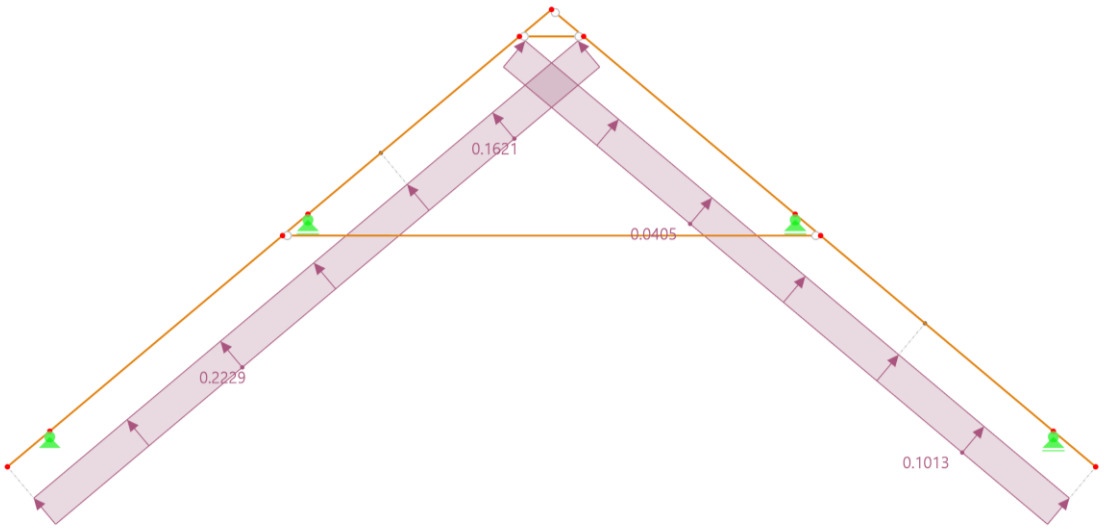


Obr. 3.18 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zleva – tlak + sání [kN/m]

- Zatížení větrem ve směru θ = 0˚ zprava

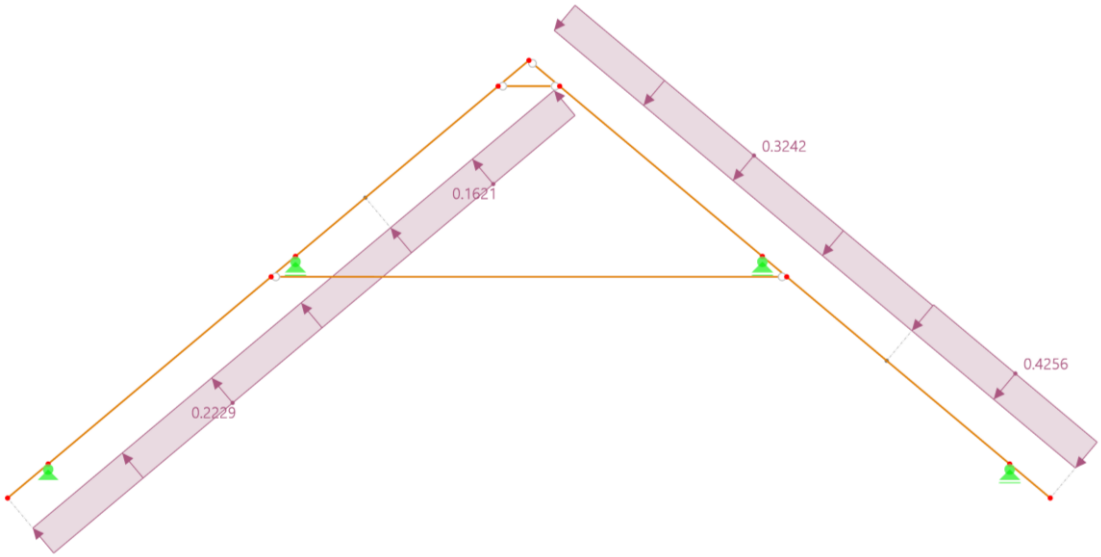
  Jelikož je konstrukce symetrická podle hřebenu, výsledné zatížení na konstrukci od větru zprava bude mít stejné hodnoty zatížení, ale bude působit zrcadlově oproti zatížení větrem zleva.

  - Sání větru



Obr. 3.19 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zprava – sání [kN/m]

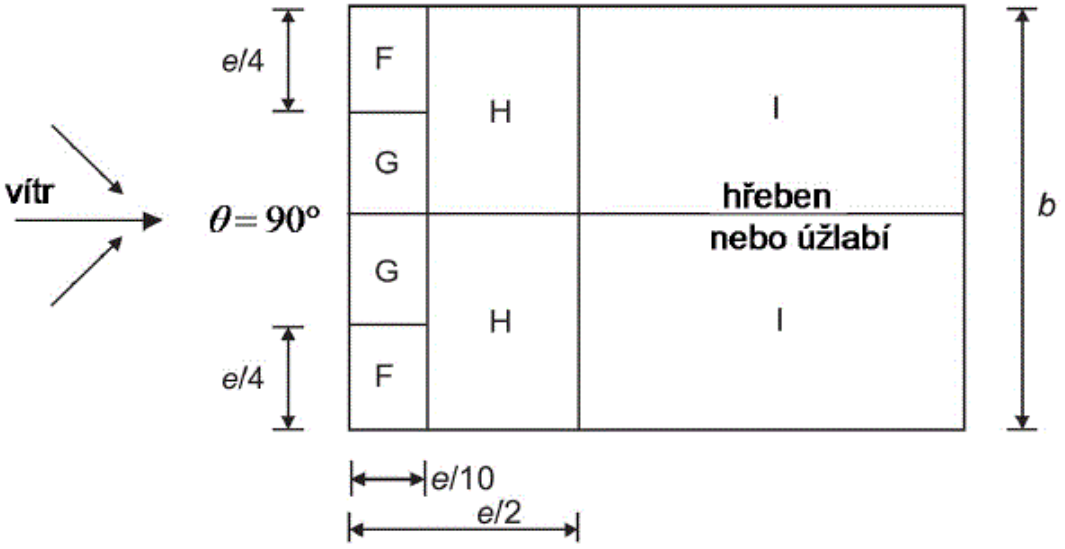
- Kombinace tlaku a sání větru



Obr. 3.20 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zprava – tlak + sání [kN/m]

Zatížení podélným větrem ve směru θ = 90˚

Zatížení podélným směrem působí rovnoběžně s hřebenem střešní konstrukce, působí tedy kolmo na štítovou stěnu.



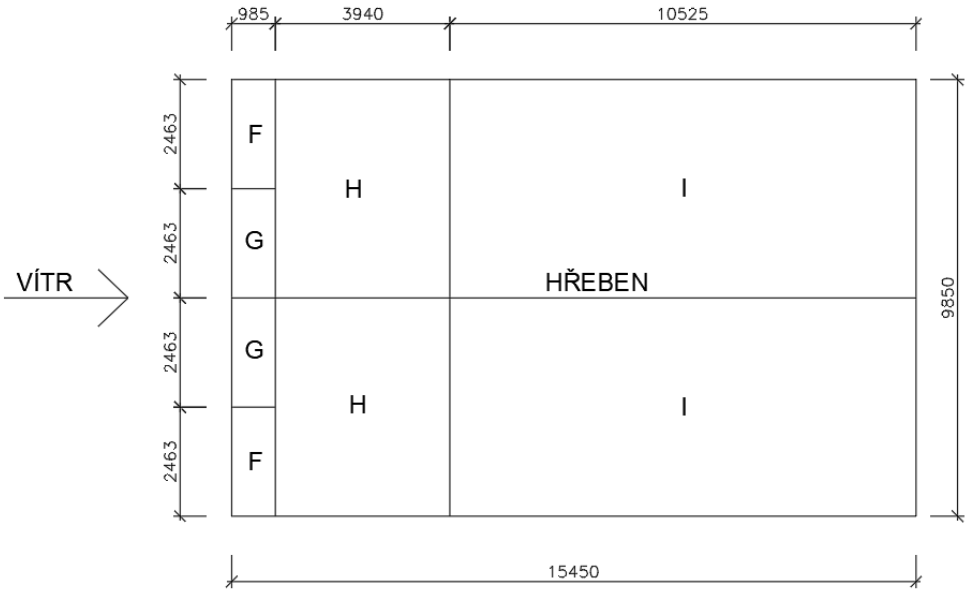
Obr. 3.21 Oblasti působení větru ve směru θ=0˚[4]

- Výpočet rozměrů dle [4]:

  h = 8,65 m
  b = 9,85 m
  š = 15,45 m

$$e = min\{b; 2h\} = min\{9{,}85; 2 \cdot 8{,}65\} = min\{9{,}85; 17{,}30\} = 9{,}85 \text{ m}$$

$e/2 = 9{,}85/2 = 4{,}925$ m
$e/4 = 9{,}85/4 = 2{,}463$ m
$e/10 = 9{,}85/10 = 0{,}985$ m



Obr. 3.22 Skutečné rozměry oblastí pro θ=90˚ [mm]

- Součinitele vnějšího tlaku $c_{pe,10}$ pro θ = 90˚

Tab. 3.15 Hodnota součinitele vnějšího tlaku pro θ=90˚[4]

Úhel	F	G	H	I
30˚	-1,1	-1,4	-0,8	-0,5
40˚	-1,1	-1,4	-0,8667	-0,5
45˚	-1,1	-1,4	-0,9	-0,5

Norma ČSN EN 1991-1-4 uvádí pouze doporučené hodnoty součinitelů pro určité sklony střechy. V mém případě musely být hodnoty pro sklon střechy 40˚ lineárně interpolovány – přibližně vypočteny hodnoty uvnitř intervalu z krajních hodnot pro úhly 30˚ a 45˚, a následně zaokrouhleny.

- Výpočet tlaků větru w_e jednotlivých oblastí pro θ = 90˚

  Tlak větru v jednotlivých oblastech se určí součinem součinitele vnějšího tlaku pro daný úhel větru a maximálním dynamickým tlakem podle vzorce[4]:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe,10}$$

kde:

$q_p(z_e)$ – maximální dynamický tlak

$c_{pe,10}$ – součinitel vnějšího tlaku (tab. 3.15)

Plošné zatížení větrem ve směru θ = 90˚:

$$w_{eF} = 0{,}630 \cdot (-1{,}1) = \mathbf{-0{,}693\ kN/m^2} \quad \rightarrow \quad \text{sání}$$

$$w_{eG} = 0{,}630 \cdot (-1{,}4) = \mathbf{-0{,}882\ kN/m^2} \quad \rightarrow \quad \text{sání}$$

$$w_{eH} = 0{,}630 \cdot (-0{,}8667) = \mathbf{-0{,}546\ kN/m^2} \quad \rightarrow \quad \text{sání}$$

$$w_{eI} = 0{,}630 \cdot (-0{,}5) = \mathbf{-0{,}315\ kN/m^2} \quad \rightarrow \quad \text{sání}$$

Jelikož jsem výpočtem dostal pouze plošné hodnoty zatížení větrem ve směru θ = 90˚, je nutné toto zatížení pro výpočet vnitřních sil na konstrukci převést na lineární. Tento převod, výpočet, je proveden v tab. 3.16.

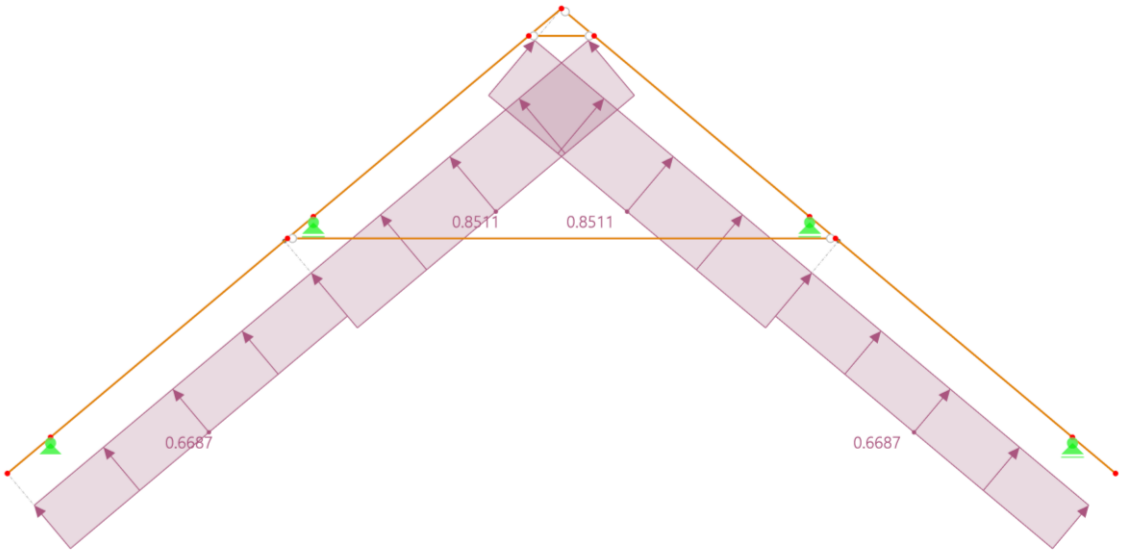
Přepočet plošného zatížení větru na zatížení liniové:

Tab. 3.16 Výpočet liniového zatížení větrem ve směru θ = 90˚

	Ploš. tíha [kN/m^2]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
w_{eF} – sání	-0,693	0,965	**-0,6687**
w_{eG} – sání	-0,882	0,965	**-0,8511**
w_{eH} – sání	-0,546	0,965	**-0,5269**
w_{eI} – sání	-0,315	0,965	**-0,3040**

- Zatížení podélným větrem ve směru θ = 90˚

  Zatížení podélným větrem ve směru θ=90˚ vyvolává pouze sání na konstrukci krovu.



Obr. 3.23 Zatížením větrem ve směru θ=90˚ – sání [kN/m]

4. KOMBINACE

Jednotlivá vypočtená zatížení rozdělím do zatěžovacích stavů a následně s těmito zatěžovacími stavy budou provedeny početní kombinace. Zatížení je rozděleno do těchto 11 zatěžovacích stavů:

ZS1 – Vlastní tíha

ZS2 – Ostatní stálé zatížení

ZS3 – Užitné zatížení

ZS4 – Sníh – plný

ZS5 – Sníh – navátý, případ 1

ZS6 – Sníh – navátý, případ 2

ZS7 – Vítr zleva – sání

ZS8 – Vítr zleva – tlak + sání

ZS9 – Vítr zprava – sání

ZS10 – Vítr zprava – tlak + sání

ZS11 – Vítr podélný – sání

Kombinace zatížení budou pomocí programu RFEM počítány pomocí vzorců 6.10a a 6.10b obsažených v ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí. Kombinace slouží pro určení mezního stavu únosnosti. Pro tyto vzorce platí, že stálá zatížení na konstrukci působí vždy. Dále se ve vzorcích kombinuje zatížení proměnné, které může na konstrukci působit střídavě. Z výsledků se vždy vybere nejméně příznivá kombinace.

Rovnice dle ČSN[5]:

6.10a

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

6.10b

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

Kde:

"+" – znamená „kombinovavý s"

$\sum$ - znamená „kombinovaný účinek"

ξ – redukční součinitel pro nepříznivá stálá zatížení

5. ŘEŠENÍ V PROGRAMU RFEM

5.1 STATICKÝ MODEL KONSTRUKCE

Pro zjištění výsledků vnitřních sil na konstrukci je nejdříve nutné vytvoření modelu, statického schémata, řešené konstrukce. V této práci budou řešeny dvě varianty statického schémata konstrukce. V obou případech budou kleštiny ke krokvím kloubově připojeny.

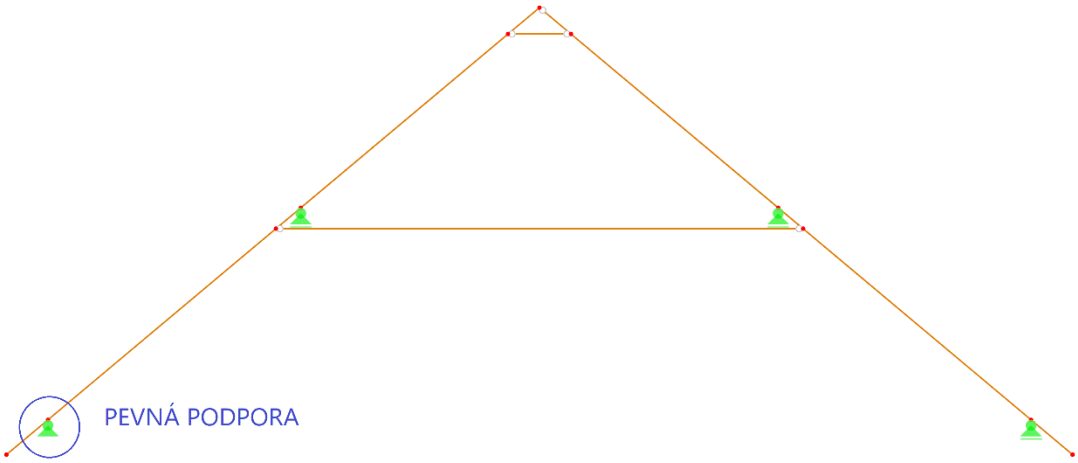
První varianta (VAR1) je konstrukce podepřená čtyřmi kloubovými podporami, z nichž je pouze jedna neposuvná a tři posuvné. Pevná (neposuvná) podpora bude umístěna do kraje v místě uložení konstrukce na pozednici.

Druhou variantou (VAR2) je podepření čtyřmi kloubovými podporami, z nichž jsou neposuvné dvě. Pevné (neposuvné) kloubové podpory budou umístěny v místech uložení konstrukce na pozednice. Kloubové podpory posuvné budou v uložení konstrukce na vaznicích.

Jednotlivé rozměrové i materiálové parametry použitých profilů byly do programu zadány ručně, včetně zatížení od zatěžovacích stavů.

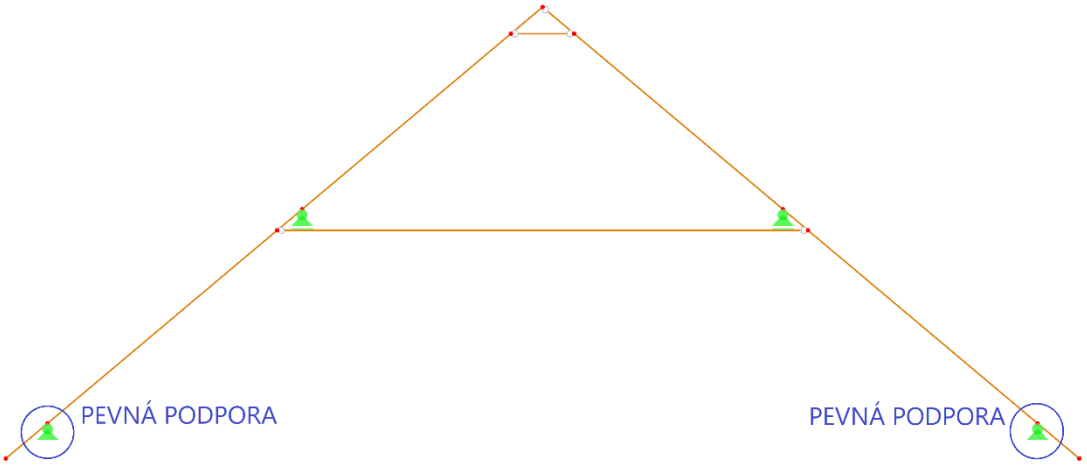
V programu bylo vytvořeno 101 různých kombinací zatížení. V této práci uvedu pouze výsledky od návrhového zatížení vlastní tíhou, které bude následně přepočítáno a obálky vnitřních sil, kde budou uvedeny největší vnitřní síly, které v konstrukci mohou působit.

5.1.1 VARIANTA 1 - JEDNA PEVNÁ PODPORA



Obr. 5.1 Statické schéma konstrukce s jednou pevnou kloubovou podporou

5.1.2 VARIANTA 2 - DVĚ PEVNÉ PODPORY

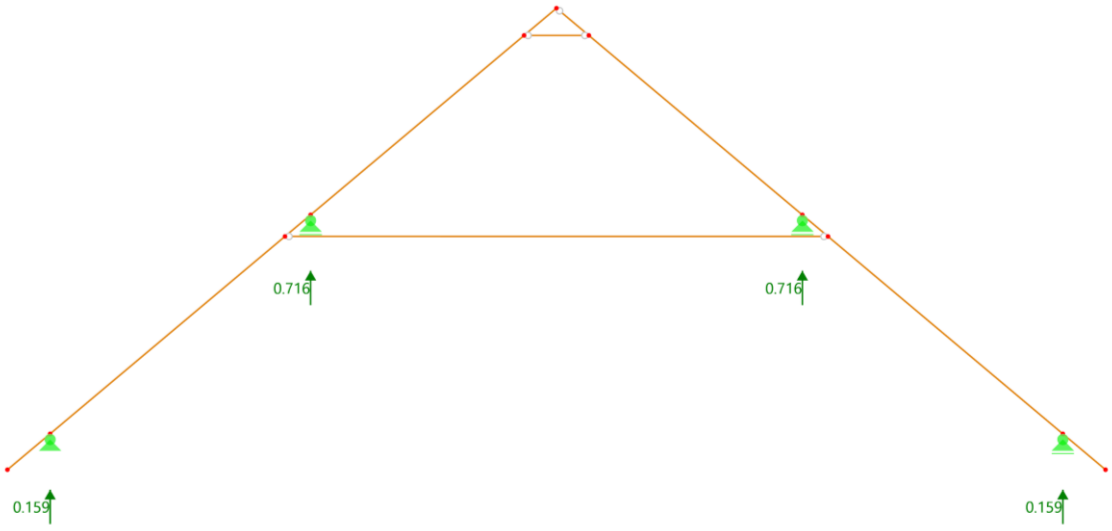


Obr. 5.2 Statické schéma konstrukce se dvěma pevnými kloubovými podporami

5.2 VÝSLEDKY VARIANTY 1

5.2.1 ZATÍŽENÍ VLASTNÍ TÍHOU

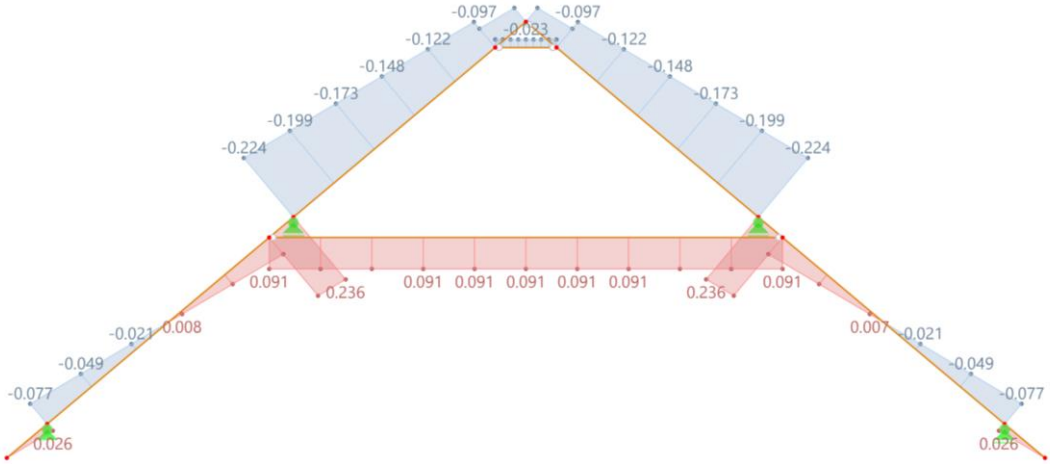
5.2.1.1 REAKCE



Obr. 5.3 Reakce od vlastní tíhy – VAR1 [kN]

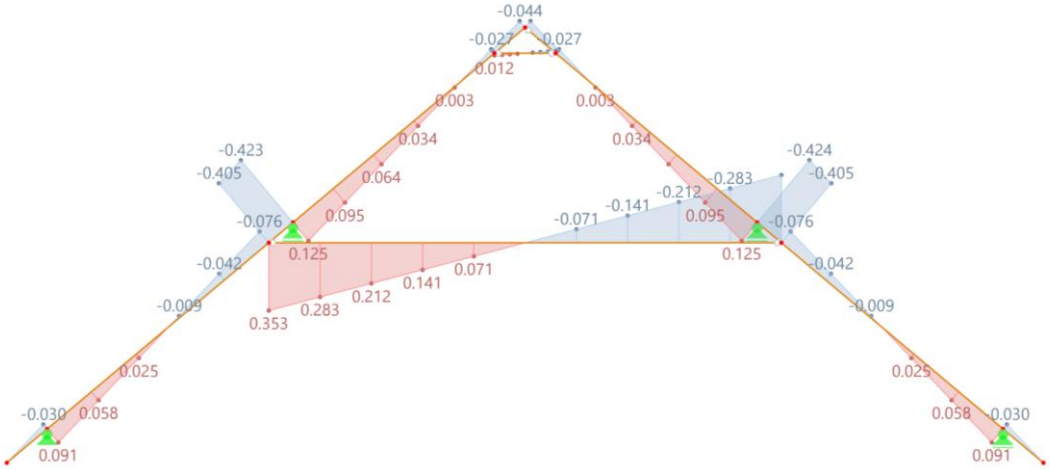
5.2.1.2 VNITŘNÍ SÍLY

Normálové síly - N



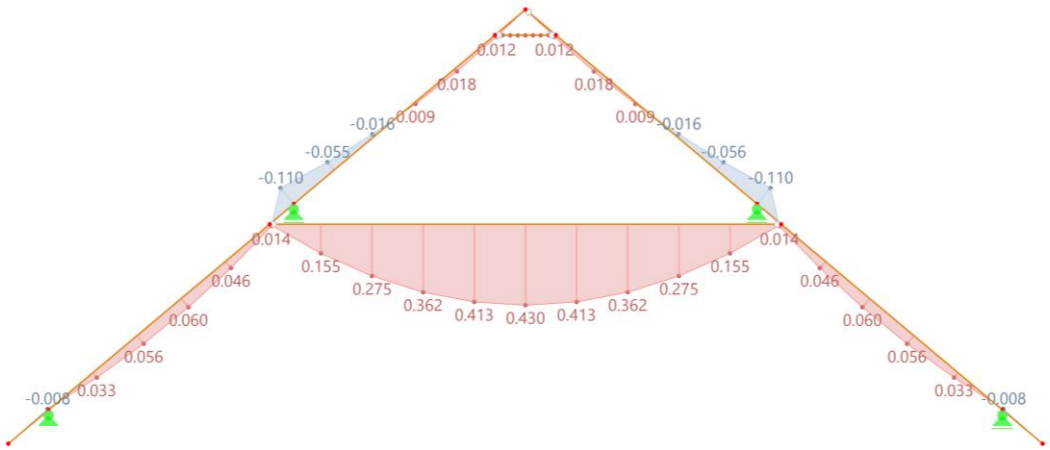
Obr. 5.4 Průběh normálových sil od vlastní tíhy - VAR1 [kN]

Posouvající síly - V



Obr. 5.5 Průběh posouvajících sil od vlastní tíhy - VAR1 [kN]

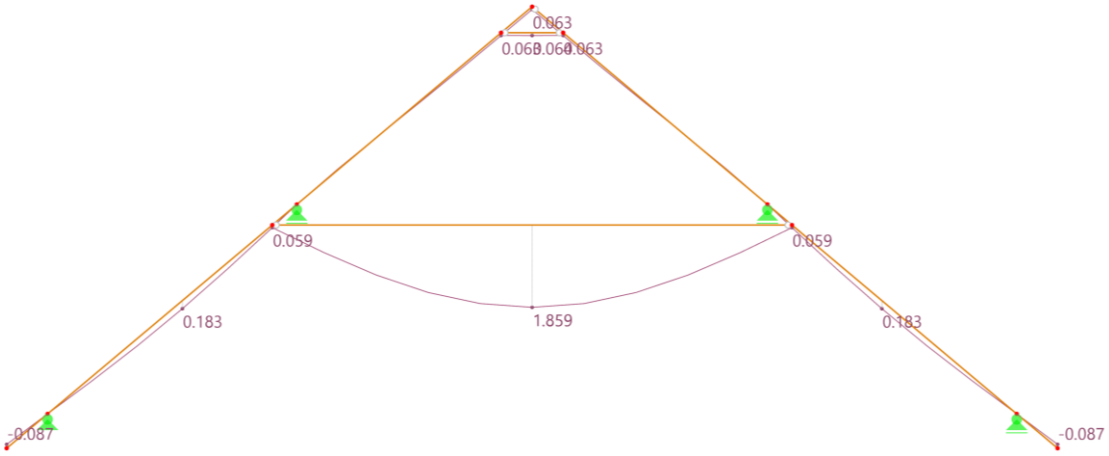
Momenty - M



Obr. 5.6 Průběh momentů od vlastní tíhy - VAR1 [kNm]

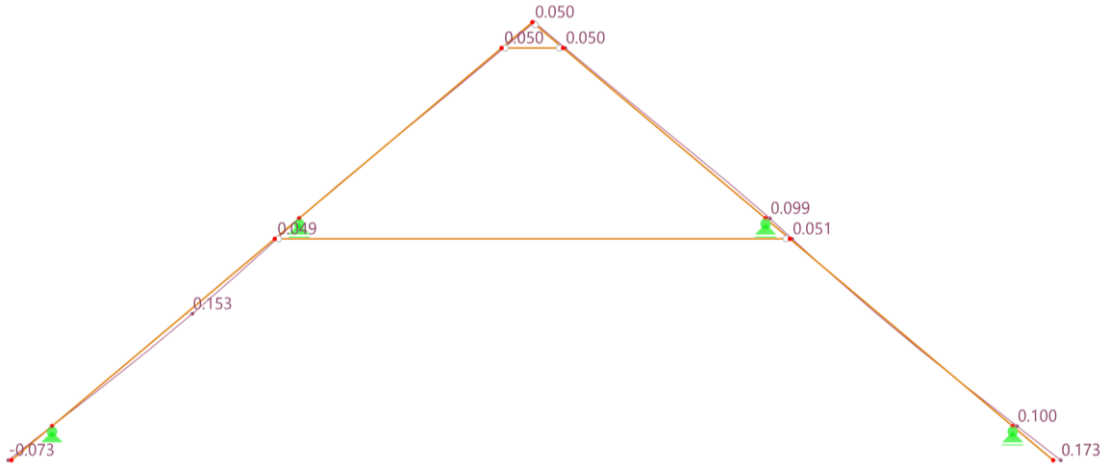
5.2.1.3 DEFORMACE

Svislá deformace



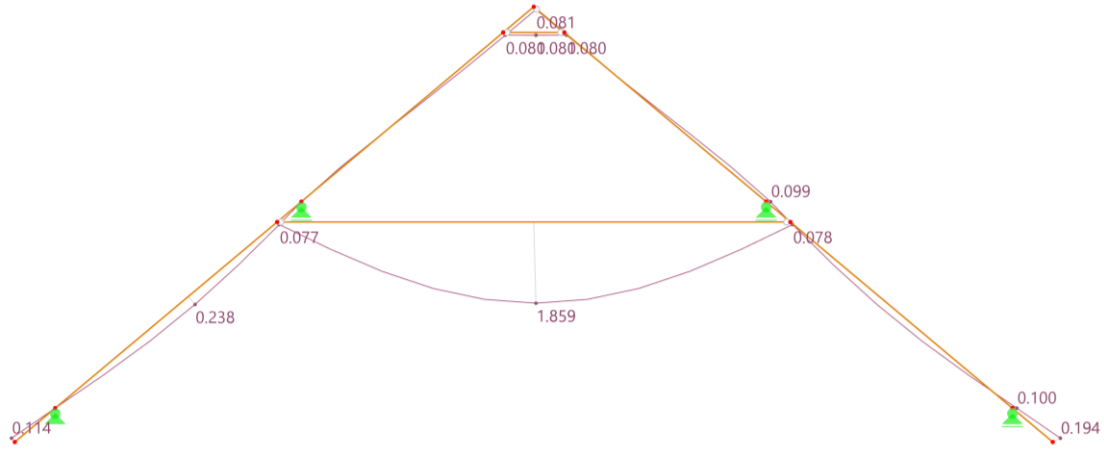
Obr. 5.7 Svislá deformace konstrukce od vlastní tíhy - VAR1 [mm]

Vodorovná deformace



Obr. 5.8 Vodorovná deformace konstrukce od vlastní tíhy - VAR1 [mm]

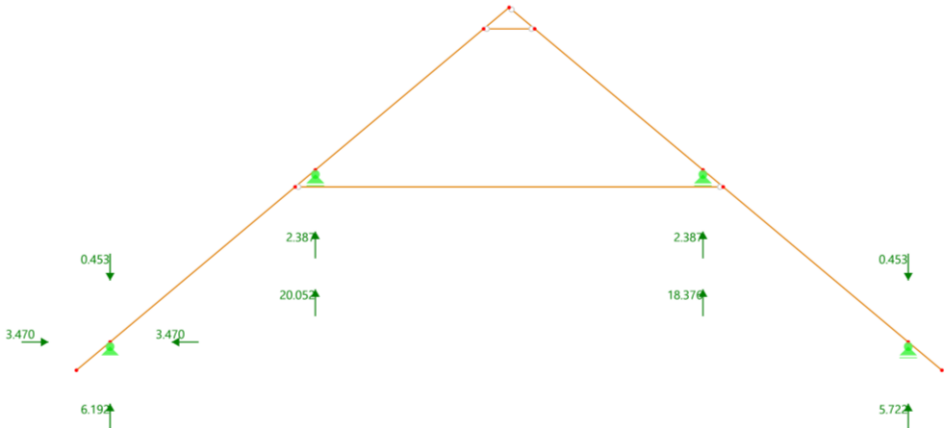
Celková deformace



Obr. 5.9 Celková deformace konstrukce od vlastní tíhy - VAR1 [mm]

5.2.2 KOMBINACE ZATÍŽENÍ

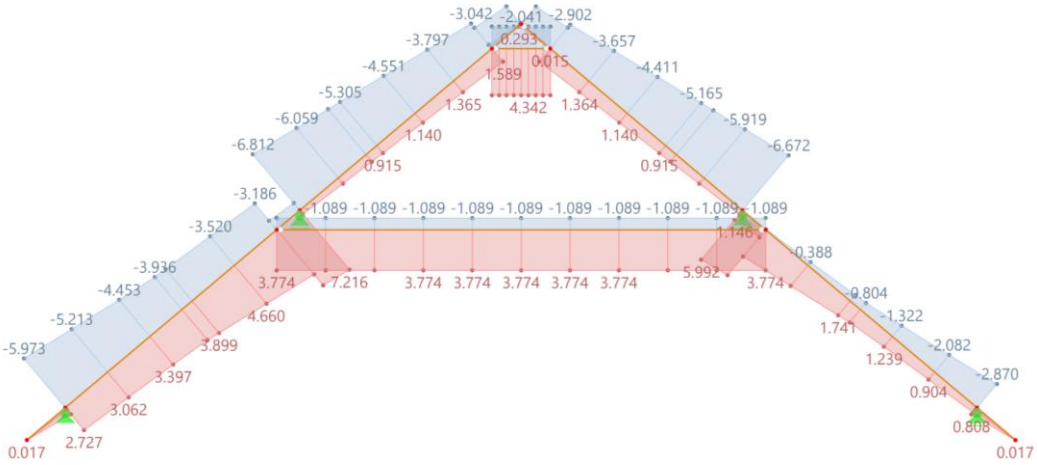
5.2.2.1 REAKCE



Obr. 5.10 Maximální reakce od kombinací - VAR1 [kN]

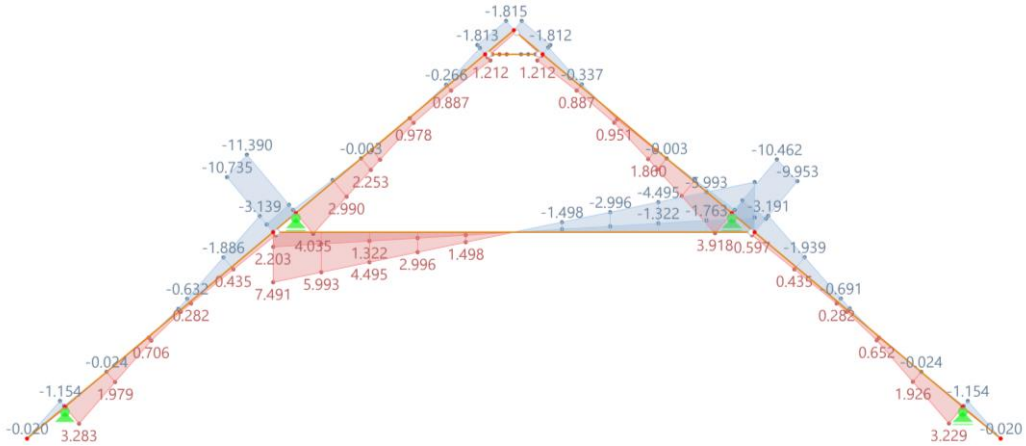
5.2.2.2 VNITŘNÍ SÍLY

Normálové síly



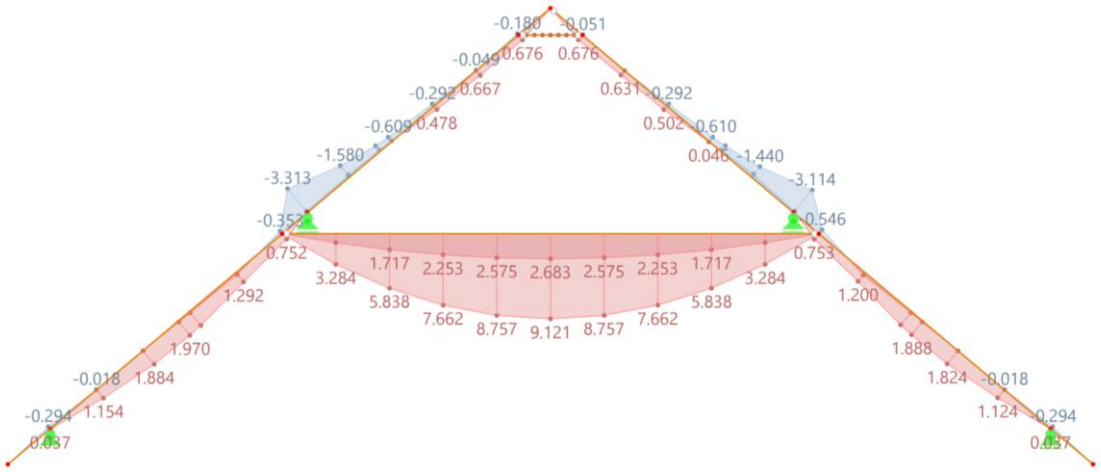
Obr. 5.11 Obálka průběhu normálových sil od kombinací - VAR1 [kN]

Posouvající síly



Obr. 5.12 Obálka průběhu posouvajících sil od kombinací - VAR1 [kN]

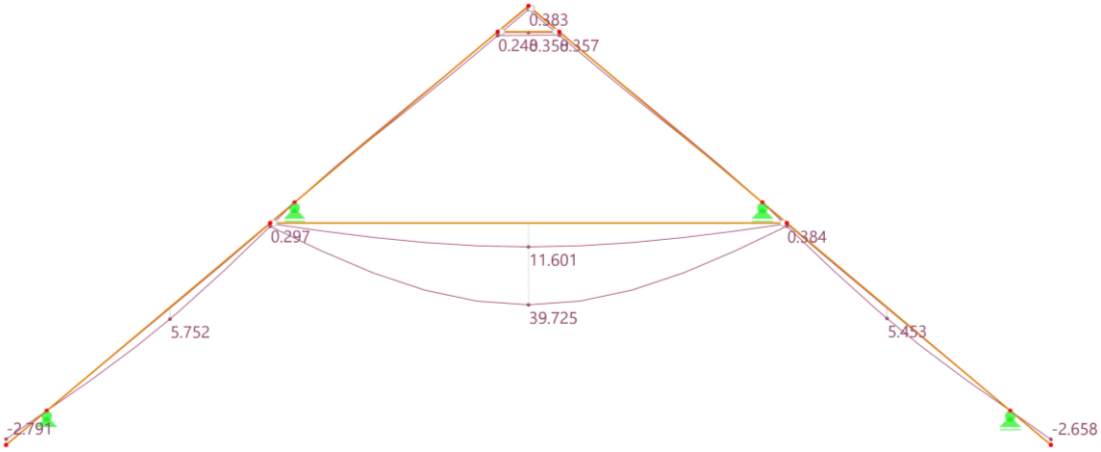
Momenty



Obr. 5.13 Obálka průběhu momentů od kombinací - VAR1 [kNm]

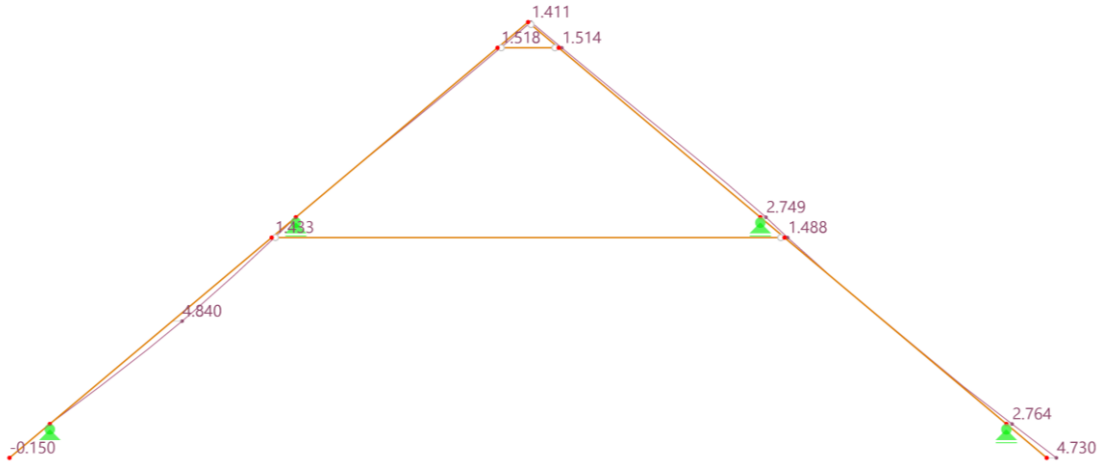
5.2.2.3 DEFORMACE

Svislá deformace



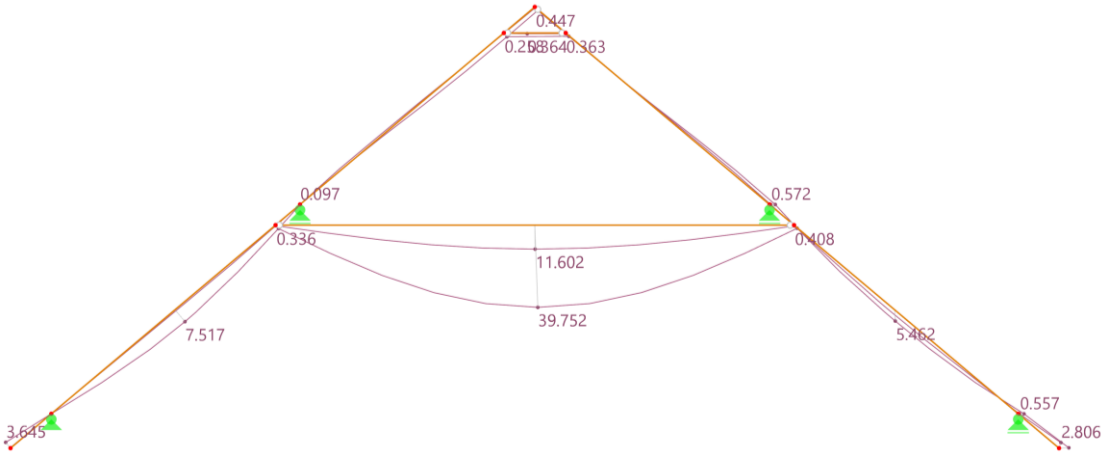
Obr. 5.14 Svislá deformace konstrukce od kombinací - VAR1 [mm]

Vodorovná deformace



Obr. 5.15 Vodorovná deformace konstrukce od kombinací - VAR1 [mm]

Celková deformace

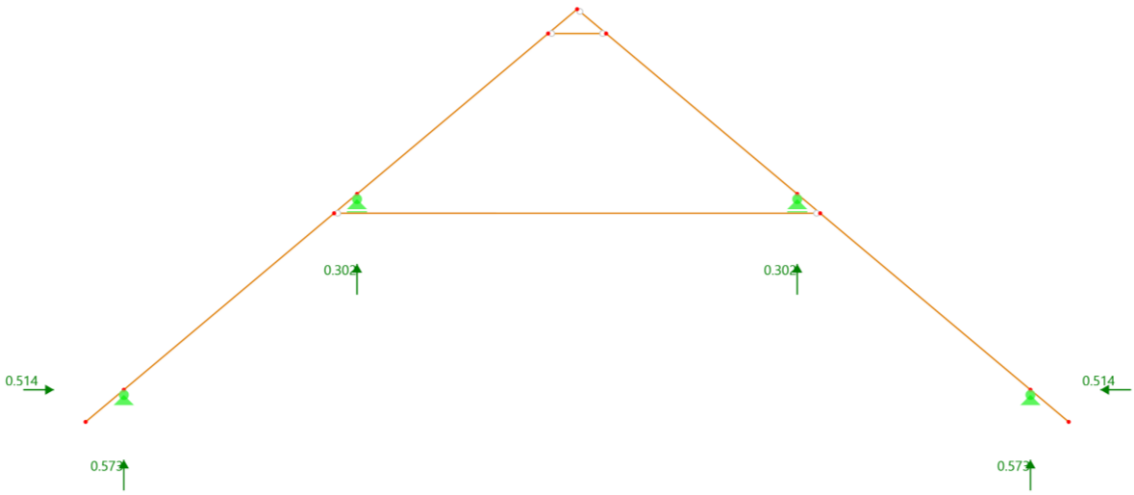


Obr. 5.16 Celková deformace konstrukce [mm]

5.3 VÝSLEDKY VARIANTY 2

5.3.1 ZATÍŽENÍ VLASTNÍ TÍHOU

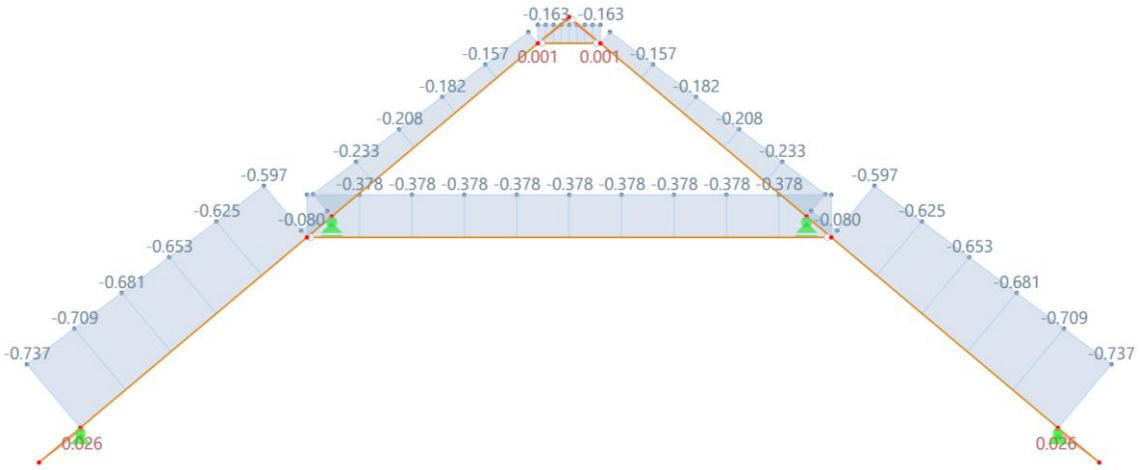
5.3.1.1 REAKCE



Obr. 5.17 Reakce od vlastní tíhy – VAR2 [kN]

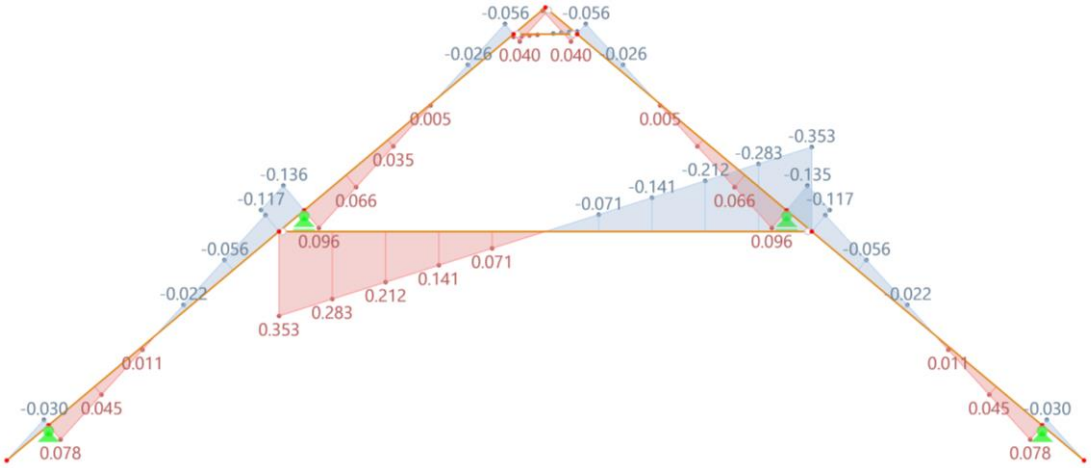
5.3.1.2 VNITŘNÍ SÍLY

Normálové síly - N



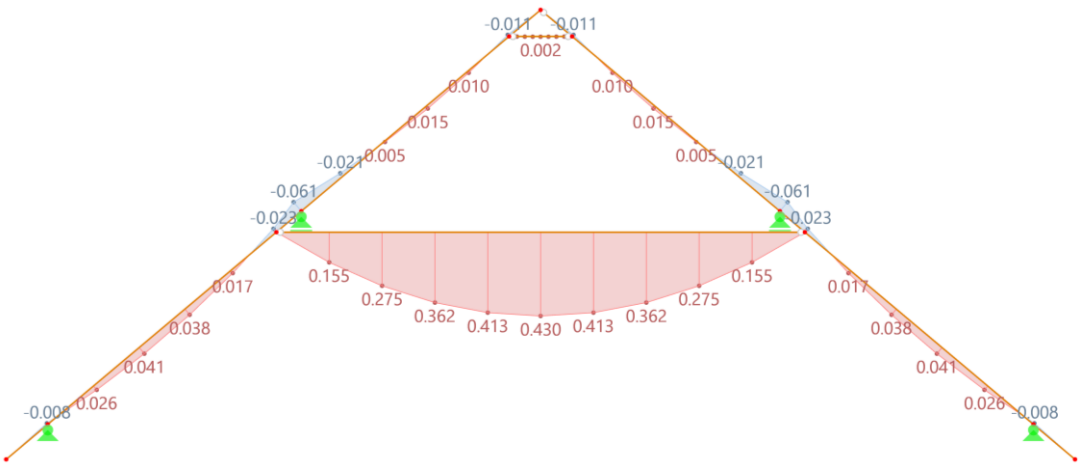
Obr. 5.18 Průběh normálových sil od vlastní tíhy – VAR2 [kN]

Posouvající síly - V



Obr. 5.19 Průběh posouvajících sil od vlastní tíhy – VAR2 [kN]

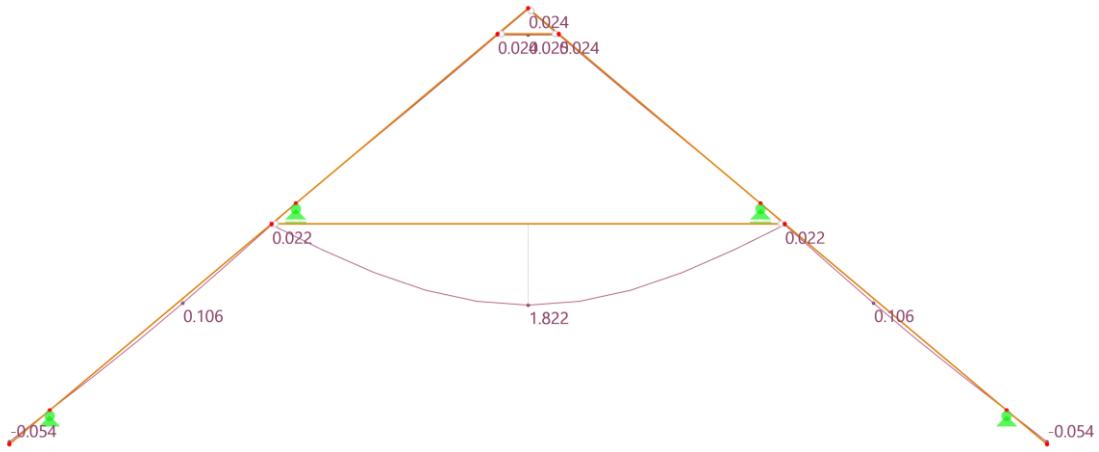
Momenty - M



Obr. 5.20 Průběh momentů od vlastní tíhy – VAR2 [kNm]

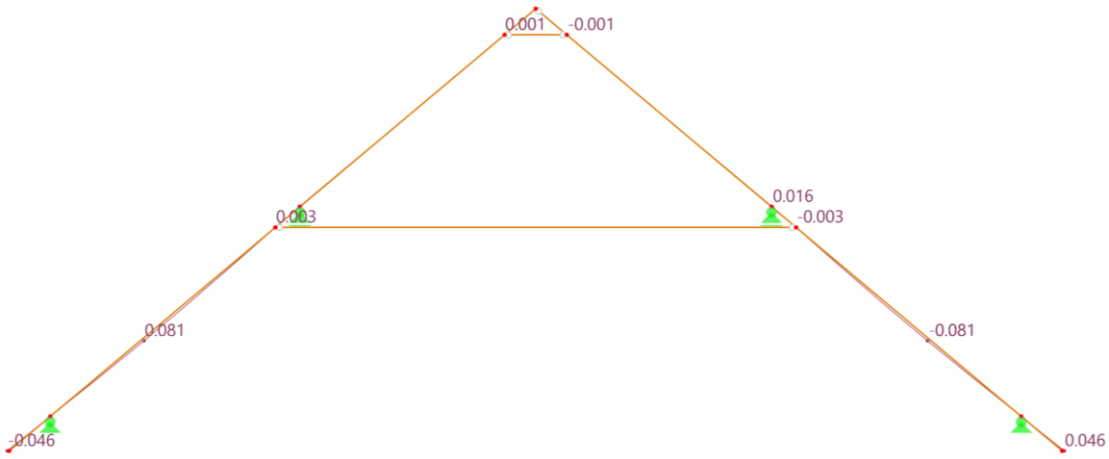
5.3.1.3 DEFORMACE

Svislá deformace



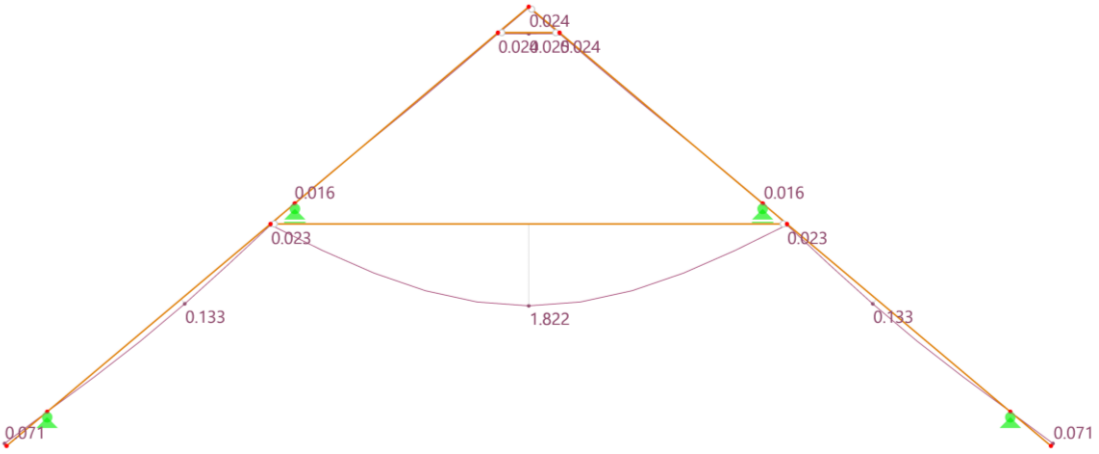
Obr. 5.21 Svislá deformace konstrukce od vlastní tíhy – VAR2 [mm]

Vodorovná deformace



Obr. 5.22 Vodorovná deformace konstrukce od vlastní tíhy – VAR2 [mm]

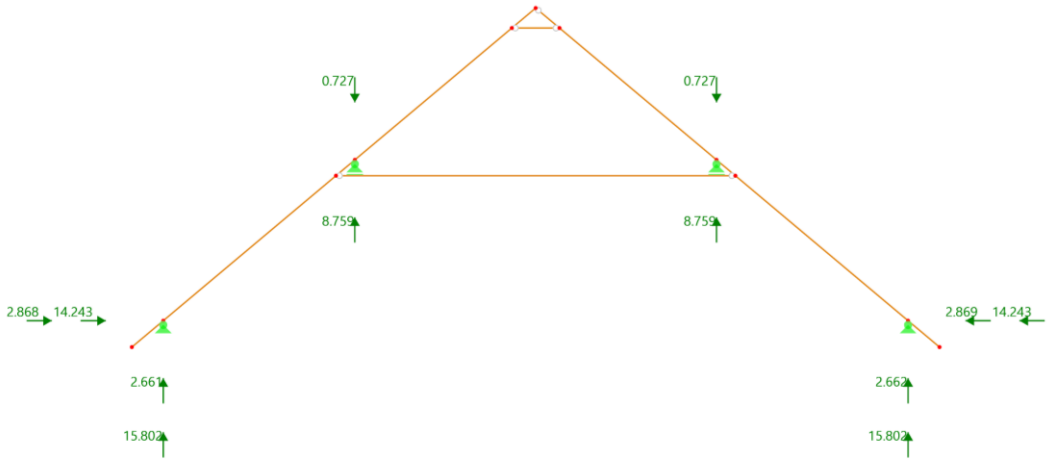
Celková deformace



Obr. 5.23 Celková deformace konstrukce od vlastní tíhy – VAR2 [mm]

5.3.2 KOMBINACE ZATÍŽENÍ

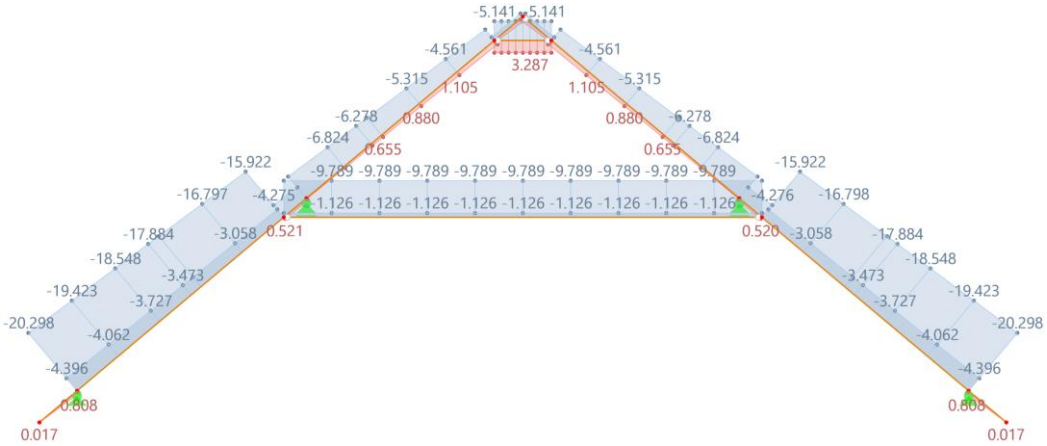
5.3.2.1 REAKCE



Obr. 5.24 Maximální reakce od kombinací – VAR2 [kN]

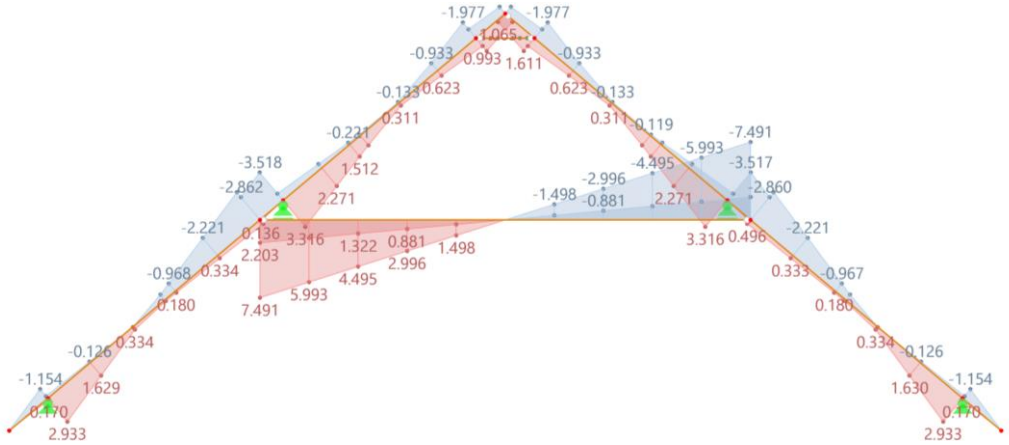
5.3.2.2 VNITŘNÍ SÍLY

Normálové síly



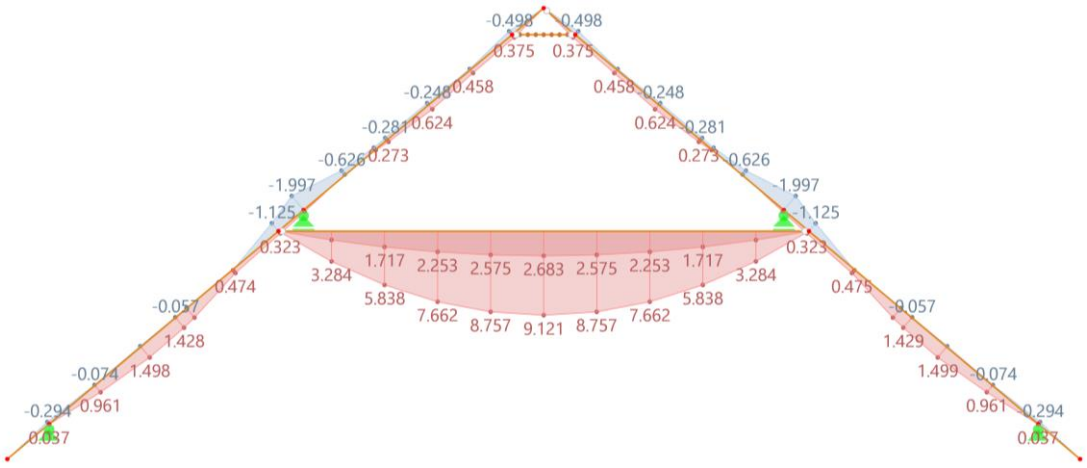
Obr. 5.25 Obálka průběhu normálových sil od kombinací – VAR2 [kN]

Posouvající síly



Obr. 5.26 Obálka průběhu posouvajících sil od kombinací – VAR2 [kN]

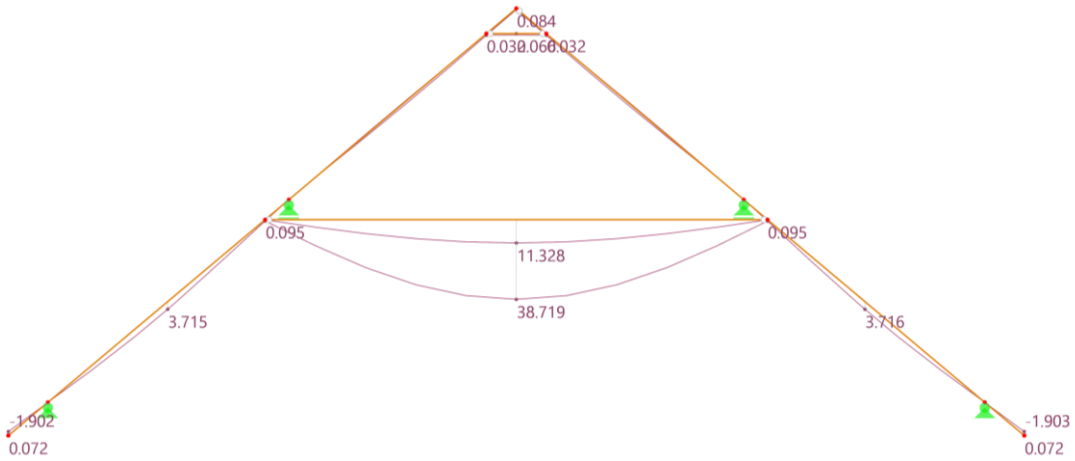
Momenty



Obr. 5.27 Obálka průběhu momentů od kombinací – VAR2 [kNm]

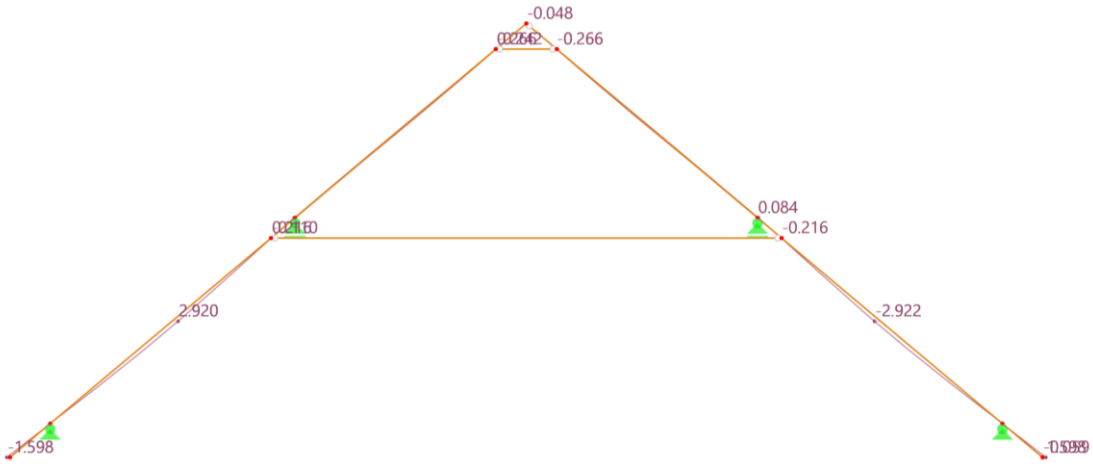
5.3.2.3 DEFORMACE

Svislá deformace



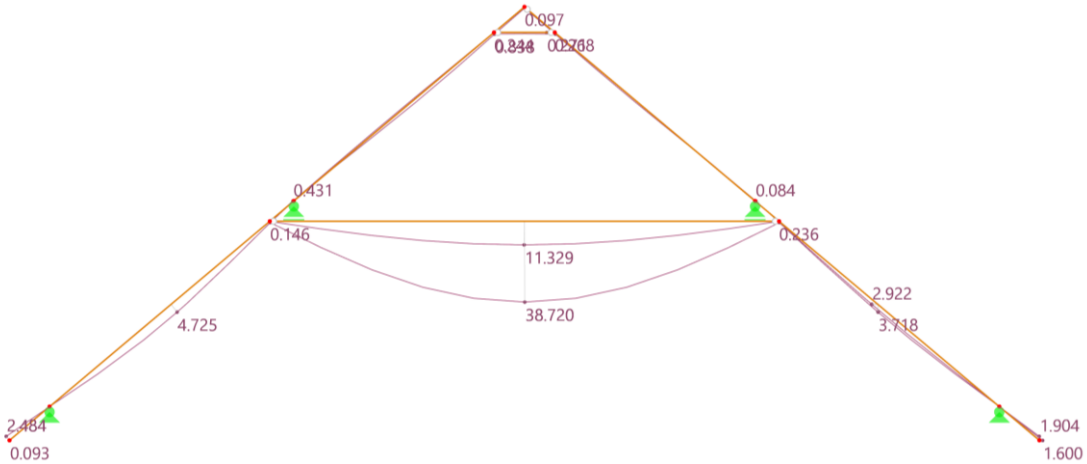
Obr. 5.28 Svislá deformace konstrukce od kombinací – VAR2 [mm]

Vodorovná deformace



Obr. 5.29 Vodorovná deformace konstrukce od kombinací – VAR2 [mm]

Celková deformace



Obr. 5.30 Celková deformace konstrukce- VAR2 [mm]

6. RUČNÍ VÝPOČET

Ručním výpočtem provedu kontrolu výsledků získaných z programu RFEM 6. Pro ruční výpočet jsem si vybral kontrolu výsledků na zatěžovacím stavu 1 – vlastní tíha konstrukce. Na tomto zatěžovacím stavu provedu výpočet vnitřních sil pomocí silové metody a posun konstrukce ve vybraném bodě počítán metodou jednotkových sil.

6.1 SILOVÁ METODA

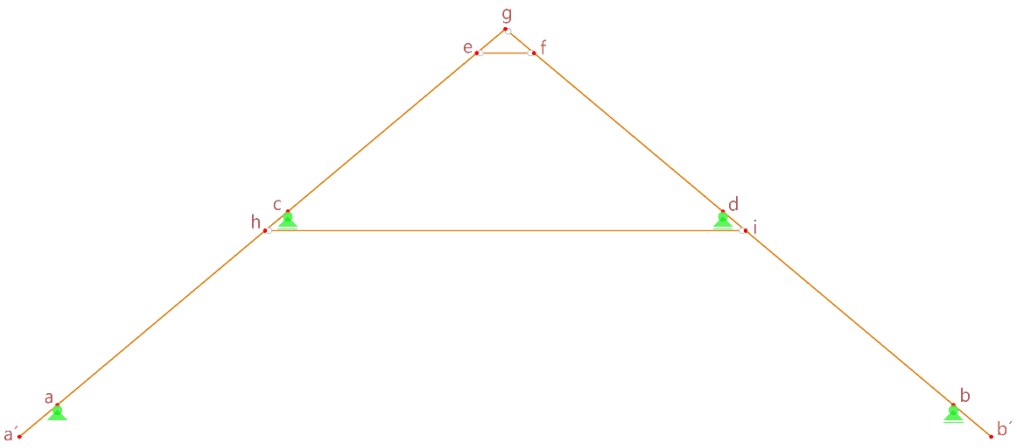
Silovou metodu používáme k výpočtu a vykreslení vnitřních sil na staticky neurčitých konstrukcích. Při řešení staticky neurčitých konstrukcí silovou metodou musíme nejdříve konstrukci převést na zjednodušenou soustavu - staticky určitou (6.1 – Stupeň statické neurčitosti).

6.1.1 ZÁKLADNÍ SOUSTAVA

Pro výpočet vnitřních sil v konstrukcích používáme základní statické podmínky rovnováhy, které lze použít pouze na staticky určité konstrukce. Protože je řešená konstrukce staticky neurčitá a bude řešena silovou metodou, bude nutné spočítat stupeň statické neurčitosti. Ten nám vyjadřuje, kolik vazeb je nutné odebrat a tedy kolik podmínek je nutné k základním statickým podmínkám rovnováhy přidat, aby bylo možné vypočítat všechny vnitřní síly a reakce na konstrukci[6].

Mnou řešený krov je složen ze 2 prutů představujících krokve, které jsou ve svém spoji, tedy vrcholu, kloubově připojeny. Dále ze dvou vodorovných táhel, které představují dřevěné kleštiny. Tato táhla, kleštiny, jsou ke krokvím připojena kloubově.

Řešené konstrukce (obr. 6.1) je v místech pozednic a vaznic podepřena. Ručním výpočtem je soustava řešena s podporami, kde u levé pozednice se jedná o pevnou kloubovou podporu zamezující posunu horizontálnímu i vertikálnímu, pootočení je v této podpoře dovoleno. Zbylé podpory jsou řešeny jako posuvné kloubové podpory, které zamezují posunu ve vertikálním směru, ale posun v horizontálním směru a pootočení je dovoleno[6].



Obr. 6.1 Řešená konstrukce s označením uzlů

Stupeň statické neurčitosti určím dle vzorce[6]:

$$n_s = 3u - p_k + (a - 3) = 3 \cdot 2 - 5 \cdot 1 + (5 - 3) = 3\ x\ SN$$

kde:

n_s – stupeň statické neurčitosti

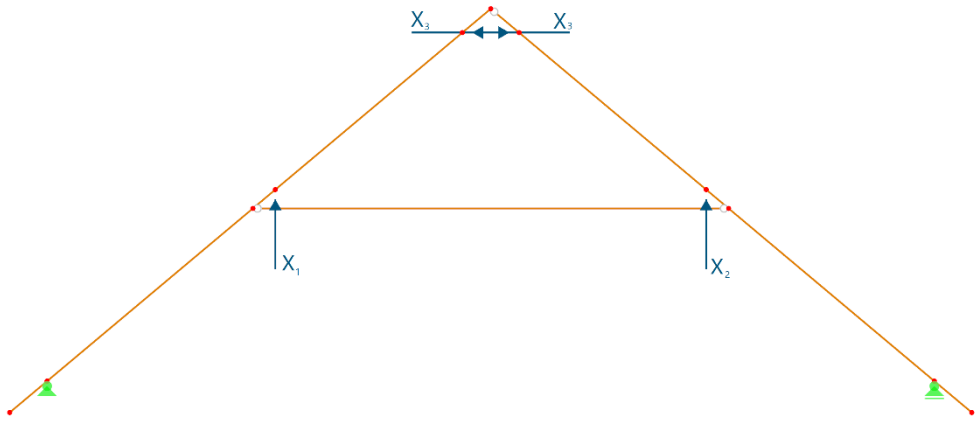
u – počet uzavřených příhrad

p_k – počet jednonásobných kloubů

a – počet vnějších vazeb

Jelikož je konstrukce 3x staticky neurčitá nelze ji počítat základními podmínkami rovnováhy. Proto se snažíme o zjednodušení konstrukce, abychom získali soustavu staticky určitou. Stupeň statické neurčitosti nám říká, kolik vazeb je nutné z konstrukce odebrat, aby byla staticky určitá.

Základní soustavu jsem vytvořil odebráním dvou vazeb v místě podepření vaznicemi a přerušením táhla představujícího horní kleštinu. Tyto odebrané vazby však musím nahradit silami. Základní soustava (obr. 6.2) je pak zatížena původním zatížením a neznámými silami X_i.



Obr. 6.2 Základní soustava

Pro kontrolu základní soustavy, na soustavě opět vypočítáme stupeň statické neurčitosti:

$$n_s = 3u - p_k + (a - 3) = 3 \cdot 1 - 3 \cdot 1 + (3 - 3) = 0\ x\ SN$$

Základní soustava vyšla 0x staticky neurčitá, jedná se tedy o konstrukci staticky určitou, kterou lze řešit statickými podmínkami rovnováhy.

6.1.2 ŘEŠENÍ

Pro výpočet neznámých sil X_i silovou metodou nejdříve vypočtu a vykreslím průběhy vnitřních sil na základní soustavě od zatížení vlastní tíhou a dále od samostatných silových zatížení ve směru sil X_i. Bude se jednat o jednotkové zatížení $\bar{X}_i$. Tato zatížení budou rozdělena do 4 zatěžovacích stavů:

0. Zatěžovací stav – zatížení vlastní tíhou
1. Zatěžovací stav – zatížení od jednotkové síly $\bar{X}_1$
2. Zatěžovací stav – zatížení od jednotkové síly $\bar{X}_2$
3. Zatěžovací stav – zatížení od dvojice jednotkových sil $\bar{X}_3$

Pro určení hodnot neznámých sil X_i se použijí deformační podmínky v místě působení těchto sil. Tyto podmínky nahrazují odebrané vazby[6].

U výpočtů vnitřních sil v kleštinách jsou použita označení N_{xi}, V_{xi} a M_{xi}, kde index i označuje označení řešené kleštiny. Pro hlavní kleštiny je index označen 2 a pro vedlejší kleštiny je index označen 3.

Pro výpočet vnitřních sil konstrukce budou použity síly působící v lokálních souřadnicích k řešeným prvkům. Pro řešení posouvajících sil je lokální hodnota značena pomocí „´" (například $V_x´$) a lokální normálové síly jsou označeny pomocí „´´" (například $N_x´´$). Tyto hodnoty budou vypočítány pomocí goniometrických funkcí z globálních hodnot.

6.1.2.1 0. ZATĚŽOVACÍ STAV

V 0. zatěžovacím stavu se vyřeší vnitřní síly na zjednodušené konstrukci od uvažovaného zatížení, v tomto případě vlastní tíha konstrukce.

ZATÍŽENÍ PRO 0.ZS

Tab. 6.1 Výpočet charakteristického zatížení od 0.ZS

	Tl. [m]	Obj. tíha [kN/m^3]	ZŠ [m]	Zatížení [kN/m]
Krokev 100/140	0,140	4,20	0,100	0,0588
Kleštiny hlavní 2x80/160	0,160	4,20	2x0,080	0,1075
Kleštiny vedlejší 50/160	0,140	4,20	0,050	0,0294

Vypočtené zatížení v tab. 6.1 je charakteristická hodnota zatížení, tedy reálné zatížení konstrukce. Pro statický výpočet konstrukce ale použiji návrhovou hodnotu zatížení, ve kterém se počítá například s odchylkami rozměrů prvků a nebo přidaného zatížení. Pro výpočet návrhového zatížení vlastní tíhou charakteristické zatížení vynásobím dílčím součinitelem zatížení. Pro stálá zatížení se použije dílčí součinitel zatížení γ_G, který má hodnotu $1{,}35$[5].

Zatížení krokve:

$$g_{d1} = g_1 \cdot \gamma_G = 0{,}0588 \cdot 1{,}35 = 0{,}079\ \mathrm{kN/m}$$

$$g_{d1}{}' = cos\,\alpha \cdot g_{d1} = cos\,40° \cdot 0{,}079 = 0{,}0605\ \text{kN/m}$$

$$g_{d1}{}'' = sin\,\alpha \cdot g_{d1} = sin\,40° \cdot 0{,}079 = 0{,}0508\ \text{kN/m}$$

Zatížení od hlavních kleštin:

$$g_{d2} = g_2 \cdot \gamma_G = 0{,}1075 \cdot 1{,}35 = 0{,}145\ \text{kN/m}$$

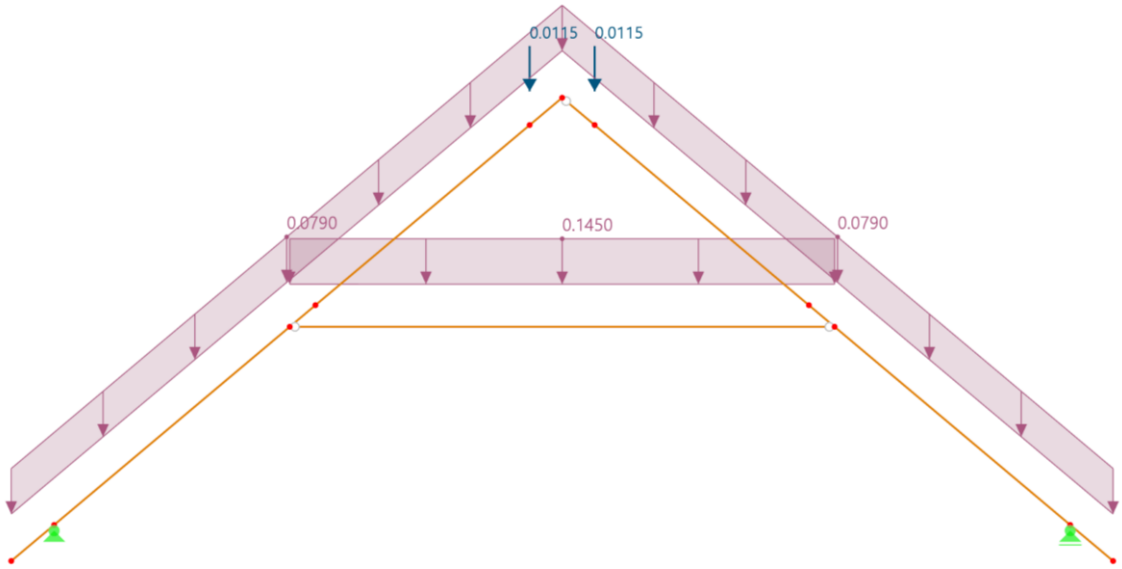
Zatížení od vedlejších kleštin:

$$g_{d3} = g_3 \cdot \gamma_G = 0{,}0294 \cdot 1{,}35 = 0{,}040\ \text{kN/m}$$

Ve výpočtu tíhu od vedlejší kleštin na zjednodušené soustavě nahradím bodovým zatížením G_{d3} ve spoji s krokvemi, které představuje hodnotu zatížení přenášenou v daném spoji od zatížení vedlejší kleštinou. Hodnota v jednotlivém spoji bude rovna polovině tíhy kleštiny.

$$G_{d3} = \frac{1}{2} \cdot g_{d3} \cdot l_3 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}040 \cdot 0{,}581 = 0{,}0115\ \text{kN}$$

SCHÉMA ZATÍŽENÍ 0.ZS



Obr. 6.3 Zatížení pro 0.ZS – vlastní tíha [kN/m; kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0\ \text{kN}$$

$$R_{ax} = \mathbf{0\ kN}$$

$$M_a^L = -g_{d1} \cdot 0{,}5 \cdot \frac{0{,}383}{2} = -0{,}079 \cdot 0{,}5 \cdot \frac{0{,}383}{2} = -0{,}0076 \text{ kNm}$$

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

$$-M_a^L - g_{d1} \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} - g_{d2} \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 - G_{d3} \cdot \left(4{,}542 - \frac{0{,}581}{2}\right) -$$
$$-G_{d3}\left(4{,}542 + \frac{0{,}581}{2}\right) - g_{d1} \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$0{,}0076 - 0{,}079 \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} - 0{,}145 \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 - 0{,}0115 \cdot \left(4{,}542 -$$
$$-\frac{0{,}581}{2}\right) - 0{,}0115\left(4{,}542 + \frac{0{,}581}{2}\right) - 0{,}079 \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) + R_{bz} \cdot 2 \cdot$$
$$\cdot 4{,}542 = 0$$

$$-7{,}9261 + R_{bz} \cdot 9{,}084 = 0$$
$$R_{bz} = \frac{7{,}9261}{9{,}084} = \mathbf{0{,}8725\ kN}$$

$$R_{bz}' = \cos\alpha \cdot R_{bz} = \cos 40° \cdot 0{,}8725 = 0{,}668 \text{ kN}$$
$$R_{bz}'' = \sin\alpha \cdot R_{bz} = \sin 40° \cdot 0{,}8725 = 0{,}561 \text{ kN}$$

$$\sum M_b = 0 \text{ kNm}$$

$$M_b^P + g_{d1} \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} + g_{d2} \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 + G_{d3} \cdot \left(4{,}542 - \frac{0{,}581}{2}\right) +$$
$$+G_{d3}\left(4{,}542 + \frac{0{,}581}{2}\right) + g_{d1} \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) - R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-0{,}0076 + 0{,}079 \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} + 0{,}145 \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 + 0{,}0115 \cdot \left(4{,}542 -$$
$$-\frac{0{,}581}{2}\right) + 0{,}0115\left(4{,}542 + \frac{0{,}581}{2}\right) + 0{,}079 \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) - R_{az} \cdot 2 \cdot$$
$$\cdot 4{,}542 = 0$$

$$7{,}9261 - R_{az} \cdot 9{,}084 = 0$$
$$R_{az} = \frac{7{,}9261}{9{,}084} = \mathbf{0{,}8725\ kN}$$

$$R_{az}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot 0{,}8725 = 0{,}668 \text{ kN}$$
$$R_{az}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot 0{,}8725 = 0{,}561 \text{ kN}$$

$$\sum F_x = 0\ kN$$

$$2 \cdot g_{d1} \cdot 6{,}429 + 2 \cdot G_{d3} + g_{d2} \cdot 4{,}871 - R_{az} - R_{bz} = 0$$
$$2 \cdot 0{,}079 \cdot 6{,}429 + 2 \cdot 0{,}0115 + 0{,}145 \cdot 4{,}871 - 0{,}8725 - 0{,}8725 = 0$$
$$0 = 0 \text{ [kN]}$$

VNITŘNÍ SÍLY OD 1.ZS

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

$$\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$$

$$R_{az} \cdot 4{,}542 - V_{x2} \cdot \frac{4{,}871}{2} - N_{x2} \cdot 2{,}044 - V_{x3} \cdot \frac{0{,}581}{2} - g_{d1} \cdot 6{,}429 \cdot \frac{9{,}85}{4} = 0$$

$$0{,}872 \cdot 4{,}542 - 0{,}353 \cdot \frac{4{,}871}{2} - N_{x2} \cdot 2{,}044 - 0{,}0116 \cdot \frac{0{,}581}{2} - 0{,}079 \cdot 6{,}429 \cdot \frac{9{,}85}{4} = 0$$

$$N_{x2} \cdot 2{,}044 = 1{,}8491$$

$$N_{x2} = \frac{1{,}8491}{2{,}044} = 0{,}905 \text{ kN}$$

$$N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot 0{,}905 = 0{,}582 \text{ kN}$$

$$N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot 0{,}905 = 0{,}693 \text{ kN}$$

  - Posouvající síly

$$V_{x2} = \frac{1}{2} \cdot g_{d2} \cdot l_2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}145 \cdot 4{,}871 = 0{,}353 \text{ kN}$$

$$V_{x2}' = \cos\alpha \cdot V_{x2} = \cos 40° \cdot 0{,}353 = 0{,}270 \text{ kN}$$

$$V_{x2}'' = \sin\alpha \cdot V_{x2} = \sin 40° \cdot 0{,}353 = 0{,}227 \text{ kN}$$

  - Momenty

$$M_{x2} = \frac{1}{8} \cdot g_{d2} \cdot {l_2}^2 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}145 \cdot 4{,}871^2 = 0{,}430 \text{ kNm}$$

- Krokve
  - Normálové síly

$$N_a^L = g_{d1}'' \cdot 0{,}5 = 0{,}0508 \cdot 0{,}5 = 0{,}025 \text{ kN}$$

$$N_a^P = N_a^L - R_{az}'' = 0{,}025 - 0{,}561 = -0{,}536 \text{ kN}$$

$$N_h^L = N_a^P + g_{d1}'' \cdot 2{,}75 = -0{,}536 + 0{,}0508 \cdot 2{,}75 = -0{,}396 \text{ kN}$$

$$N_h^P = N_h^L + V_{x2}'' - N_{x2}'' = -0{,}396 + 0{,}227 - 0{,}693 = -0{,}862 \text{ kN}$$

$$N_c^L = N_h^P + g_{d1}'' \cdot 0{,}3 = -0{,}862 + 0{,}0508 \cdot 0{,}3 = -0{,}847 \text{ kN}$$

$$N_c^P = N_c^L = -0{,}847 \text{ kN}$$

$$N_e^L = N_c^P + g_{d1}'' \cdot 2{,}5 = -0{,}847 + 0{,}0508 \cdot 2{,}5 = -0{,}720 \text{ kN}$$

$$N_e^P = N_e^L + V_{x3}'' = -0{,}720 + 0{,}007 = -0{,}713 \text{ kN}$$

$$N_g^L = N_e^P + g_{d1}'' \cdot 0{,}379 = -0{,}713 + 0{,}0508 \cdot 0{,}379 = -0{,}694 \text{ kN}$$

- Posouvající síly

$V_a^L = -g_{d1}{}' \cdot 0{,}5 = -0{,}0605 \cdot 0{,}5 = -0{,}030 \text{ kN}$

$V_a^P = V_a^L + R_{az}{}' = -0{,}030 + 0{,}668 = 0{,}638 \text{ kN}$

$V_h^L = V_a^P - g_{d1}{}' \cdot 2{,}75 = 0{,}638 - 0{,}0605 \cdot 2{,}75 = 0{,}472 \text{ kN}$

$V_h^P = V_h^L - V_{x2}{}' - N_{x2}{}' = 0{,}472 - 0{,}270 - 0{,}582 = -0{,}380 \text{ kN}$

$V_c^L = V_h^P - g_1{}' \cdot 0{,}30 = -0{,}380 - 0{,}0605 \cdot 0{,}30 = -0{,}398 \text{ kN}$

$V_c^P = V_c^L = -0{,}398\ kN$

$V_e^L = V_c^P - g_{d1}{}' \cdot 2{,}5 = -0{,}398 - 0{,}0605 \cdot 2{,}5 = -0{,}549 \text{ kN}$

$V_e^P = V_c^L - V_{x3}{}' = -0{,}549 - 0{,}009 = -0{,}558 \text{ kN}$

$V_g^L = V_e^P - g_{d1}{}' \cdot 0{,}379 = -0{,}558 - 0{,}0605 \cdot 0{,}379 = -0{,}581 \text{ kN}$

- Momenty

$M_a^L = -g_{d1}{}' \cdot \frac{0{,}5^2}{2} = -0{,}0605 \cdot \frac{0{,}5^2}{2} = -0{,}0076 \text{ kNm}$

$M_h^L = R_{az}{}' \cdot 2{,}75 - g_{d1}{}' \cdot \frac{(2{,}75+0{,}5)^2}{2} = 0{,}668 \cdot 2{,}75 - 0{,}0605 \cdot \frac{3{,}25^2}{2} = 1{,}519 \text{ kNm}$

$M_c^L = R_{az}{}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - V_{x2}{}' \cdot 0{,}3 - N_{x2}{}' \cdot 0{,}3 - g_{d1}{}' \cdot \frac{(2{,}75+0{,}5+0{,}3)^2}{2}$

$M_c^L = 0{,}668 \cdot 3{,}05 - 0{,}270 \cdot 0{,}3 - 0{,}582 \cdot 0{,}3 - 0{,}0605 \cdot \frac{3{,}55^2}{2} = 1{,}401 \text{ kNm}$

$M_e^L = R_{az}{}' \cdot (3{,}05 + 2{,}5) - V_{x2}{}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) - N_{x2}{}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) - g_{d1}{}' \cdot \frac{(3{,}55+2{,}5)^2}{2}$

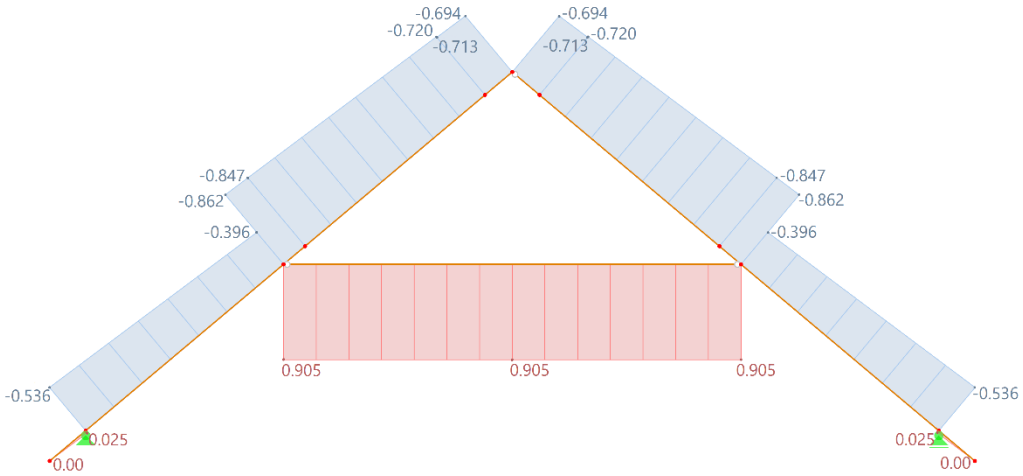
$M_e^L = 0{,}668 \cdot 5{,}55 - 0{,}270 \cdot 2{,}8 - 0{,}582 \cdot 2{,}8 - 0{,}0605 \cdot \frac{6{,}05^2}{2} = 0{,}215 \text{ kNm}$

$M_g^L = R_{az}{}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - V_{x2}{}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) - N_{x2}{}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) - V_{x3}{}' \cdot 0{,}379 - g_{d1}{}' \cdot \frac{(6{,}05+0{,}379)^2}{2}$

$M_g^L = 0{,}668 \cdot 5{,}929 - 0{,}270 \cdot 3{,}179 - 0{,}582 \cdot 3{,}179 - 0{,}009 \cdot 0{,}379 - 0{,}0605 \cdot \cdot \frac{(6{,}429)^2}{2} = 0{,}0 \text{ kNm}$

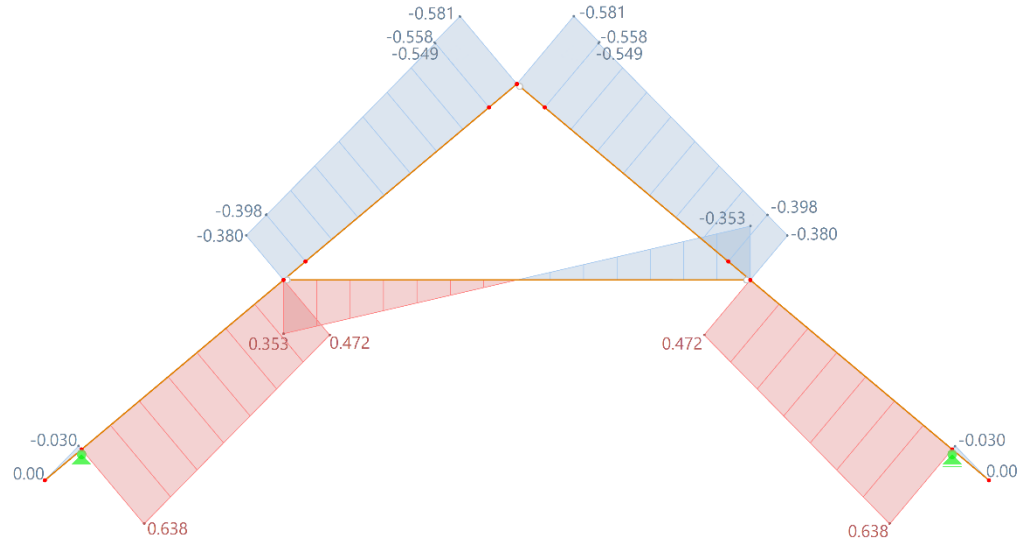
PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL OD 0.ZS

- Normálové síly



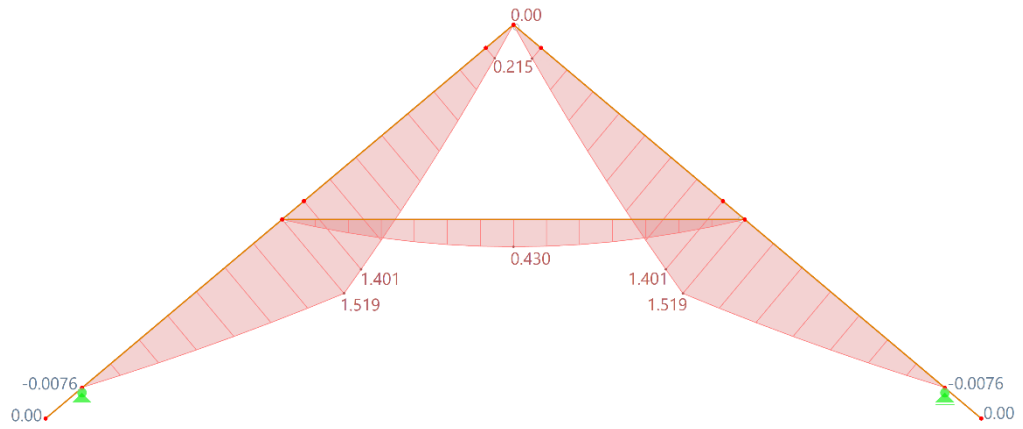
Obr. 6.4 Průběh normálových sil od 0.ZS [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.5 Průběh posouvajících sil od 0.ZS [kN]

- Momenty

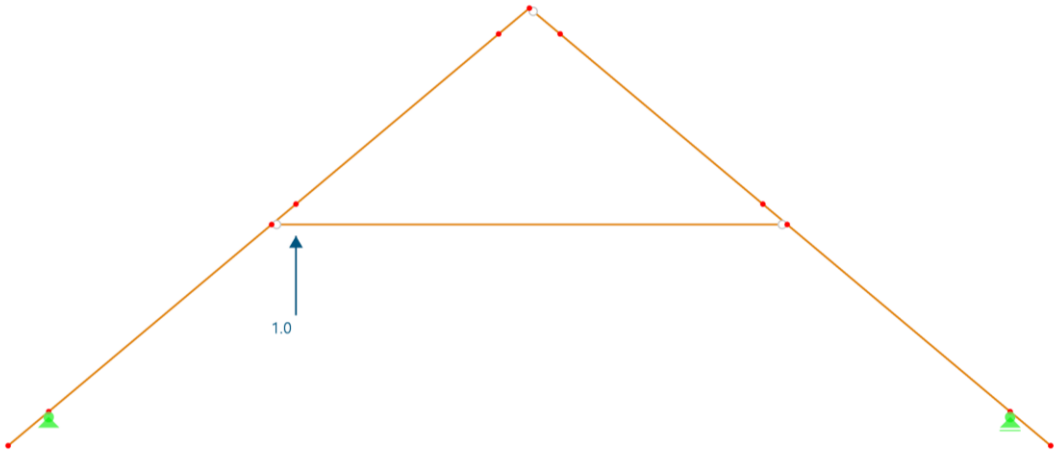


Obr. 6.6 Průběh momentů od 0.ZS [kNm]

6.1.2.2 1. ZATĚŽOVACÍ STAV

Výpočet a vykreslení vnitřních sil na základní soustavě od jednotkového zatížení $\bar{X}_1$, které je umístěno v místě levé vaznice.

SCHÉMA ZATÍŽENÍ 1.ZS



Obr. 6.7 Zatížení pro 1.ZS – jednotková síla [kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0 \text{ kN}$$

$$R_{ax} = \mathbf{0\ kN}$$

$$\sum M_a = 0$$

$$R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 + \bar{X}_1 \cdot 2{,}336 = 0$$

$$R_{bz} \cdot 9{,}084 + 1 \cdot 2{,}336 = 0$$

$$R_{bz} = -\frac{2{,}336}{9{,}084} = \mathbf{-0{,}2572\ kN}$$

$$R_{bz}' = \cos\alpha \cdot R_{bz} = \cos 40° \cdot (-0{,}2572) = -0{,}197 \text{ kN}$$

$$R_{bz}'' = \sin\alpha \cdot R_{bz} = \sin 40° \cdot (-0{,}2572) = -0{,}165 \text{ kN}$$

$$\sum M_b = 0$$

$$R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 + \bar{X}_1 \cdot (2 \cdot 2{,}206 + 2{,}336) = 0$$

$$R_{az} \cdot 9{,}084 + 1 \cdot 6{,}748 = 0$$

$$R_{az} = -\frac{6{,}748}{9{,}084} = \mathbf{-0{,}7428\ kN}$$

$$R_{az}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot (-0{,}7428) = -0{,}569 \text{ kN}$$

$$R_{az}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot (-0{,}7428) = -0{,}477 \text{ kN}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$R_{az} + \bar{X}_1 + R_{bz} = 0$$

$$-0{,}7428 + 1 - 0{,}2572 = 0$$

$$0 = 0 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

VNITŘNÍ SÍLY OD 1.ZS

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

$$\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$$

$$R_{az} \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 + \bar{X}_1 \cdot 2{,}206 = 0$$

$$-0{,}7428 \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 + 1 \cdot 2{,}206 = 0$$

$$N_{x2} \cdot 2{,}044 = -1{,}1678$$

$$N_{x2} = -\frac{1{,}1678}{2{,}044} = -0{,}572 \text{ kN}$$

$$N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot (-0{,}572) = -0{,}367 \text{ kN}$$

$$N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot (-0{,}572) = -0{,}437 \text{ kN}$$

  - Posouvající síly

$$V_{x2} = 0 \text{ kN}$$

  - Momenty

$$M_{x2} = 0 \text{ kNm}$$

- Krokve
  - Normálové síly

$$N_a^L = 0 \text{ kN}$$

$$N_a^P = -R_{az}'' = -(-0{,}477) = 0{,}477 \text{ kN}$$

$$N_h^L = N_a^P = 0{,}477 \text{ kN}$$

$$N_h^P = N_h^L - N_{x2}'' = 0{,}477 - (-0{,}437) = 0{,}914 \text{ kN}$$

$$N_c^L = N_h^P = 0{,}914 \text{ kN}$$

$$N_c^P = N_c^L - \bar{X}_1'' = 0{,}914 - 0{,}642 = 0{,}272 \text{ kN}$$

$$N_e = N_c^P = 0{,}272 \text{ kN}$$

$$N_g^L = N_e = 0{,}272 \text{ kN}$$

$N_b^P = 0\ \text{kN}$

$N_b^L = -R_{bz}'' = -(-0{,}165) = 0{,}165\ \text{kN}$

$N_i^P = N_b^L = 0{,}165\ \text{kN}$

$N_i^L = N_h^P - N_{x2}'' = 0{,}165 - (-0{,}437) = 0{,}602\ \text{kN}$

$N_d = N_i^L = 0{,}602\ \text{kN}$

$N_f = N_d = 0{,}602\ \text{kN}$

$N_g^P = N_f = 0{,}602\ \text{kN}$

- Posouvající síly

$V_a^L = 0\ \text{kN}$

$V_a^P = R_{az}' = -0{,}569\ \text{kN}$

$V_h^L = V_a^P = -0{,}569\ \text{kN}$

$V_h^P = V_h^L - N_{x2}' = -0{,}569 - (-0{,}367) = -0{,}202\ \text{kN}$

$V_c^L = V_h^P = -0{,}202\ \text{kN}$

$V_c^P = V_c^L + \bar{X}_1' = -0{,}202 + 0{,}766 = 0{,}564\ \text{kN}$

$V_e = V_c^P = 0{,}564\ \text{kN}$

$V_g^L = V_e = 0{,}564\ \text{kN}$

$V_b^P = 0\ \text{kN}$

$V_b^L = R_{bz}' = -0{,}197\ \text{kN}$

$V_i^P = V_b^L = -0{,}197\ \text{kN}$

$V_i^L = V_i^P - N_{x2}' = -0{,}197 - (-0{,}367) = 0{,}170\ \text{kN}$

$V_d = V_i^L = 0{,}170\ \text{kN}$

$V_f = V_d = 0{,}170\ \text{kN}$

$V_g^P = V_f = 0{,}170\ \text{kN}$

- Momenty

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

$$M_h^L = R_{az}' \cdot\ 2{,}75 = -0{,}569 \cdot\ 2{,}75 = -1{,}565 \text{ kNm}$$

$$M_c^L = R_{az}' \cdot\ (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}' \cdot 0{,}3 = -0{,}569 \cdot 3{,}05 - (-0{,}367) \cdot 0{,}3$$
$$M_c^L = -1{,}625 \text{ kNm}$$

$$M_e^L = R_{az}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) + X_1' \cdot\ 2{,}5$$
$$M_e^L = -0{,}569 \cdot\ 5{,}55 - (-0{,}367) \cdot 2{,}8 + 0{,}766 \cdot 2{,}5 = -0{,}215 \text{ kNm}$$

$$M_g^L = R_{az}' \cdot\ (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + \bar{X}_1' \cdot\ (2{,}5 + 0{,}379)$$
$$M_g^L = -0{,}569 \cdot\ 5{,}929 - (-0{,}367) \cdot 3{,}179 + 0{,}766 \cdot 2{,}879 = 0{,}00 \text{ kNm}$$

$$M_b^P = 0 \text{ kNm}$$

$$M_i^P = R_{bz}' \cdot\ 2{,}75 = -0{,}197 \cdot\ 2{,}75 = -0{,}542 \text{ kNm}$$

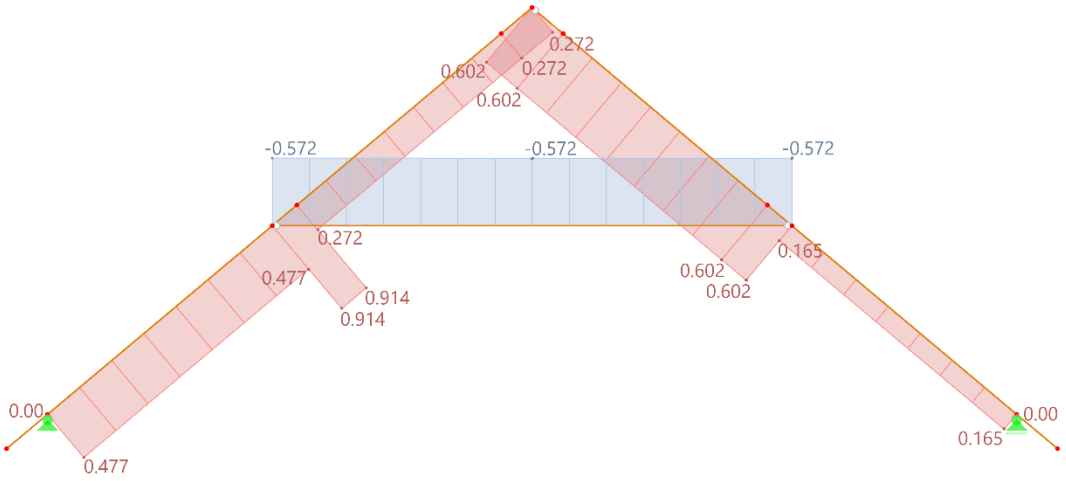
$$M_d^P = R_{bz}' \cdot\ (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}' \cdot 0{,}3 = -0{,}197 \cdot 3{,}05 - (-0{,}367) \cdot 0{,}3$$
$$M_d^P = -0{,}491 \text{ kNm}$$

$$M_f^P = R_{bz}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5)$$
$$M_f^P = -0{,}197 \cdot\ 5{,}55 - (-0{,}367) \cdot 2{,}8 = -0{,}066 \text{ kNm}$$

$$M_g^P = R_{bz}' \cdot\ (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379)$$
$$M_g^P = -0{,}197 \cdot\ 5{,}929 - (-0{,}367) \cdot 3{,}179 = 0{,}00 \text{ kNm}$$

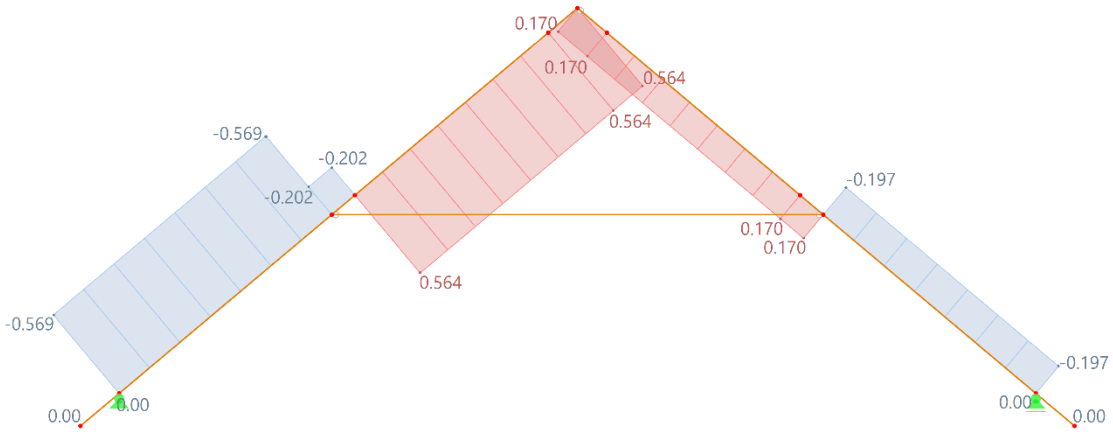
PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL OD 1.ZS

- Normálové síly



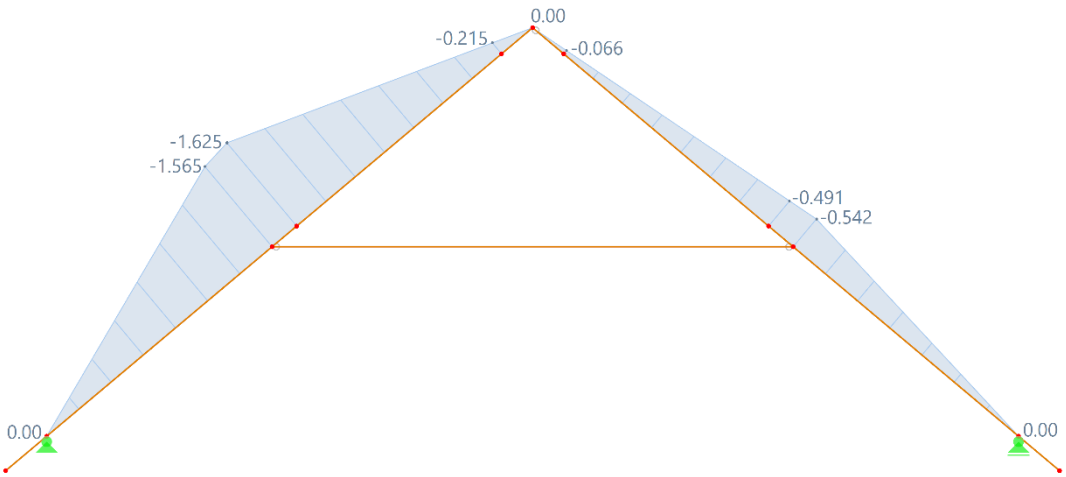
Obr. 6.8 Průběh normálových sil od 1.ZS [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.9 Průběh posouvajících sil od 1.ZS [kN]

- Momenty

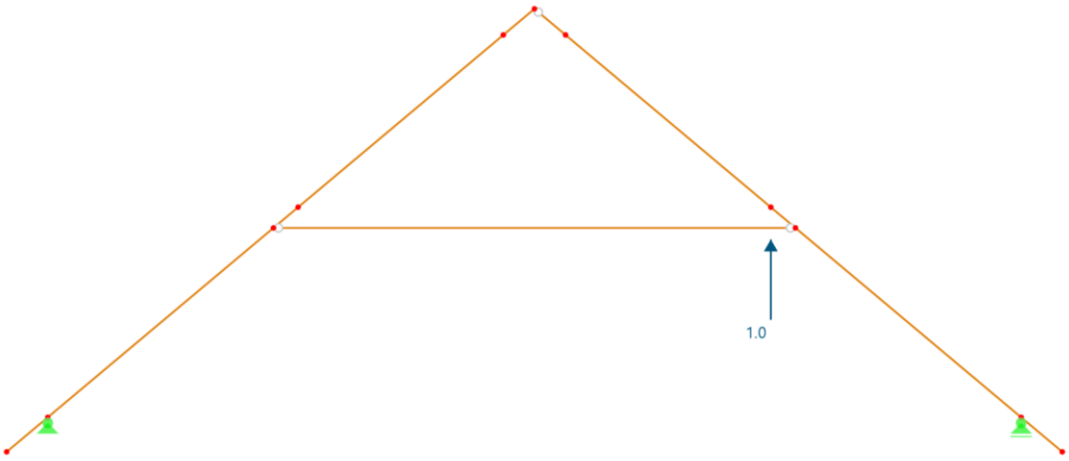


Obr. 6.10 Průběh momentů od 1.ZS [kNm]

6.1.2.3 2. ZATĚŽOVACÍ STAV

Výpočet a vykreslení vnitřních sil na základní soustavě od jednotkového zatížení $\bar{X}_2$, které působí v místě pravé vaznice.

SCHÉMA ZATÍŽENÍ 2.ZS



Obr. 6.11 Zatížení pro 2.ZS - jednotková síla [kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0 \text{ kN}$$

$$R_{ax} = 0 \text{ kN}$$

$$\sum M_a = 0$$

$$R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 + \bar{X}_2 \cdot (2 \cdot 2{,}206 + 2{,}336) = 0$$

$$R_{bz} \cdot 9{,}084 + 1 \cdot 6{,}748 = 0$$

$$R_{bz} = -\frac{6{,}748}{9{,}084} = -0{,}7428 \text{ kN}$$

$$R_{bz}' = \cos\alpha \cdot R_{bz} = \cos 40° \cdot (-0{,}7428) = -0{,}569 \text{ kN}$$

$$R_{bz}'' = \sin\alpha \cdot R_{bz} = \sin 40° \cdot (-0{,}7428) = -0{,}477 \text{ kN}$$

$$\sum M_b = 0$$

$$R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 + \bar{X}_2 \cdot 2{,}336 = 0$$

$$R_{az} \cdot 9{,}084 + 1 \cdot 2{,}336 = 0$$

$$R_{az} = -\frac{2{,}336}{9{,}084} = -0{,}2572 \text{ kN}$$

$$R_{az}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot (-0{,}2572) = -0{,}197 \text{ kN}$$

$$R_{az}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot (-0{,}2572) = -0{,}165 \text{ kN}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$R_{az} + \bar{X}_2 + R_{bz} = 0$$

$$-0{,}2572 + 1 - 0{,}7428 = 0$$

$$0 = 0 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

VNITŘNÍ SÍLY OD 2.ZS

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

$$\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$$

$$R_{az} \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

$$-0{,}2572 \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

$$N_{x2} \cdot 2{,}044 = -1{,}1682$$

$$N_{x2} = -\frac{1{,}1682}{2{,}044} = -0{,}572 \text{ kN}$$

$$N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot (-0{,}572) = -0{,}367 \text{ kN}$$

$$N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot (-0{,}572) = -0{,}437 \text{ kN}$$

  - Posouvající síly

$$V_{x2} = 0 \text{ kN}$$

  - Momenty

$$M_{x2} = 0 \text{ kNm}$$

- Krokve
  - Normálové síly

$$N_a^L = 0 \text{ kN}$$

$$N_a^P = -R_{az}'' = -(-0{,}165) = 0{,}165 \text{ kN}$$

$$N_h^L = N_a^P = 0{,}165 \text{ kN}$$

$$N_h^P = N_h^L - N_{x2}'' = 0{,}165 - (-0{,}437) = 0{,}602 \text{ kN}$$

$$N_c = N_h^P = 0{,}602 \text{ kN}$$

$$N_e = N_c = 0{,}602 \text{ kN}$$

$$N_g^L = N_e = 0{,}602 \text{ kN}$$

$N_b^P = 0 \text{ kN}$

$N_b^L = -R_{bz}'' = -(-0{,}477) = 0{,}477 \text{ kN}$

$N_i^P = N_b^L = 0{,}477 \text{ kN}$

$N_i^L = N_i^P - N_{x2}'' = 0{,}477 - (-0{,}437) = 0{,}914 \text{ kN}$

$N_d^P = N_i^L = 0{,}914 \text{ kN}$

$N_d^L = N_d^P - \bar{X}_2'' = 0{,}914 - 0{,}642 = 0{,}272 \text{ kN}$

$N_f = N_d^L = 0{,}272 \text{ kN}$

$N_g^P = N_f = 0{,}272 \text{ kN}$

- Posouvající síly

$V_a^L = 0 \text{ kN}$

$V_a^P = R_{az}' = -0{,}197 \text{ kN}$

$V_h^L = V_a^P = -0{,}197 \text{ kN}$

$V_h^P = V_h^L - N_{x2}' = -0{,}197 - (-0{,}367) = 0{,}170 \text{ kN}$

$V_c = V_h^P = 0{,}170 \text{ kN}$

$V_e = V_c = 0{,}170 \text{ kN}$

$V_g^L = V_e = 0{,}170 \text{ kN}$

$V_b^P = 0 \text{ kN}$

$V_b^L = R_{bz}' = -0{,}569 \text{ kN}$

$V_i^P = V_b^L = -0{,}569 \text{ kN}$

$V_i^L = V_i^P - N_{x2}' = -0{,}569 - (-0{,}367) = -0{,}202 \text{ kN}$

$V_d^P = V_i^L = -0{,}202 \text{ kN}$

$V_d^L = V_d^P + \bar{X}_2' = -0{,}202 + 0{,}766 = 0{,}564 \text{ kN}$

$V_f = V_d^L = 0{,}564 \text{ kN}$

$V_g^P = V_f = 0{,}564 \text{ kN}$

- Momenty

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

$M_h^L = R_{az}' \cdot 2{,}75 = -0{,}197 \cdot 2{,}75 = -0{,}542 \text{ kNm}$

$M_c^L = R_{az}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}' \cdot 0{,}3 = -0{,}197 \cdot 3{,}05 - (-0{,}367) \cdot 0{,}3$
$M_c^L = -0{,}491 \text{ kNm}$

$M_e^L = R_{az}' \cdot (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5)$
$M_e^L = -0{,}197 \cdot 5{,}55 - (-0{,}367) \cdot 2{,}8 = -0{,}066 \text{ kNm}$

$M_g^L = R_{az}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379)$
$M_g^L = -0{,}197 \cdot 5{,}929 - (-0{,}367) \cdot 3{,}179 = 0{,}00 \text{ kNm}$

$M_b^P = 0 \text{ kNm}$

$M_i^P = R_{bz}' \cdot 2{,}75 = -0{,}569 \cdot 2{,}75 = -1{,}565 \text{ kNm}$

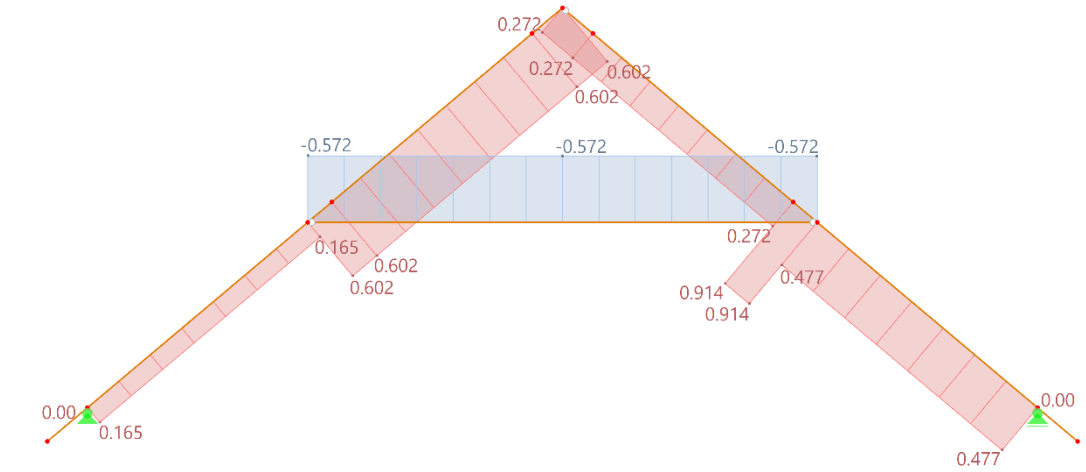
$M_d^P = R_{bz}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}' \cdot 0{,}3 = -0{,}569 \cdot 3{,}05 - (-0{,}367) \cdot 0{,}3$
$M_d^P = -1{,}625 \text{ kNm}$

$M_f^P = R_{bz}' \cdot (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) + X_2' \cdot 2{,}5$
$M_f^P = -0{,}569 \cdot 5{,}55 - (-0{,}367) \cdot 2{,}8 + 0{,}766 \cdot 2{,}5 = -0{,}215 \text{ kNm}$

$M_g^P = R_{bz}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + \bar{X}_2' \cdot (2{,}5 + 0{,}379)$
$M_g^P = -0{,}569 \cdot 5{,}929 - (-0{,}367) \cdot 3{,}179 + 0{,}766 \cdot 2{,}879 = 0{,}00 \text{ kNm}$

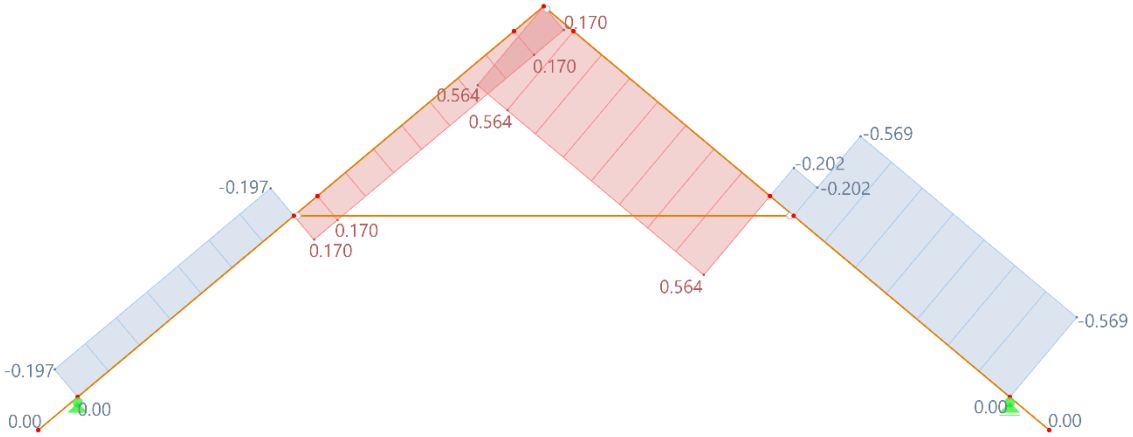
PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL OD 2.ZS

- Normálové síly



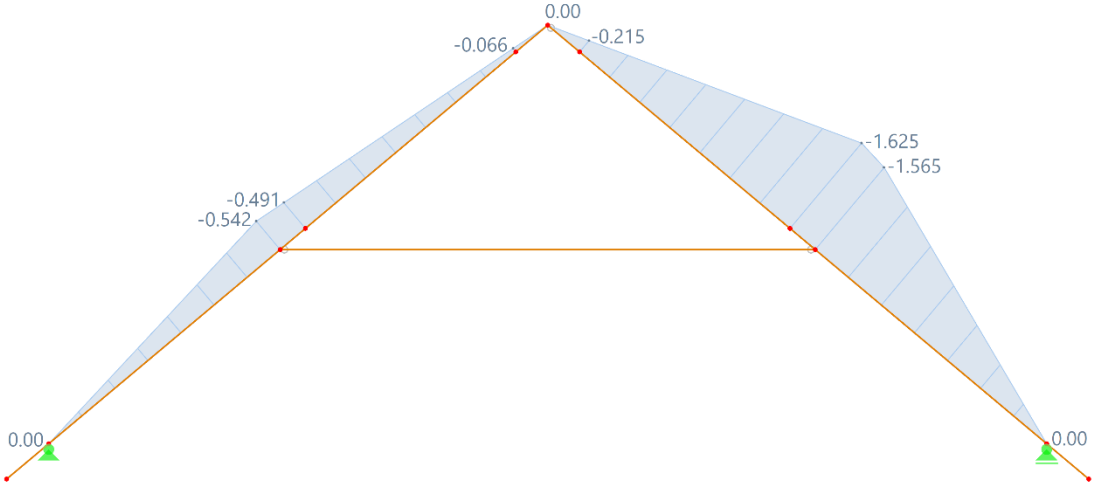
Obr. 6.12 Průběh normálových sil od 2.ZS [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.13 Průběh posouvajících sil od 2.ZS [kN]

- Momenty

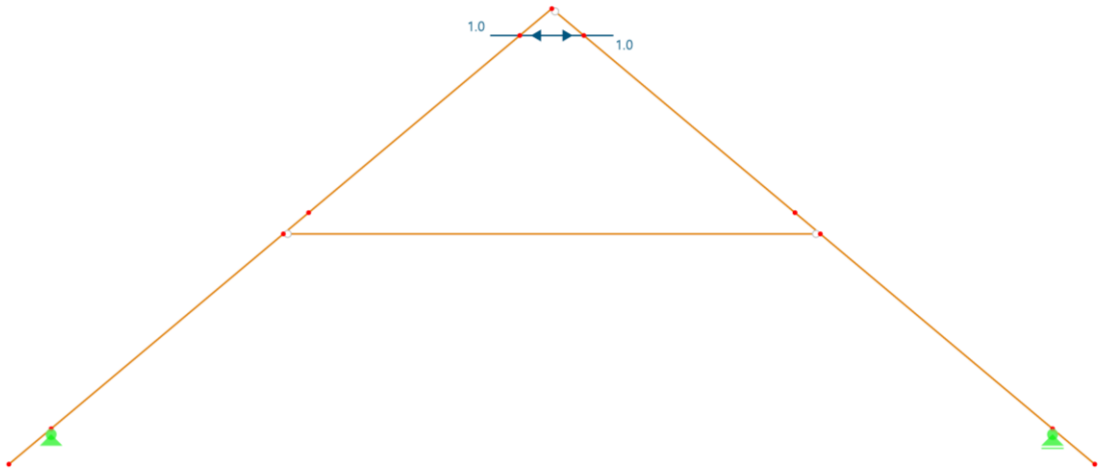


Obr. 6.14 Průběh momentů od 2.ZS [kNm]

6.1.2.4 3. ZATĚŽOVACÍ STAV

Výpočet a vykreslení vnitřních sil na ákladní soustavě od jednotkového zatížení $\bar{X}_3$. Toto zatížení působí jako dvojice sil horizontálně v místě uložení vedlejší kleštiny a je orientováno směrem ven od konstrukce.

SCHÉMA ZATÍŽENÍ 3.ZS



Obr. 6.15 Zatížení pro 3.ZS - jednotkové zatížení [kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{ax} + \mathrm{X}_3 - \mathrm{X}_3 = 0$$

$$R_{ax} = 1 - 1$$

$$R_{ax} = \mathbf{0\ kN}$$

$$\sum M_a = 0$$

$$R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) - \bar{X}_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) = 0$$

$$R_{bz} \cdot 9{,}084 + (1 - 1) \cdot 3{,}568 = 0$$

$$R_{bz} = \frac{0}{9{,}084} = \mathbf{0\ kN}$$

$$\sum M_b = 0$$

$$R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) - \bar{X}_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) = 0$$

$$R_{az} \cdot 9{,}084 + (1 - 1) \cdot 3{,}568 = 0$$

$$R_{az} = \frac{0}{9{,}084} = \mathbf{0\ kN}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$R_{az} + R_{bz} = 0$$

$$0 + 0 = 0$$

$0 = 0 \rightarrow$ Vyhovuje

VNITŘNÍ SÍLY OD 1.ZS

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

$$\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$$

$$\bar{X}_3 \cdot\ 0{,}244 - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

$$1 \cdot\ 0{,}244 - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

$$N_{x2} \cdot 2{,}044 =\ 0{,}244$$

$$N_{x2} = \frac{0{,}244}{2{,}044} = 0{,}119 \text{ kN}$$

$$N_{x2}{}' = \sin\alpha \cdot\ N_{x2} = \sin 40° \cdot 0{,}119 =\ 0{,}076 \text{ kN}$$

$$N_{x2}{}'' = \cos\alpha \cdot\ N_{x2} = \cos 40° \cdot 0{,}119 =\ 0{,}091 \text{ kN}$$

  - Posouvající síly

$$V_{x2} =\ 0 \text{ kN}$$

  - Momenty

$$M_{x2} =\ 0 \text{ kNm}$$

- Krokve
  - Normálové síly

$$N_a = 0 \text{ kN}$$

$$N_h^L = N_a = 0 \text{ kN}$$

$$N_h^P = N_h^L - N_{x2}{}'' = 0 - 0{,}091 = -0{,}091 \text{ kN}$$

$$N_c = N_h^P = -0{,}091 \text{ kN}$$

$$N_e^L = N_c = -0{,}091 \text{ kN}$$

$$N_e^P = N_e^L + \bar{X}_3{}'' = -0{,}091 + 0{,}766 = 0{,}675 \text{ kN}$$

$$N_g^L = N_e^P = 0{,}675 \text{ kN}$$

$N_b = 0\ \text{kN}$

$N_i^P = N_b = 0\ \text{kN}$

$N_i^L = N_i^P - N_{x2}'' = 0 - 0{,}091 = -0{,}091\ \text{kN}$

$N_d = N_i^L = -0{,}091\ \text{kN}$

$N_f^P = N_d = -0{,}091\ \text{kN}$

$N_f^L = N_f^P + \bar{X}_3'' = -0{,}091 + 0{,}766 = 0{,}675\ \text{kN}$

$N_g^P = N_f^L = 0{,}675\ \text{kN}$

- Posouvající síly

$V_a = 0\ \text{kN}$

$V_h^L = V_a = 0\ \text{kN}$

$V_h^P = V_h^L - N_{x2}' = 0 - 0{,}076 = -0{,}076\ \text{kN}$

$V_c = V_h^P = -0{,}076\ \text{kN}$

$V_e^L = V_c = -0{,}076\ \text{kN}$

$V_e^P = V_e^L + \bar{X}_3' = -0{,}076 + 0{,}643 = 0{,}567\ \text{kN}$

$V_g^L = V_e^P = 0{,}567\ \text{kN}$

$V_b = 0\ \text{kN}$

$V_i^P = V_b = 0\ \text{kN}$

$V_i^L = V_i^P - N_{x2}' = 0 - 0{,}076 = -0{,}076\ \text{kN}$

$V_d = V_i^L = -0{,}076\ \text{kN}$

$V_f^P = V_d = -0{,}076\ \text{kN}$

$V_f^L = V_f^P + \bar{X}_3' = -0{,}076 + 0{,}643 = 0{,}567\ \text{kN}$

$V_g^P = V_f^L = 0{,}567\ \text{kN}$

- Momenty

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

$M_h^L = 0 \text{ kNm}$

$M_c^L = -N_{x2}' \cdot 0{,}3 = -0{,}076 \cdot 0{,}3 = -0{,}023 \text{ kNm}$

$M_e^L = -N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) = -0{,}076 \cdot 2{,}8 = -0{,}213 \text{ kNm}$

$M_g^L = -N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + \bar{X}_3' \cdot \ 0{,}379 = -0{,}076 \cdot 3{,}179 + 0{,}643 \cdot 0{,}379$
$M_g^L = 0{,}00 \text{ kNm}$

$M_b^P = 0 \text{ kNm}$

$M_i^P = 0 \text{ kNm}$

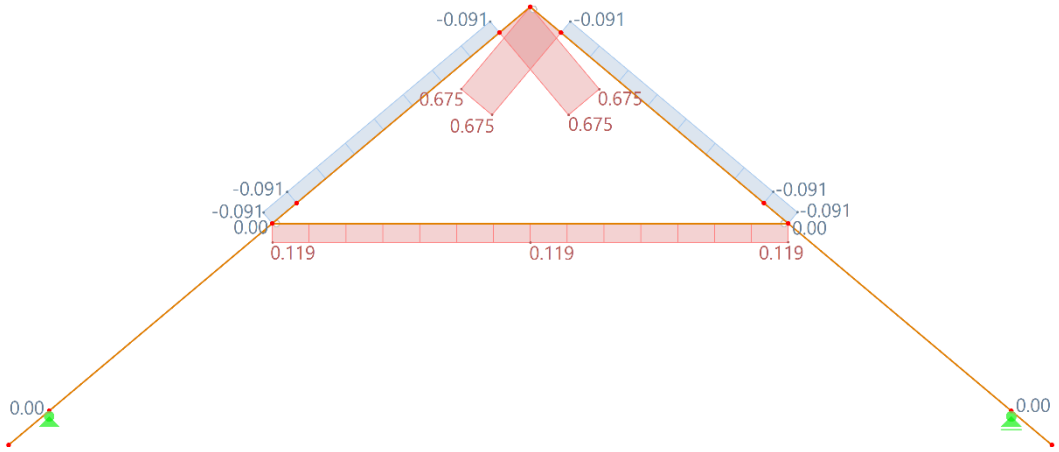
$M_d^P = -N_{x2}' \cdot 0{,}3 = -0{,}076 \cdot 0{,}3 = -0{,}023 \text{ kNm}$

$M_f^P = -N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) = -0{,}076 \cdot 2{,}8 = -0{,}213 \text{ kNm}$

$M_g^P = -N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + \bar{X}_3' \cdot \ 0{,}379 = -0{,}076 \cdot 3{,}179 + 0{,}643 \cdot 0{,}379$
$M_g^P = 0{,}00 \text{ kNm}$

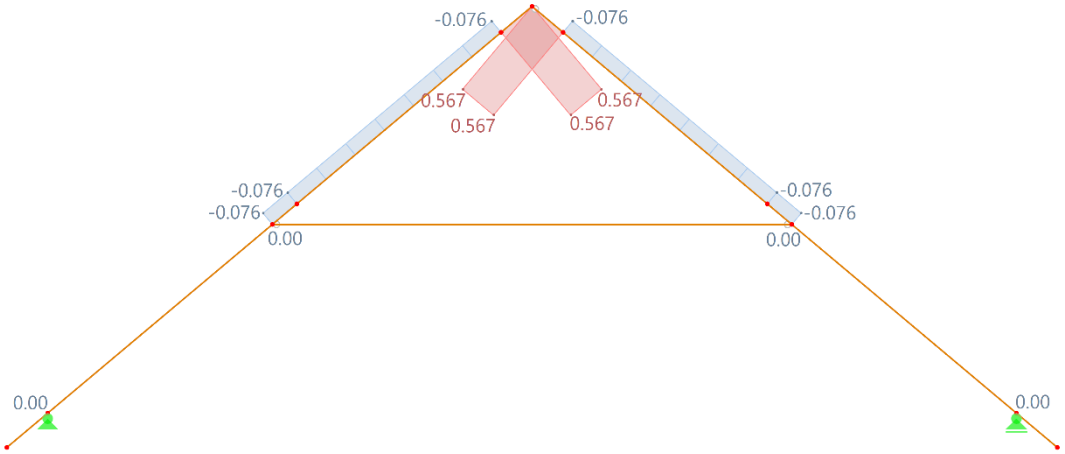
PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL OD 3.ZS

- Normálové síly



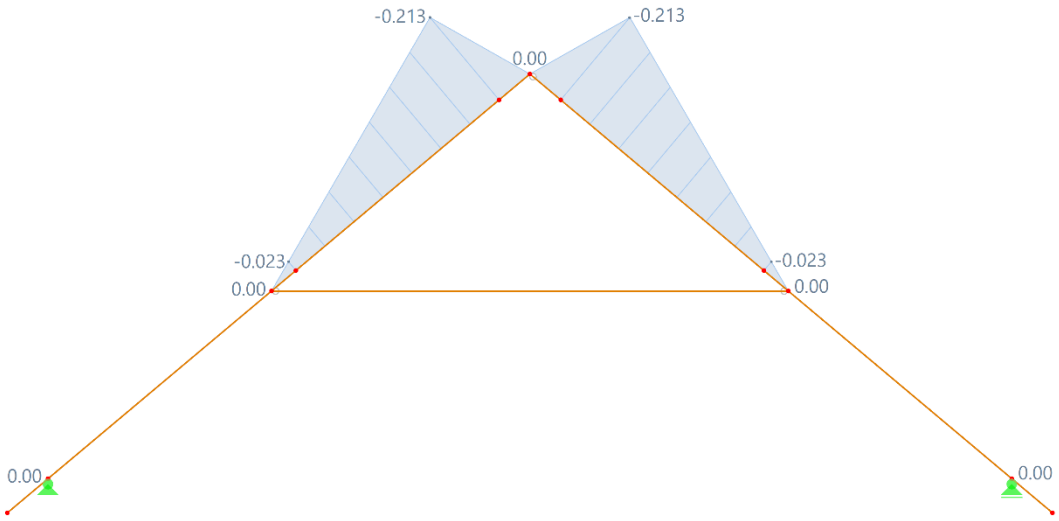
Obr. 6.16 Průběh normálových sil od 3.ZS [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.17 Průběh posouvajících sil od 3.ZS [kN]

- Momenty



Obr. 6.18 Průběh momentů od 3.ZS [kNm]

6.1.2.5 DEFORMAČNÍ SOUČINITELE OD ZATĚŽOVACÍCH STAVŮ

V této části výpočtu počítáme hodnoty deformačních součinitelů, posunů, na základní soustavě od zatížení v podobě zatěžovacích stavů v jednotlivých místech působení neznámých sil.

Výpočet těchto deformačních součinitelů se provede pomocí zjednodušeného Maxwell-Mohrova vzorce, který vypadá následovně[6]:

$$\delta_i = \int_0^S \frac{N \cdot \bar{N}}{EA} ds + \int_0^S \frac{V \cdot \bar{V}}{GA} ds + \int_0^S \frac{M \cdot \bar{M}}{EI} ds$$

kde:

E – modul pružnosti

G – modul pružnosti ve smyku

A – plocha průřezu

A_k – redukovaná smyková plocha průřezu

I – moment setrvačnosti k ose y

N, V, M – vnitřní síly od zatížení

$\bar{N}, \bar{V}, \bar{M}$ – vnitřní síly od jednotkového zatížení

Jelikož je průřezová plocha prutů řádově větší oproti momentu setrvačnosti, lze vliv normálových a posouvajících sil ve výpočtu zanedbat[6]. Ve výpočtu zbyde pouze vliv od ohybových momentů na konstrukci.

$$\delta_i = \int_0^S \frac{M \cdot \bar{M}}{EI} ds$$

Ve výsledném vzorci se nachází ve jmenovateli konstanta, která závisí na použitém materiálu, lze ji vytknout před integrál. V integrálu tedy zbyde součin dvou funkcí. V tomto případě je vhodné použití Vereščaginova pravidla, které udává, že určitý integrál těchto dvou funkcí je roven součinu plochy jednoho obrazce a hodnoty pořadnice druhého obrazce v místě těžiště toho prvního. Platí tedy, že plocha obrazce M se vynásobí s pořadnicí obrazce $\bar{M}$ v místě těžiště obrazce M.

Tuto podmínku lze použít pouze v případě, když je funkce obrazce $\bar{M}$ po celém svém průběhu maximálně lineární, monotónní a spojitá[6]. Výsledná rovnice je tedy:

$$\delta_i = \frac{1}{EI}(A_M \cdot \bar{M}_T)$$

kde:

A_M – plocha obrazce M

$\bar{M}_T$ – hodnota pořadnice $\bar{M}$ v místě těžiště obrazce M

Deformační součinitele od 0.ZS

Pro deformační součinitele od 0. zatěžovacího stavu počítáme s plochou obrazce průběhu momentů od 0. zatěžovacího stavu. Pro usnadnění výpočtu je obrazec rozdělen do ploch na trojúhelníky a paraboly. Jednotlivé plochy obrazce průběhu momentů od 0. zatěžovacího stavu jsou násobeny příslušnou pořadnicí obrazce od jednotkového zatížení.

Jednotlivé výšky trojúhelníků pro výpočet částečné plochy průběhu momentů jsou rovny velikosti momentů.

Pro výpočet plochy parabol je nutné vypočítat hodnotu výšky paraboly. Výpočet těchto hodnot závisí na spojitém, liniovém, zatížení, které v tomto místě působí. Výška paraboly v průběhu momentů od 0.ZS na krokvích se určí:

$$h_i = \frac{1}{8} \cdot g_{d1}{}' \cdot {l_i}^2$$

Kde:

l_i – délka, ke které parabolu počítám

$$h_1 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}0605 \cdot 0{,}379^2 = 0{,}001087 \text{ kNm}$$

$$h_2 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}0605 \cdot 2{,}5^2 = 0{,}047279 \text{ kNm}$$

$$h_3 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}0605 \cdot 0{,}3^2 = 0{,}000681 \text{ kNm}$$

$$h_4 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}0605 \cdot 2{,}75^2 = 0{,}057208 \text{ kNm}$$

$$h_5 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}0605 \cdot 0{,}5^2 = 0{,}001891 \text{ kNm}$$

$$\delta_{1,0} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 0{,}215 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}215) + \frac{2}{3} \cdot 0{,}001087 \cdot 0{,}379 \cdot \left(\frac{-0{,}215}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot \right.$$
$$\cdot 0{,}215 \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}215 + \frac{1}{3} \cdot (-1{,}625 + 0{,}215)\right] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}401 \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}215 + \right.$$
$$+ \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 0{,}215)\Big] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}047279 \cdot 2{,}5 \cdot \left(\frac{-1{,}625 - 0{,}215}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}401 \cdot 0{,}3 \cdot$$
$$\cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 1{,}565)\right] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}519 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{1}{3}(-1{,}625 + \right.$$
$$\left. + 1{,}565)\right] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}000681 \cdot 0{,}3 \cdot \left(\frac{-1{,}565 - 1{,}625}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}519 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}565) +$$
$$+ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}0076) \cdot 2{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-1{,}565) + \frac{2}{3} \cdot 0{,}057208 \cdot 2{,}75 \cdot \left(\frac{-1{,}565}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot 0{,}215 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}066) + \frac{2}{3} \cdot 0{,}001087 \cdot 0{,}379 \cdot \left(\frac{-0{,}066}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}215 \cdot 2{,}5 \cdot$$
$$\cdot \left[-0{,}066 + \frac{1}{3} \cdot (-0{,}491 + 0{,}066)\right] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}401 \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}066 + \frac{2}{3} \cdot (-0{,}491 + \right.$$
$$\left. + 0{,}066)\right] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}047279 \cdot 2{,}5 \cdot \left(\frac{-0{,}066 - 0{,}491}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}401 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-0{,}491 + \frac{1}{3} \cdot \right.$$
$$\cdot (-0{,}542 + 0{,}491)\Big] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}519 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-0{,}491 + \frac{2}{3}(-0{,}542 + 0{,}491)\right] + \frac{2}{3} \cdot$$
$$\cdot 0{,}000681 \cdot 0{,}3 \cdot \left(\frac{-0{,}491 - 0{,}542}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}519 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) - \frac{1}{2} \cdot 0{,}0076 \cdot$$
$$\left. \cdot 2{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}542) + \frac{2}{3} \cdot 0{,}057208 \cdot 2{,}75 \cdot \left(\frac{-0{,}542}{2}\right)\right\}$$

$$\delta_{1,0} = \frac{-6{,}938552}{EI_1} = \frac{-6{,}938552}{0{,}251533} = -27{,}585$$

$$\delta_{2,0} = \frac{1}{EI_1}\cdot\left\{\frac{1}{2}\cdot 0{,}215\cdot 0{,}379\cdot\frac{2}{3}\cdot(-0{,}066)+\frac{2}{3}\cdot 0{,}001087\cdot 0{,}379\cdot\left(\frac{-0{,}066}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot\right.$$
$$\cdot 0{,}215\cdot 2{,}5\cdot\left[-0{,}066+\frac{1}{3}\cdot(-0{,}491+0{,}066)\right]+\frac{1}{2}\cdot 1{,}401\cdot 2{,}5\cdot\left[-0{,}066+\right.$$
$$+\frac{2}{3}\cdot(-0{,}491+0{,}066)\Big]+\frac{2}{3}\cdot 0{,}047279\cdot 2{,}5\cdot\left(\frac{-0{,}066-0{,}491}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot 1{,}401\cdot 0{,}3\cdot$$
$$\cdot\left[-0{,}491+\frac{1}{3}\cdot(-0{,}542+0{,}491)\right]+\frac{1}{2}\cdot 1{,}519\cdot 0{,}3\cdot\left[-0{,}491+\frac{2}{3}(-0{,}542+\right.$$
$$+0{,}491)\Big]+\frac{2}{3}\cdot 0{,}000681\cdot 0{,}3\cdot\left(\frac{-0{,}491-0{,}542}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot 1{,}519\cdot 2{,}75\cdot\frac{2}{3}(-0{,}542)-$$
$$-\frac{1}{2}\cdot 0{,}0076\cdot 2{,}75\cdot\frac{1}{3}\cdot(-0{,}542)+\frac{2}{3}\cdot 0{,}057208\cdot 2{,}75\cdot\left(\frac{-0{,}542}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot 0{,}215\cdot$$
$$\cdot 0{,}379\cdot\frac{2}{3}\cdot(-0{,}215)+\frac{2}{3}\cdot 0{,}001087\cdot 0{,}379\cdot\left(\frac{-0{,}215}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot 0{,}215\cdot 2{,}5\cdot$$
$$\cdot\left[-0{,}215+\frac{1}{3}\cdot(-1{,}625+0{,}215)\right]+\frac{1}{2}\cdot 1{,}401\cdot 2{,}5\cdot\left[-0{,}215+\frac{2}{3}\cdot(-1{,}625+\right.$$
$$+0{,}215)\Big]+\frac{2}{3}\cdot 0{,}047279\cdot 2{,}5\cdot\left(\frac{-1{,}625-0{,}215}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot 1{,}401\cdot 0{,}3\cdot\left[-1{,}565+\frac{2}{3}\cdot\right.$$
$$\cdot(-1{,}625+1{,}565)\Big]+\frac{1}{2}\cdot 1{,}519\cdot 0{,}3\cdot\left[-1{,}565+\frac{1}{3}(-1{,}625+1{,}565)\right]+\frac{2}{3}\cdot$$
$$\cdot 0{,}000681\cdot 0{,}3\cdot\left(\frac{-1{,}565-1{,}625}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot 1{,}519\cdot 2{,}75\cdot\frac{2}{3}\cdot(-1{,}565)-\frac{1}{2}\cdot 0{,}0076\cdot$$
$$\left.\cdot 2{,}75\cdot\frac{1}{3}\cdot(-1{,}565)+\frac{2}{3}\cdot 0{,}057208\cdot 2{,}75\cdot\left(\frac{-1{,}565}{2}\right)\right\}$$

$$\delta_{2,0} = \frac{-6{,}938552}{EI_1} = \frac{-6{,}938552}{0{,}251533} = -27{,}585$$

$$\delta_{3,0} = 2\cdot\frac{1}{EI_1}\cdot\left\{\frac{1}{2}\cdot 0{,}215\cdot 0{,}379\cdot\frac{2}{3}\cdot(-0{,}213)+\frac{2}{3}\cdot 0{,}001087\cdot 0{,}379\cdot\left(\frac{-0{,}213}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot\right.$$
$$\cdot 0{,}215\cdot 2{,}5\cdot\left[-0{,}023+\frac{2}{3}(-0{,}213+0{,}023)\right]+\frac{1}{2}\cdot 1{,}401\cdot 2{,}5\cdot\left[-0{,}023+\right.$$
$$+\frac{1}{3}(-0{,}213+0{,}023)\Big]+\frac{2}{3}\cdot 0{,}047279\cdot 2{,}5\cdot\left(\frac{-0{,}023-0{,}213}{2}\right)+\frac{1}{2}\cdot 1{,}401\cdot 0{,}3\cdot\frac{2}{3}\cdot$$
$$\left.\cdot(-0{,}023)+\frac{1}{2}\cdot 1{,}519\cdot 0{,}3\cdot\frac{1}{3}\cdot(-0{,}023)+\frac{2}{3}\cdot 0{,}000681\cdot 0{,}3\cdot\left(\frac{-0{,}023}{2}\right)\right\}$$

$$\delta_{3,0} = 2\cdot\frac{-0{,}212118}{EI_1} = \frac{-0{,}424236}{EI_1} = \frac{-0{,}424236}{0{,}251533} = -1{,}684$$

Deformační součinitele od 1.ZS

$$\delta_{1,1} = \frac{1}{EI_1}\cdot\left\{\frac{1}{2}\cdot(-1{,}625)\cdot(0{,}379+2{,}5)\cdot\frac{2}{3}\cdot(-1{,}625)+\frac{1}{2}\cdot(-1{,}625)\cdot 0{,}3\cdot\right.$$
$$\cdot\left[-1{,}565+\frac{2}{3}\cdot(-1{,}625+1{,}565)\right]+\frac{1}{2}\cdot(-1{,}565)\cdot 0{,}3\cdot\left[-1{,}565+\frac{1}{3}\cdot\right.$$
$$\cdot(-1{,}625+1{,}565)\Big]+\frac{1}{2}\cdot(-1{,}565)\cdot 2{,}75\cdot\frac{2}{3}\cdot(-1{,}565)+\frac{1}{2}\cdot(-0{,}542)\cdot$$
$$\left.\cdot(0{,}379+2{,}5+0{,}3)\cdot\frac{2}{3}\cdot(-0{,}542)+\frac{1}{2}\cdot(-0{,}542)\cdot 2{,}75\cdot\frac{2}{3}\cdot(-0{,}542)\right\}$$

$$\delta_{1,1} = \frac{6{,}123116}{EI_1} = \frac{6{,}123116}{0{,}251533} = 24{,}343$$

$$\delta_{2,1} = \frac{1}{EI_1}\cdot\left\{\frac{1}{2}\cdot(-1{,}625)\cdot(0{,}379+2{,}5)\cdot\frac{2}{3}\cdot(-0{,}491)+\frac{1}{2}\cdot(-1{,}625)\cdot 0{,}3\cdot\right.$$
$$\cdot\left[-0{,}491+\frac{1}{3}\cdot(-0{,}542+0{,}491)\right]+\frac{1}{2}\cdot(-1{,}565)\cdot 0{,}3\cdot\left[-0{,}491+\frac{2}{3}\cdot\right.$$
$$\cdot(-0{,}542+0{,}491)\Big]+\frac{1}{2}\cdot(-1{,}565)\cdot 2{,}75\cdot\frac{2}{3}\cdot(-0{,}542)+\frac{1}{2}\cdot(-0{,}491)\cdot$$
$$\cdot(0{,}379+2{,}5)\cdot\frac{2}{3}\cdot(-1{,}625)+\frac{1}{2}\cdot(-0{,}491)\cdot 0{,}3\cdot\left[-1{,}565+\frac{2}{3}\cdot(-1{,}625+\right.$$
$$+1{,}565)\Big]+\frac{1}{2}\cdot(-0{,}542)\cdot 0{,}3\cdot\left[-1{,}565+\frac{1}{3}\cdot(-1{,}625+1{,}565)\right]+\frac{1}{2}\cdot$$
$$\left.\cdot(-0{,}542)\cdot 2{,}75\cdot\frac{2}{3}\cdot(-1{,}565)\right\}$$

$$\delta_{2,1} = \frac{3{,}580614}{EI_1} = \frac{3{,}580614}{0{,}251533} = 14{,}235$$

$$\delta_{3,1} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}215) \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}215) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{2}{3} \cdot \right. \right.$$
$$\left. \cdot (-0{,}213 + 0{,}023) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}625) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{1}{3} \cdot (-0{,}213 + 0{,}023) \right] +$$
$$+ \frac{1}{2} \cdot (-1{,}625) \cdot 0{,}3 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}023) + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}565) \cdot 0{,}3 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}023) + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot (-0{,}066) \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}066) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213 + \right.$$
$$\left. +0{,}023) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}491) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{1}{3} \cdot (-0{,}213 + 0{,}023) \right] + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\left. \cdot (-0{,}491) \cdot 0{,}3 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}023) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}542) \cdot 0{,}3 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}023) \right\}$$

$$\delta_{3,1} = \frac{0{,}294773}{EI_1} = \frac{0{,}294773}{0{,}251533} = 1{,}173$$

Deformační součinitele od 2.ZS

$$\delta_{1,2} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}491) \cdot (0{,}379 + 2{,}5) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}491) \cdot 0{,}3 \cdot \right.$$
$$\cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}542) \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{1}{3} \cdot \right.$$
$$\left. \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}542) \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}565) + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}625) \cdot$$
$$\cdot (0{,}379 + 2{,}5) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}491) + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}625) \cdot 0{,}3 \cdot \left[-0{,}491 + \frac{1}{3} \cdot (-0{,}542 + \right.$$
$$\left. +0{,}491) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}565) \cdot 0{,}3 \cdot \left[-0{,}491 + \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542 + 0{,}491) \right] + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\left. \cdot (-1{,}565) \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) \right\}$$

$$\delta_{1,2} = \frac{3{,}580614}{EI_1} = \frac{3{,}580614}{0{,}251533} = 14{,}235$$

$$\delta_{2,2} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (-1{,}625) \cdot (0{,}379 + 2{,}5) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625) + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}625) \cdot 0{,}3 \cdot \right.$$
$$\cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}565) \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{1}{3} \cdot \right.$$
$$\left. \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}565) \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}565) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}542) \cdot$$
$$\left. \cdot (0{,}379 + 2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}542) \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) \right\}$$

$$\delta_{2,2} = \frac{6{,}123116}{EI_1} = \frac{6{,}123116}{0{,}251533} = 24{,}343$$

$$\delta_{3,2} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}066) \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}066) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{2}{3} \cdot \right. \right.$$
$$\left. \cdot (-0{,}213 + 0{,}023) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}491) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{1}{3} \cdot (-0{,}213 + 0{,}023) \right] +$$
$$+ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}491) \cdot 0{,}3 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}023) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}542) \cdot 0{,}3 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}023) + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot (-0{,}215) \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}215) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213 + \right.$$
$$\left. + 0{,}023) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}625) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}023 + \frac{1}{3} \cdot (-0{,}213 + 0{,}023) \right] + \frac{1}{2} \cdot 0{,}3 \cdot$$
$$\left. \cdot (-1{,}625) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}023) + \frac{1}{2} \cdot (-1{,}565) \cdot 0{,}3 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}023) \right\}$$

$$\delta_{3,2} = \frac{0{,}294773}{EI_1} = \frac{0{,}294773}{0{,}251533} = 1{,}173$$

Deformační součinitele od 3.ZS

$$\delta_{1,3} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3}(-0{,}215) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}215 + \frac{1}{3} \cdot \right. \right.$$
$$\left. \cdot (-1{,}625 + 0{,}215) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}023) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}215 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 0{,}215) \right] +$$
$$+ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}023) \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3}(-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 0{,}379 \cdot$$
$$\cdot \frac{2}{3}(-0{,}066) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}066 + \frac{1}{3} \cdot (-0{,}491 + 0{,}066) \right] + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot (-0{,}023) \cdot \ 2{,}5 \ \cdot \left[-0{,}066 + \frac{2}{3} \cdot (-0{,}491 + 0{,}066) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}023) \cdot 0{,}3 \cdot$$
$$\left. \cdot \left[-0{,}491 + \frac{2}{3}(-0{,}542 + 0{,}491) \right] \right\}$$
$$\delta_{1,3} = \frac{0{,}294832}{EI_1} = \frac{0{,}294832}{0{,}251533} = 1{,}173$$

$$\delta_{2,3} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3}(-0{,}066) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}066 + \frac{1}{3} \cdot \right. \right.$$
$$\left. \cdot (-0{,}491 + 0{,}066) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}023) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}066 + \frac{2}{3} \cdot (-0{,}491 + 0{,}066) \right] +$$
$$+ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}023) \cdot 0{,}3 \left[-0{,}491 + \frac{2}{3}(-0{,}542 + 0{,}491) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 0{,}379 \cdot$$
$$\cdot \frac{2}{3}(-0{,}215) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot 2{,}5 \cdot \left[-0{,}215 + \frac{1}{3} \cdot (-1{,}625 + 0{,}215) \right] + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot (-0{,}023) \cdot \ 2{,}5 \ \cdot \left[-0{,}215 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 0{,}215) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}023) \cdot 0{,}3 \cdot$$
$$\left. \cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3}(-1{,}625 + 1{,}565) \right] \right\}$$
$$\delta_{2,3} = \frac{0{,}294832}{EI_1} = \frac{0{,}294832}{0{,}251533} = 1{,}173$$

$$\delta_{3,3} = 2 \cdot \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (-0{,}213) \cdot (0{,}3 + 2{,}5) \cdot \ \frac{2}{3} \ \cdot (-0{,}213) + \ \frac{1}{2} \ \cdot (-0{,}213) \cdot 0{,}379 \cdot \ \frac{2}{3} \ \cdot \right.$$
$$\left. \cdot (-0{,}213) \right\}$$
$$\delta_{3,3} = 2 \cdot \frac{0{,}048076}{EI_1} = \frac{0{,}096152}{0{,}251533} = 0{,}382$$

6.1.2.6 VÝPOČET NEZNÁMÝCH SIL

Řešená konstrukce krovu je 3x staticky neurčitá, proto dostáváme tři kanonické rovnice se třemi neznámými silami X_i. Tyto rovnice vyjadřují deformaci v místě odebrané vazby[6].

$$\delta_1 = 0: \quad \delta_{1,0} + \delta_{1,1} \cdot X_1 + \delta_{1,2} \cdot X_2 + \delta_{1,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_2 = 0: \quad \delta_{2,0} + \delta_{2,1} \cdot X_1 + \delta_{2,2} \cdot X_2 + \delta_{2,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_3 = 0: \quad \delta_{3,0} + \delta_{3,1} \cdot X_1 + \delta_{3,2} \cdot X_2 + \delta_{3,3} \cdot X_3 = 0$$

kde:

δ_i – skutečné deformace na konstrukci

$\delta_{i,j}$ – deformace v bodě i od působení zatěžovacího stavu j

X_i – neznámé síly

$$\delta_{1,0} + \delta_{1,1} \cdot X_1 + \delta_{1,2} \cdot X_2 + \delta_{1,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_{2,0} + \delta_{2,1} \cdot X_1 + \delta_{2,2} \cdot X_2 + \delta_{2,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_{3,0} + \delta_{3,1} \cdot X_1 + \delta_{3,2} \cdot X_2 + \delta_{3,3} \cdot X_3 = 0$$

$$-27{,}585 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot X_3 = 0$$
$$-27{,}585 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot X_3 = 0$$
$$-1{,}684 + 1{,}173 \cdot X_1 + 1{,}173 \cdot X_2 + 0{,}382 \cdot X_3 = 0$$

Tři rovnice o třech neznámých se mohou řešit například vyjádřením z jedné rovnice a dosazením do zbylých dvou. A následně opět vyjádřením z jedné rovnice a dosazením do poslední. Nejdříve vyjádřím X_3 například z poslední rovnice:

$$0{,}382 \cdot X_3 = 1{,}684 - 1{,}173 \cdot X_1 - 1{,}173 \cdot X_2$$
$$X_3 = \frac{1{,}684}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2$$

$$-27{,}585 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot \left(\frac{1{,}684}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2\right) = 0$$
$$-27{,}585 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot \left(\frac{1{,}684}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2\right) = 0$$

$$-27{,}585 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 5{,}171 - 3{,}600 \cdot X_1 - 3{,}600 \cdot X_2 = 0$$
$$-27{,}585 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 5{,}171 - 3{,}600 \cdot X_1 - 3{,}600 \cdot X_2 = 0$$

$$20{,}743 \cdot X_1 + 10{,}635 \cdot X_2 - 22{,}414 = 0$$
$$10{,}635 \cdot X_1 + 20{,}743 \cdot X_2 - 22{,}414 = 0$$

Rovnice jsem upravil a zůstaly mi dvě rovnice o dvou neznámých. V dalším kroku si například z poslední rovnice vyjádřím neznámou sílu X_1 a dosadím ji do rovnice první:

$$10{,}635 \cdot X_1 = -20{,}743 \cdot X_2 + 22{,}414$$
$$X_1 = -\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot X_2 + \frac{22{,}414}{10{,}635}$$

$$20{,}743 \cdot \left(-\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot X_2 + \frac{22{,}414}{10{,}635}\right) + 10{,}635 \cdot X_2 - 22{,}414 = 0$$
$$-40{,}458 \cdot X_2 + 43{,}717 + 10{,}635 \cdot X_2 - 22{,}414 = 0$$
$$-29{,}823 \cdot X_2 + 21{,}303 = 0$$
$$29{,}823 \cdot X_2 = 21{,}303$$
$$X_2 = \frac{21{,}303}{29{,}823} = 0{,}7143 \text{ kN}$$

Vypočtenou hodnotu X_2 dosadím do již vyjádřených rovnic pro výpočet neznámých sil X_1 a X_3.

$$X_1 = -\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot 0{,}7143 + \frac{22{,}414}{10{,}635} = 0{,}7144 \text{ kN}$$

Protože je zatížení i konstrukce symetrická, neznámé síly X_1 a X_2 by se měly rovnat. Důsledkem zaokrouhlování vyšly neznámé síly s rozdílem desetitisíciny kN. Tento rozdíl při dalších výpočtem zanedbám a hodnoty zaokrouhlím na tisíciny kN. Ve výpočtech tedy budu uvažovat:

$$X_1 = X_2 = \mathbf{0,714 \text{ kN}}$$

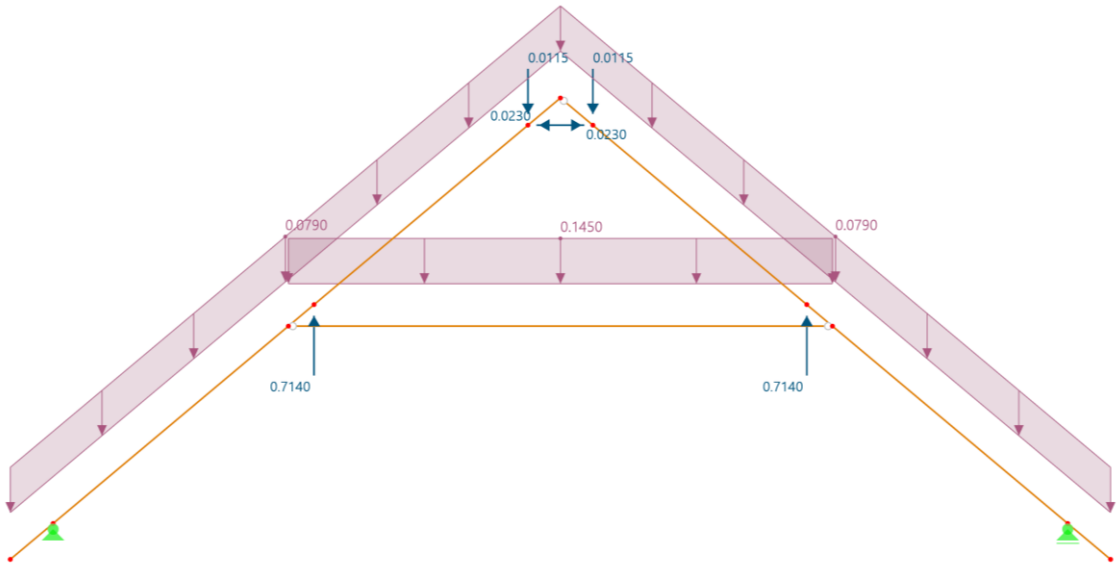
Hodnotu vypočtených sil dosadím do vyjádřené rovnice pro výpočet X_3.

$$X_3 = \frac{1{,}684}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot 0{,}714 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot 0{,}714 = \mathbf{0,023 \text{ kN}}$$

6.1.2.7 VNITŘNÍ SÍLY

Po výpočtu neznámých sil lze vypočítat vnitřní síly na konstrukci. Výpočtem vnitřních sil na základní soustavě, která je staticky určitá a zatížena zatížením a neznámými silami X_i , dostaneme výsledky pro původní staticky neurčitou konstrukci.

SCHÉMA ZATÍŽENÍ



Obr. 6.19 Zatížení pro výpočet vnitřních sil [kNm; kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0\ kN$$

$$R_{ax} + \mathrm{X}_3 - \mathrm{X}_3 = 0$$

$$R_{ax} = \mathrm{X}_3 - \mathrm{X}_3 = 0{,}023 - 0{,}023 = \mathbf{0\ kN}$$

$$M_a^L = -g_{d1} \cdot 0{,}5 \cdot \frac{0{,}383}{2} = -0{,}079 \cdot 0{,}5 \cdot \frac{0{,}383}{2} = -0{,}0076\ \mathrm{kNm}$$

$$\sum M_a = 0\ \mathrm{kNm}$$

$$-M_a^L - g_{d1} \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} - g_{d2} \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 + X_1 \cdot 2{,}336 - G_{d3} \cdot \left(4{,}542 - \right.$$
$$\left. - \frac{0{,}581}{2}\right) - G_{d3}\left(4{,}542 + \frac{0{,}581}{2}\right) + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) - X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 -$$
$$- 0{,}321) - g_{d1} \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) + X_2 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + R_{bz} \cdot 2 \cdot$$
$$\cdot 4{,}542 = 0$$

$$0{,}0076 - 0{,}079 \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} - 0{,}145 \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 + 0{,}714 \cdot 2{,}336 -$$
$$-0{,}0115 \cdot \left(4{,}542 - \frac{0{,}581}{2}\right) - 0{,}0115\left(4{,}542 + \frac{0{,}581}{2}\right) + 0 - 0{,}079 \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \right.$$
$$\left. \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) + 0{,}714 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-1{,}4401 + R_{bz} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{bz} = \frac{1{,}4401}{9{,}084} = \mathbf{0{,}1585\ kN}$$

$$R_{bz}' = \cos\alpha \cdot R_{bz} = \cos 40° \cdot 0{,}1585 = 0{,}121\ \mathrm{kN}$$

$$R_{bz}'' = \sin\alpha \cdot R_{bz} = \sin 40° \cdot 0{,}1585 = 0{,}102\ \mathrm{kN}$$

$$\sum M_b = 0\ \mathrm{kNm}$$

$$M_b^P + g_{d1} \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} + g_{d2} \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 - X_1 \cdot 2{,}336 + G_{d3} \cdot \left(4{,}542 - \right.$$
$$\left. - \frac{0{,}581}{2}\right) - X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) + G_{d3}\left(4{,}542 + \right.$$
$$\left. + \frac{0{,}581}{2}\right) + g_{d1} \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) - X_2 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) - R_{az} \cdot 2 \cdot$$
$$\cdot 4{,}542 = 0$$

$$-0{,}0076 + 0{,}079 \cdot (6{,}429 - 0{,}5) \cdot \frac{4{,}542}{2} + 0{,}145 \cdot 4{,}871 \cdot 4{,}542 - 0{,}714 \cdot 2{,}336 +$$
$$+ 0{,}0115 \cdot \left(4{,}542 - \frac{0{,}581}{2}\right) + 0 + 0{,}0115\left(4{,}542 + \frac{0{,}581}{2}\right) + 0{,}079 \cdot 6{,}429 \cdot \left(4{,}542 + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{4} \cdot 9{,}85\right) - 0{,}714 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) - R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$1{,}4401 - R_{az} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{az} = \frac{1{,}4401}{9{,}084} = \mathbf{0{,}1585\ kN}$$

$R_{az}{}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot 0{,}1585 = 0{,}121$ kN

$R_{az}{}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot 0{,}1585 = 0{,}102$ kN

$\sum F_x = 0$ kN

$2 \cdot g_{d1} \cdot 6{,}429 + 2 \cdot G_{d3} + g_{d2} \cdot 4{,}871 - X_1 - X_2 - R_{az} - R_{bz} = 0$

$2 \cdot 0{,}079 \cdot 6{,}429 + 2 \cdot 0{,}0115 + 0{,}145 \cdot 4{,}871 - 2 \cdot 0{,}714 - 0{,}1585 - 0{,}1585 = 0$

$0 = 0$ [kN]

$X_1{}' = \cos\alpha \cdot X_1 = \cos 40° \cdot 0{,}714 = 0{,}547$ kN

$X_1{}'' = \sin\alpha \cdot X_1 = \sin 40° \cdot 0{,}714 = 0{,}459$ kN

$X_2{}' = \cos\alpha \cdot X_2 = \cos 40° \cdot 0{,}714 = 0{,}547$ kN

$X_2{}'' = \sin\alpha \cdot X_2 = \sin 40° \cdot 0{,}714 = 0{,}459$ kN

VNITŘNÍ SÍLY

- Kleštiny vedlejší
  - Normálové síly

    $N_{x3} = X_3 = 0{,}023$ kN

    $N_{x3}{}' = \sin\alpha \cdot N_{x3} = \sin 40° \cdot 0{,}023 = 0{,}015$ kN

    $N_{x3}{}'' = \cos\alpha \cdot N_{x3} = \cos 40° \cdot 0{,}023 = 0{,}018$ kN

  - Posouvající síly

    $V_{x3} = G_{d3} = \frac{1}{2} \cdot g_{d3} \cdot l_3 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}040 \cdot 0{,}581 = 0{,}0115$ kN

    $V_{x3}{}' = \cos\alpha \cdot V_{x3} = \cos 40° \cdot 0{,}0115 = 0{,}009$ kN

    $V_{x3}{}'' = \sin\alpha \cdot V_{x3} = \sin 40° \cdot 0{,}0115 = 0{,}007$ kN

  - Momenty

    $M_{x3} = \frac{1}{8} \cdot g_{d3} \cdot {l_3}^2 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}040 \cdot 0{,}581^2 = 0{,}002$ kNm

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

    $\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$

    $R_{az} \cdot 4{,}542 - V_{x2} \cdot \frac{4{,}871}{2} - N_{x2} \cdot 2{,}044 + X_1 \cdot 2{,}206 - G_{d3} \cdot \frac{0{,}581}{2} + N_{x3} \cdot 0{,}244 -$
    $- g_{d1} \cdot 6{,}429 \cdot \frac{9{,}85}{4} = 0$

    $0{,}1585 \cdot 4{,}542 - 0{,}353 \cdot \frac{4{,}871}{2} - N_{x2} \cdot 2{,}044 + 0{,}714 \cdot 2{,}206 - 0{,}0115 \cdot \frac{0{,}581}{2} +$
    $+0{,}023 \cdot 0{,}244 - 0{,}079 \cdot 6{,}429 \cdot \frac{9{,}85}{4} = 0$

    $N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0{,}1868$

    $N_{x2} = \frac{0{,}1868}{2{,}044} = 0{,}091 \text{ kN}$

    $N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot 0{,}091 = 0{,}058 \text{ kN}$
    $N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot 0{,}091 = 0{,}070 \text{ kN}$

  - Posouvající síly

    $V_{x2} = \frac{1}{2} \cdot g_{d2} \cdot l_2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}145 \cdot 4{,}871 = 0{,}353 \text{ kN}$

    $V_{x2}' = \cos\alpha \cdot V_{x2} = \cos 40° \cdot 0{,}353 = 0{,}270 \text{ kN}$
    $V_{x2}'' = \sin\alpha \cdot V_{x2} = \sin 40° \cdot 0{,}353 = 0{,}227 \text{ kN}$

  - Momenty

    $M_{x2} = \frac{1}{8} \cdot g_{d2} \cdot {l_2}^2 = \frac{1}{8} \cdot 0{,}145 \cdot 4{,}871^2 = 0{,}430 \text{ kNm}$

- Krokve
  - Normálové síly

    $N_a^L = g_{d1}'' \cdot 0{,}5 = 0{,}0508 \cdot 0{,}5 = 0{,}025 \text{ kN}$
    $N_a^P = N_a^L - R_{az}'' = 0{,}025 - 0{,}102 = -0{,}077 \text{ kN}$

    $N_h^L = N_a^P + g_{d1}'' \cdot 2{,}75 = -0{,}077 + 0{,}0508 \cdot 2{,}75 = 0{,}063 \text{ kN}$
    $N_h^P = N_h^L + V_{x2}'' - N_{x2}'' = 0{,}063 + 0{,}227 - 0{,}070 = 0{,}220 \text{ kN}$

    $N_c^L = N_h^P + g_{d1}'' \cdot 0{,}3 = 0{,}220 + 0{,}0508 \cdot 0{,}3 = 0{,}235 \text{ kN}$
    $N_c^P = N_c^L - X_1'' = 0{,}235 - 0{,}459 = -0{,}224 \text{ kN}$

    $N_e^L = N_c^P + g_{d1}'' \cdot 2{,}5 = -0{,}224 + 0{,}0508 \cdot 2{,}5 = -0{,}097 \text{ kN}$
    $N_e^P = N_e^L + V_{x3}'' + N_{x3}'' = -0{,}097 + 0{,}007 + 0{,}018 = -0{,}072 \text{ kN}$

$$N_g^L = N_e^P + g_{d1}'' \cdot 0{,}379 = -0{,}072 + 0{,}0508 \cdot 0{,}379 = -0{,}053 \text{ kN}$$

- Posouvající síly

$$V_a^L = -g_{d1}' \cdot 0{,}5 = -0{,}0605 \cdot 0{,}5 = -0{,}030 \text{ kN}$$
$$V_a^P = V_a^L + R_{az}' = -0{,}030 + 0{,}121 = 0{,}091 \text{ kN}$$

$$V_h^L = V_a^P - g_{d1}' \cdot 2{,}75 = 0{,}091 - 0{,}0605 \cdot 2{,}75 = -0{,}075 \text{ kN}$$
$$V_h^P = V_h^L - V_{x2}' - N_{x2}' = -0{,}075 - 0{,}270 - 0{,}058 = -0{,}403 \text{ kN}$$

$$V_c^L = V_h^P - g_1' \cdot 0{,}30 = -0{,}403 - 0{,}0605 \cdot 0{,}30 = -0{,}421 \text{ kN}$$
$$V_c^P = V_c^L + X_1' = -0{,}421 + 0{,}547 = 0{,}126 \text{ kN}$$

$$V_e^L = V_c^P - g_{d1}' \cdot 2{,}5 = 0{,}126 - 0{,}0605 \cdot 2{,}5 = -0{,}025 \text{ kN}$$
$$V_e^P = V_c^L - V_{x3}' + N_{x3}' = -0{,}025 - 0{,}009 + 0{,}015 = -0{,}019 \text{ kN}$$

$$V_g^L = V_e^P - g_{d1}' \cdot 0{,}379 = -0{,}019 - 0{,}0605 \cdot 0{,}379 = -0{,}042 \text{ kN}$$

- Momenty

$$M_a^L = -g_{d1}' \cdot \frac{0{,}5^2}{2} = -0{,}0605 \cdot \frac{0{,}5^2}{2} = -0{,}0076 \text{ kNm}$$

$$M_h^L = R_{az}' \cdot 2{,}75 - g_{d1}' \cdot \frac{(2{,}75+0{,}5)^2}{2} = 0{,}121 \cdot 2{,}75 - 0{,}0605 \cdot \frac{3{,}25^2}{2} = 0{,}013 \text{ kNm}$$

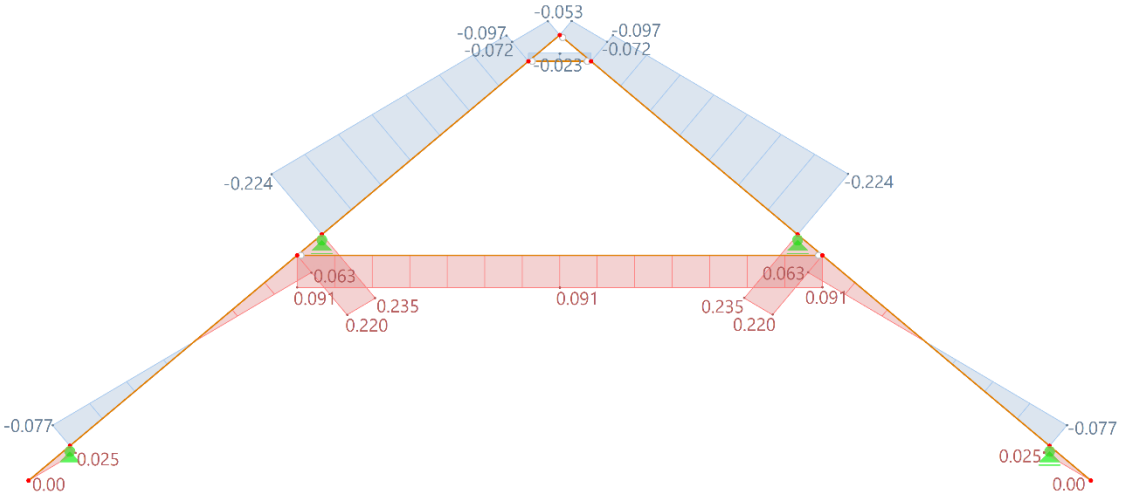
$$M_c^L = R_{az}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - V_{x2}' \cdot 0{,}3 - N_{x2}' \cdot 0{,}3 - g_{d1}' \cdot \frac{(2{,}75+0{,}5+0{,}3)^2}{2}$$
$$M_c^L = 0{,}121 \cdot 3{,}05 - 0{,}270 \cdot 0{,}3 - 0{,}058 \cdot 0{,}3 - 0{,}0605 \cdot \frac{3{,}55^2}{2} = -0{,}111 \text{ kNm}$$

$$M_e^L = R_{az}' \cdot (3{,}05 + 2{,}5) - V_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) - N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) + X_1' \cdot 2{,}5 - g_{d1}' \cdot$$
$$\cdot \frac{(3{,}55+2{,}5)^2}{2} = 0{,}121 \cdot 5{,}55 - 0{,}270 \cdot 2{,}8 - 0{,}058 \cdot 2{,}8 + 0{,}547 \cdot 2{,}5 - 0{,}0605 \cdot \frac{6{,}05^2}{2}$$
$$M_e^L = 0{,}013 \text{ kNm}$$

$$M_g^L = R_{az}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - V_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) - N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + X_1' \cdot$$
$$(2{,}5 + 0{,}379) - V_{x3}' \cdot 0{,}379 + N_{x3}' \cdot 0{,}379 - g_{d1}' \cdot \frac{(6{,}05+0{,}379)^2}{2}$$
$$M_g^L = 0{,}121 \cdot 5{,}929 - 0{,}270 \cdot 3{,}179 - 0{,}058 \cdot 3{,}179 + 0{,}547 \cdot 2{,}879 - 0{,}009 \cdot$$
$$\cdot 0{,}379 + 0{,}015 \cdot 0{,}379 - 0{,}0605 \cdot \frac{(6{,}429)^2}{2} = 0{,}0 \text{ kNm}$$

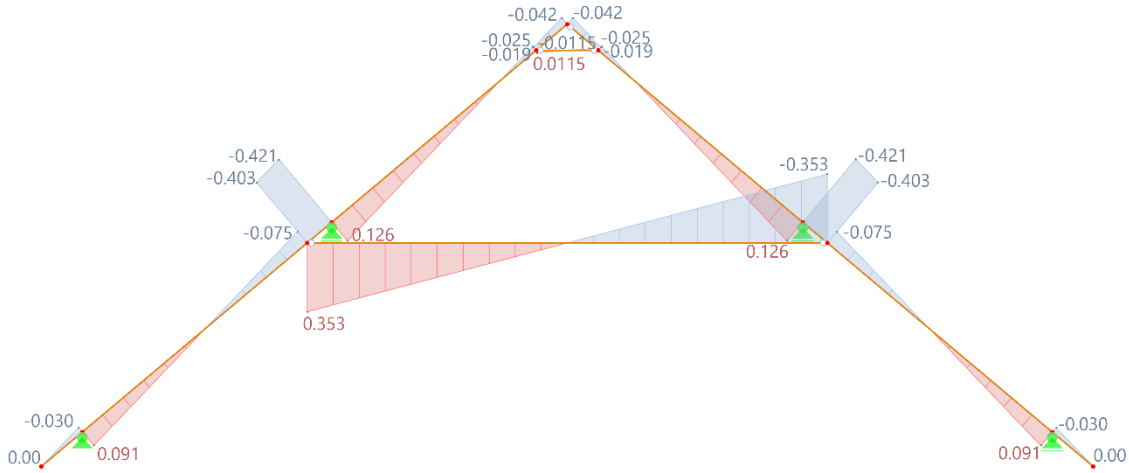
PRŮBĚHY VÝSLEDKŮ VNITŘNÍCH SIL NA KONSTRUKCI

- Normálové síly



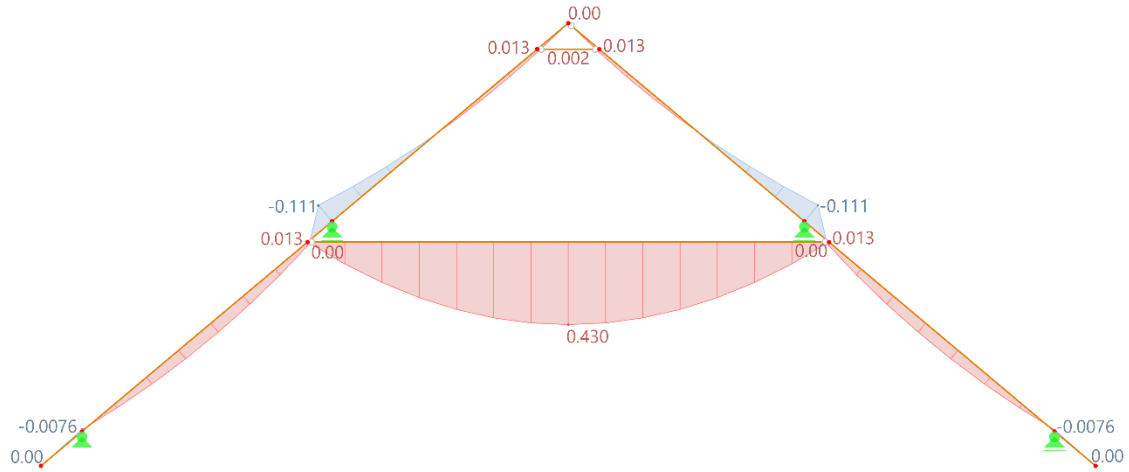
Obr. 6.20 Výsledný průběh normálových sil na konstrukci [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.21 Výsledný průběh posouvajících sil na konstrukci [kN]

- Momenty



Obr. 6.22 Výsledný průběh momentů na konstrukci [kNm]

6.2 METODA JEDNOTKOVÝCH SIL

Metoda jednotkových sil slouží k výpočtu deformace (posunu nebo pootočení) konkrétního bodu na konstrukci. V místě a ve směru, ve kterém chceme danou deformaci vyčíslit, zvolím jedinou jednotkovou sílu. Pro tuto sílu vykreslím průběhy vnitřních sil a vypočtu pomocí Maxwell-Mohrova vzorce deformaci.

V mém případě, kdy je konstrukce staticky neurčitá, je nutné pro výpočet a vykreslení průběhů vnitřních sil od jednotkového zatížení použít nejdříve silovou metodu. Pro výpočet a vykreslení vnitřních sil použiji základní soustavu konstrukce (obr. 6.2).

V místě počítaného posunu (deformace) zatížím základní soustavu jednotkovou silou a vykreslím průběhy vnitřních sil. Toto zatížení můžu považovat za 0. zatěžovací stav v silové metodě. Hodnoty průběhů vnitřních sil a deformačních součinitelů od 1.ZS, 2.ZS a 3.ZS převezmu z kap. 6.1.2.5 Deformační součinitele od zatěžovacích stavů, jelikož při použití stejné základní soustavy vyjdou totožné.

Následně dopočítám deformační součinitele od jednotkového zatěžovacího stavu a dopočítám pomocí kanonických rovnic neznámé síly X_i. Neznámé síly vyčíslím a zatížím jimi základní soustavu s jednotkovým zatížením. Na takto zatížené soustavě vypočtu a vykreslím průběh vnitřních sil.

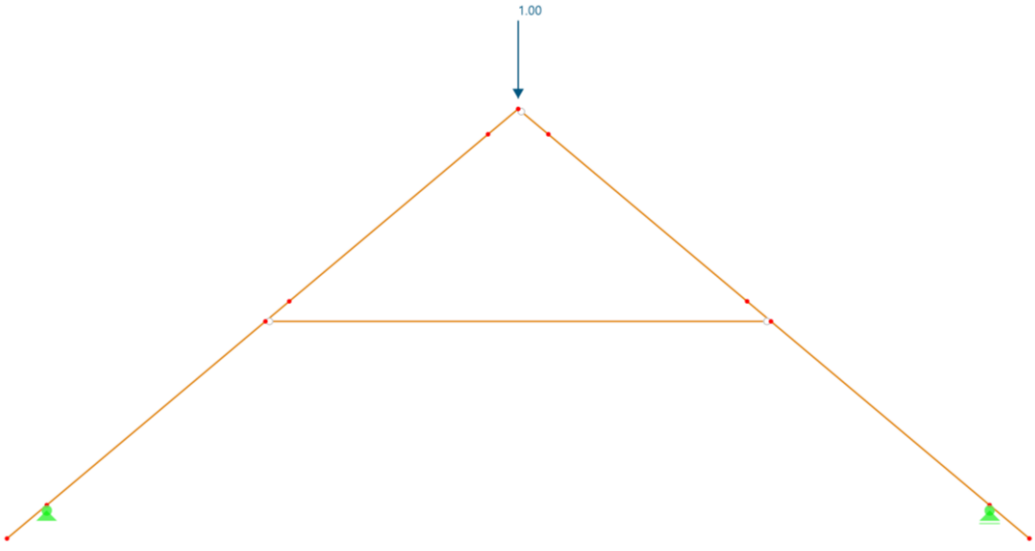
Na závěr vypočtu deformaci v řešeném místě pomocí Vereščaginova pravidla.

6.2.1 VÝPOČET SVISLÉHO POSUNU V BODĚ „g“

Pomocí metody jednotkových sil vypočítám svislý posun ve vrcholu (v bodě „g“). Zatížím tedy konstrukci jednotkovým zatížením směrem dolů a vypočtu a vykreslím průběhy vnitřních sil. Tyto výsledky musím nejdříve spočítat silovou metodou.

6.2.1.1JEDNOTKOVÉ ZATÍŽENÍ NA ZJEDNODUŠENÉ SOUSTAVĚ

SCHÉMA ZATÍŽENÍ



Obr. 6.23 Jednotkové zatížení v bodě „g“ ve směru počítaného posunu [kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0 \text{ kN}$$

$$R_{ax} = \mathbf{0\ kN}$$

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

$$-\bar{X}_g \cdot 4{,}542 + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-1 \cdot 4{,}542 + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-4{,}542 + R_{bz} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{bz} = \frac{4{,}542}{9{,}084} = \mathbf{0{,}50\ kN}$$

$$R_{bz}' = \cos\alpha \cdot R_{bz} = \cos 40° \cdot 0{,}50 = 0{,}383 \text{ kN}$$

$$R_{bz}'' = \sin\alpha \cdot R_{bz} = \sin 40° \cdot 0{,}50 = 0{,}321 \text{ kN}$$

$$\sum F_z = 0\ kN$$

$$\bar{X}_g - R_{az} - R_{bz} = 0$$

$$1 - R_{az} - 0{,}5 = 0$$

$$R_{az} = 1 - 0{,}5 = 0{,}50 \text{ kN}$$

$$R_{az}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot 0{,}50 = 0{,}383 \text{ kN}$$

$$R_{az}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot 0{,}50 = 0{,}321 \text{ kN}$$

VNITŘNÍ SÍLY NA KONSTRUKCI

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

$$\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$$

$$R_{az} \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

$$0{,}050 \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

$$N_{x2} \cdot 2{,}044 = 2{,}271$$

$$N_{x2} = \frac{2{,}271}{2{,}044} = 1{,}111 \text{ kN}$$

$$N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot 1{,}111 = 0{,}714 \text{ kN}$$

$$N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot 1{,}111 = 0{,}851 \text{ kN}$$

- Posouvající síly

  $V_{x2} = 0\ \text{kN}$

- Momenty

  $M_{x2} = 0\ \text{kNm}$

- Krokve
  - Normálové síly

    $N_a^L = 0\ \text{kN}$

    $N_a^P = -R_{az}'' = -0{,}321\ \text{kN}$

    $N_h^L = N_a^P = -0{,}321\ \text{kN}$

    $N_h^P = N_h^L - N_{x2}'' = -0{,}321 - 0{,}851 = -1{,}172\ \text{kN}$

    $N_c = N_h^P = -1{,}172\ \text{kN}$

    $N_e = N_c = -1{,}172\ \text{kN}$

    $N_g = N_e = -1{,}172\ \text{kN}$

  - Posouvající síly

    $V_a^L = 0\ \text{kN}$

    $V_a^P = R_{az}' = 0{,}383\ \text{kN}$

    $V_h^L = V_a^P = 0{,}383\ \text{kN}$

    $V_h^P = V_h^L - N_{x2}' = 0{,}383 - 0{,}714 = -0{,}331\ \text{kN}$

    $V_c = V_h^P = -0{,}331\ \text{kN}$

    $V_e = V_c = -0{,}331\ \text{kN}$

    $V_g = V_e = -0{,}331\ \text{kN}$

  - Momenty

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

    $M_h^L = R_{az}' \cdot 2{,}75 = 0{,}383 \cdot 2{,}75 = 1{,}053\ \text{kNm}$

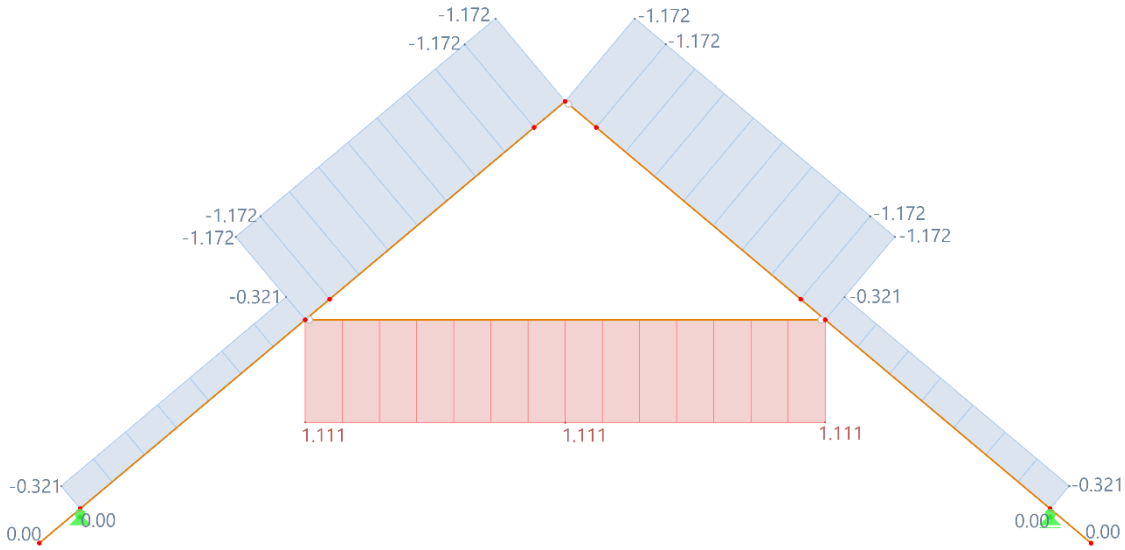
    $M_c^L = R_{az}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}' \cdot 0{,}3 = 0{,}383 \cdot 3{,}05 - 0{,}714 \cdot 0{,}3 = 0{,}954\ \text{kNm}$

$$M_e^L = R_{az}' \cdot (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5)$$
$$M_e^L = 0{,}383 \cdot 5{,}55 - 0{,}714 \cdot 2{,}8 = 0{,}126\ \text{kNm}$$

$$M_g^L = R_{az}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379)$$
$$M_g^L = 0{,}383 \cdot\ 5{,}929 - 0{,}714 \cdot 3{,}179 = 0{,}0\ \text{kNm}$$

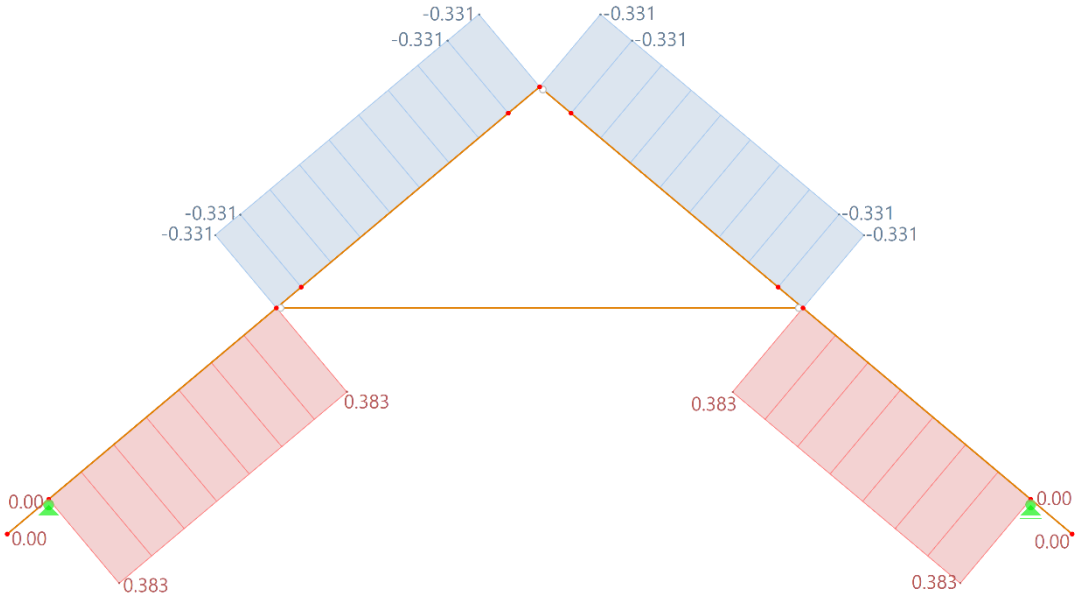
PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL NA ZÁKLADNÍ SOUSTAVĚ

- Normálové síly



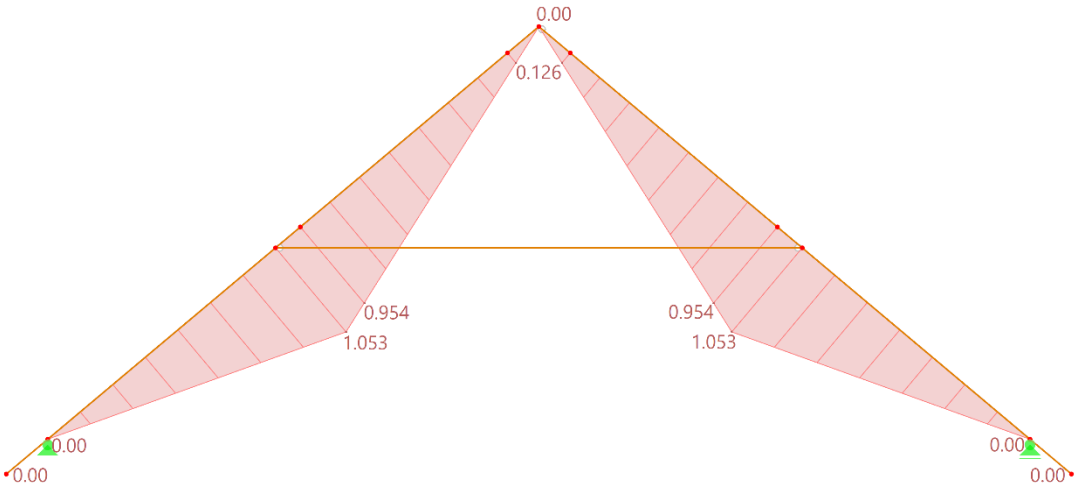
Obr. 6.24 Průběh normálových sil od jednotkového zatížení v bodě „g“ [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.25 Průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení v bodě „g“ [kN]

- Momenty



Obr. 6.26 Průběh momentů od jednotkového zatížení v bodě „g" [kNm]

6.2.1.2 DEFORMAČNÍ SOUČINITELE

Deformační součinitele od jednotkového zatížení

$$\delta_{1,0} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 0{,}954 \cdot (0{,}379 + 2{,}5) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}954 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3} \cdot \right. \right.$$
$$\left. \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{1}{3} \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot 1{,}053 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}565) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot (0{,}379 + 2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) +$$
$$\left. + \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) \right\}$$

$$\delta_{1,0} = \frac{-4{,}606311}{EI_1} = \frac{-4{,}606311}{0{,}251533} = -18{,}313$$

$$\delta_{2,0} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot (0{,}379 + 2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot \right.$$
$$\cdot (-0{,}542) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}954 \cdot (0{,}379 + 2{,}5) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}954 \cdot 0{,}3 \cdot$$
$$\cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{1}{3} \cdot (-1{,}625 + \right.$$
$$\left. \left. + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}565) \right\}$$

$$\delta_{2,0} = \frac{-4{,}606311}{EI_1} = \frac{-4{,}606311}{0{,}251533} = -18{,}313$$

$$\delta_{3,0} = 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 0{,}126 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}126 \cdot (2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{2} \cdot 1{,}053 \cdot (2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}213) \right\}$$

$$\delta_{3,0} = 2 \cdot \frac{-0{,}133108}{EI_1} = \frac{-0{,}266215}{EI_1} = \frac{-0{,}079483}{0{,}251533} = -1{,}058$$

Deformační součinitele od 1.ZS

Výpočet viz kapitola 6.1.2.5 Deformační součinitele od zatěžovacích stavů.

$\delta_{1,1} = 24{,}343$

$\delta_{2,1} = 14{,}235$

$\delta_{3,1} = 1{,}173$

Deformační součinitele od 2.ZS

Výpočet viz kapitola 6.1.2.5 Deformační součinitele od zatěžovacích stavů.

$\delta_{1,2} = 14{,}235$

$\delta_{2,2} = 24{,}343$

$\delta_{3,2} = 1{,}173$

Deformační součinitele od 3.ZS

Výpočet viz kapitola 6.1.2.5 Deformační součinitele od zatěžovacích stavů.

$\delta_{1,3} = 1{,}173$

$\delta_{2,3} = 1{,}173$

$\delta_{3,3} = 0{,}382$

6.2.1.3 VÝPOČET NEZNÁMÝCH SIL

Postup výpočtu je totožný s výpočtem v kap. 6.1.2.6 Výpočet neznámých sil.

$$\delta_1 = 0: \quad \delta_{1,0} + \delta_{1,1} \cdot X_1 + \delta_{1,2} \cdot X_2 + \delta_{1,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_2 = 0: \quad \delta_{2,0} + \delta_{2,1} \cdot X_1 + \delta_{2,2} \cdot X_2 + \delta_{2,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_3 = 0: \quad \delta_{3,0} + \delta_{3,1} \cdot X_1 + \delta_{3,2} \cdot X_2 + \delta_{3,3} \cdot X_3 = 0$$

$$\delta_{1,0} + \delta_{1,1} \cdot X_1 + \delta_{1,2} \cdot X_2 + \delta_{1,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_{2,0} + \delta_{2,1} \cdot X_1 + \delta_{2,2} \cdot X_2 + \delta_{2,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_{3,0} + \delta_{3,1} \cdot X_1 + \delta_{3,2} \cdot X_2 + \delta_{3,3} \cdot X_3 = 0$$

$$-18{,}313 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot X_3 = 0$$
$$-18{,}313 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot X_3 = 0$$
$$-1{,}058 + 1{,}173 \cdot X_1 + 1{,}173 \cdot X_2 + 0{,}382 \cdot X_3 = 0$$

$$0{,}382 \cdot X_3 = 1{,}058 - 1{,}173 \cdot X_1 - 1{,}173 \cdot X_2$$
$$X_3 = \frac{1{,}058}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2$$

$$-18{,}313 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot \left(\frac{1{,}058}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2\right) = 0$$
$$-18{,}313 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot \left(\frac{1{,}058}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2\right) = 0$$

$$-18{,}313 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 3{,}249 - 3{,}600 \cdot X_1 - 3{,}600 \cdot X_2 = 0$$
$$-18{,}313 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 3{,}249 - 3{,}600 \cdot X_1 - 3{,}600 \cdot X_2 = 0$$
$$20{,}743 \cdot X_1 + 10{,}635 \cdot X_2 - 15{,}064 = 0$$
$$10{,}635 \cdot X_1 + 20{,}743 \cdot X_2 - 15{,}064 = 0$$

Vyjádření neznámé X_1 a dosazení do první rovnice:

$$10{,}635 \cdot X_1 = -20{,}743 \cdot X_2 + 15{,}064$$
$$X_1 = -\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot X_2 + \frac{15{,}064}{10{,}635}$$

$$20{,}743 \cdot \left(-\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot X_2 + \frac{15{,}064}{10{,}635}\right) + 10{,}635 \cdot X_2 - 15{,}064 = 0$$
$$-40{,}458 \cdot X_2 + 29{,}382 + 10{,}635 \cdot X_2 - 15{,}064 = 0$$
$$-29{,}823 \cdot X_2 + 14{,}318 = 0$$
$$29{,}823 \cdot X_2 = 14{,}318$$
$$X_2 = \frac{14{,}318}{29{,}823} = \mathbf{0{,}480\ kN}$$

Vypočtenou hodnotu X_2 dosadím do již vyjádřených rovnic pro výpočet neznámých sil X_1 a X_3.

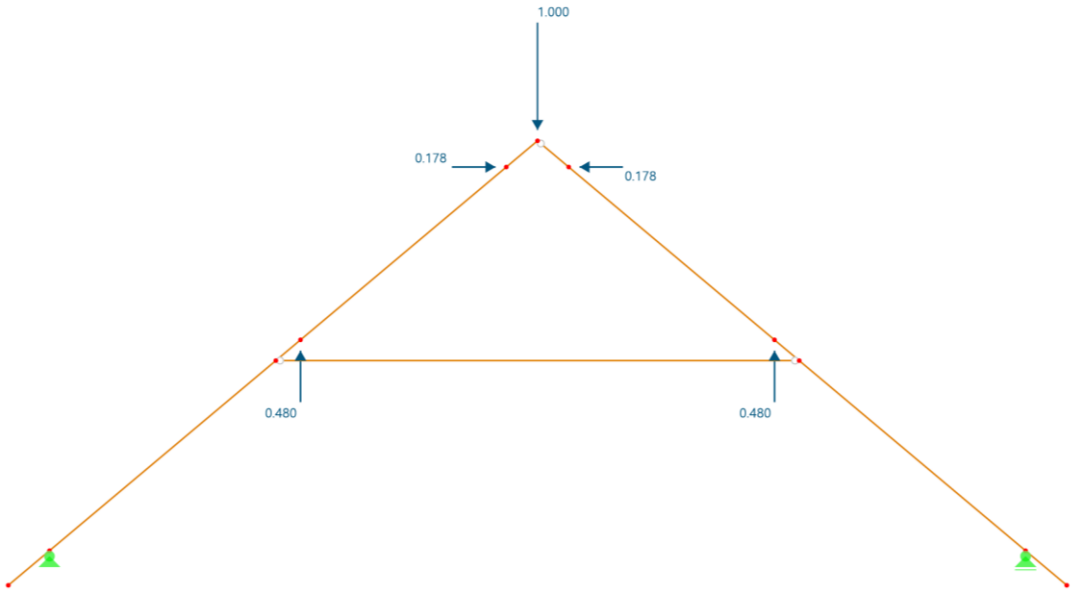
$$X_1 = -\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot 0{,}484 + \frac{15{,}064}{10{,}635} = \mathbf{0{,}480\ kN}$$

Hodnotu vypočtených sil dosadím do vyjádřené rovnice pro výpočet X_3.

$$X_3 = \frac{1{,}058}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot 0{,}480 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot 0{,}480 = \mathbf{-0{,}178\ kN}$$

6.2.1.4 VÝPOČET VNITŘNÍCH SIL

SCHÉMA ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE



Obr. 6.27 Zatížení pro výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení [kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0\ kN$$

$$R_{ax} + \mathrm{X}_3 - \mathrm{X}_3 = 0$$

$$R_{ax} = \mathrm{X}_3 - \mathrm{X}_3 = -0{,}178 - (-0{,}178) = \mathbf{0\ kN}$$

$$\sum M_a = 0\ \ kNm$$

$$X_1 \cdot 2{,}336 + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) - X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - \ 0{,}321) - \bar{X}_g \cdot 4{,}542 + X_2 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$0{,}480 \cdot 2{,}336 + 0 + 0{,}480 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) - 1 \cdot 4{,}542 + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-0{,}182 + \ R_{bz} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{bz} = \frac{0{,}182}{9{,}084} = \mathbf{0{,}020\ kN}$$

$$R_{bz}{}' = \cos\alpha \cdot \ R_{bz} = \cos 40° \cdot 0{,}020 = \ 0{,}015\ \mathrm{kN}$$

$$R_{bz}{}'' = \sin\alpha \cdot \ R_{bz} = \sin 40° \cdot 0{,}020 = \ 0{,}013\ \mathrm{kN}$$

$$\sum M_b = 0 \text{ kNm}$$

$$-X_1 \cdot 2{,}336 - X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) - X_2 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + \bar{X}_g \cdot 4{,}542 - R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-0{,}480 \cdot 2{,}336 + 0 + 1 \cdot 4{,}542 - 0{,}480 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) - R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$0{,}182 - R_{az} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{az} = \frac{0{,}182}{9{,}084} = \mathbf{0{,}020\ kN}$$

$$R_{az}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot 0{,}020 = 0{,}015 \text{ kN}$$

$$R_{az}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot 0{,}020 = 0{,}013 \text{ kN}$$

$$\sum F_z = 0 \text{ kN}$$

$$\bar{X}_g - X_1 - X_2 - R_{az} - R_{bz} = 0$$

$$1 - 0{,}480 - 0{,}480 - 0{,}020 - 0{,}020 = 0$$

$$0 = 0 \text{ [kN]}$$

$$X_1' = \cos\alpha \cdot X_1 = \cos 40° \cdot 0{,}480 = 0{,}368 \text{ kN}$$

$$X_1'' = \sin\alpha \cdot X_1 = \sin 40° \cdot 0{,}480 = 0{,}309 \text{ kN}$$

$$X_2' = \cos\alpha \cdot X_2 = \cos 40° \cdot 0{,}480 = 0{,}368 \text{ kN}$$

$$X_2'' = \sin\alpha \cdot X_2 = \sin 40° \cdot 0{,}480 = 0{,}309 \text{ kN}$$

VNITŘNÍ SÍLY NA KONSTRUKCI

- Kleštiny vedlejší
  - Normálové síly

    $N_{x3} = -X_3 = -(-0{,}178) = 0{,}178 \text{ kN}$

    $N_{x3}' = \sin\alpha \cdot N_{x3} = \sin 40° \cdot 0{,}178 = 0{,}114 \text{ kN}$

    $N_{x3}'' = \cos\alpha \cdot N_{x3} = \cos 40° \cdot 0{,}178 = 0{,}136 \text{ kN}$

  - Posouvající síly

    $V_{x3} = 0 \text{ kN}$

  - Momenty

    $M_{x3} = 0 \text{ kNm}$

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

    $\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$

    $R_{az} \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 + X_1 \cdot 2{,}206 - N_{x3} \cdot 0{,}244 = 0$

    $0{,}020 \cdot 4{,}542 - N_{x2} \cdot 2{,}044 + 0{,}480 \cdot 2{,}206 - 0{,}178 \cdot 0{,}244 = 0$

    $N_{x2} \cdot 2{,}044 = 1{,}1063$

    $N_{x2} = \frac{1{,}1063}{2{,}044} = 0{,}541 \text{ kN}$

    $N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot 0{,}541 = 0{,}348 \text{ kN}$

    $N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot 0{,}541 = 0{,}414 \text{ kN}$

  - Posouvající síly

    $V_{x2} = 0 \text{ kN}$

  - Momenty

    $M_{x2} = 0 \text{ kNm}$

- Krokve
  - Normálové síly

    $N_a^L = 0 \text{ kN}$

    $N_a^P = -R_{az}'' = -0{,}013 = -0{,}013 \text{ kN}$

    $N_h^L = N_a^P = -0{,}013 \text{ kN}$

    $N_h^P = N_h^L - N_{x2}'' = -0{,}013 - 0{,}414 = -0{,}427 \text{ kN}$

    $N_c^L = N_h^P = -0{,}427 \text{ kN}$

    $N_c^P = N_c^L - X_1'' = -0{,}427 - 0{,}309 = -0{,}736 \text{ kN}$

    $N_e^L = N_c^P = -0{,}736 \text{ kN}$

    $N_e^P = N_e^L - N_{x3}'' = -0{,}736 - 0{,}136 = -0{,}872 \text{ kN}$

    $N_g^L = N_e^P = -0{,}872 \text{ kN}$

  - Posouvající síly

    $V_a^L = 0 \text{ kN}$

    $V_a^P = V_a^L + R_{az}' = 0 + 0{,}015 = 0{,}015 \text{ kN}$

$V_h^L = V_a^P = 0{,}015$ kN

$V_h^P = V_h^L - N_{x2}' = 0{,}015 - 0{,}348 = -0{,}333$ kN

$V_c^L = V_h^P = -0{,}333$ kN

$V_c^P = V_c^L + X_1' = -0{,}333 + 0{,}368 = 0{,}035$ kN

$V_e^L = V_c^P = 0{,}035$ kN

$V_e^P = V_c^L - N_{x3}' = 0{,}035 - 0{,}114 = -0{,}079$ kN

$V_g^L = V_e^P = -0{,}079$ kN

- Momenty

$M_a^L = 0$ kNm

$M_h^L = R_{az}' \cdot 2{,}75 = 0{,}015 \cdot 2{,}75 = 0{,}041$ kNm

$M_c^L = R_{az}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}' \cdot 0{,}3 = 0{,}015 \cdot 3{,}05 - 0{,}348 \cdot 0{,}3 = -0{,}059$ kNm

$M_e^L = R_{az}' \cdot (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) + X_1' \cdot 2{,}5$

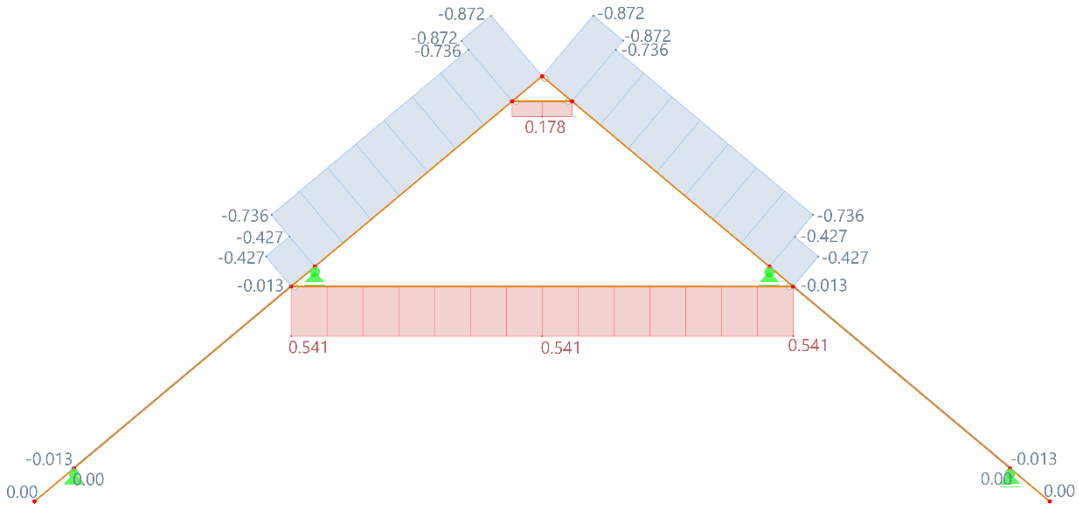
$M_e^L = 0{,}015 \cdot 5{,}55 - 0{,}348 \cdot 2{,}8 + 0{,}368 \cdot 2{,}5 = 0{,}029$ kNm

$M_g^L = R_{az}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + X_1' \cdot (2{,}5 + 0{,}379) - N_{x3}' \cdot$
$\cdot 0{,}379$

$M_g^L = 0{,}015 \cdot 5{,}929 - 0{,}348 \cdot 3{,}179 + 0{,}368 \cdot 2{,}879 - 0{,}114 \cdot 0{,}379 = 0{,}0$ kNm

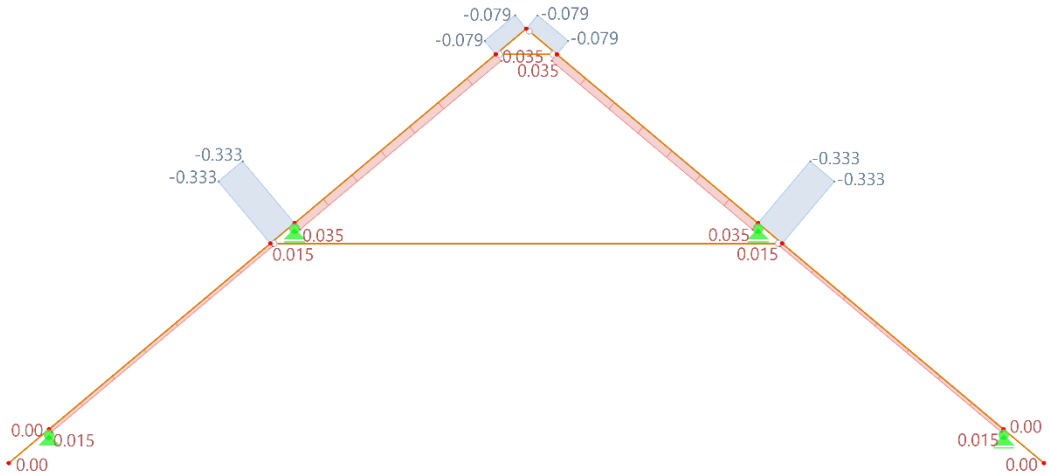
6.2.1.5 PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL NA KONSTRUKCI

- Normálové síly



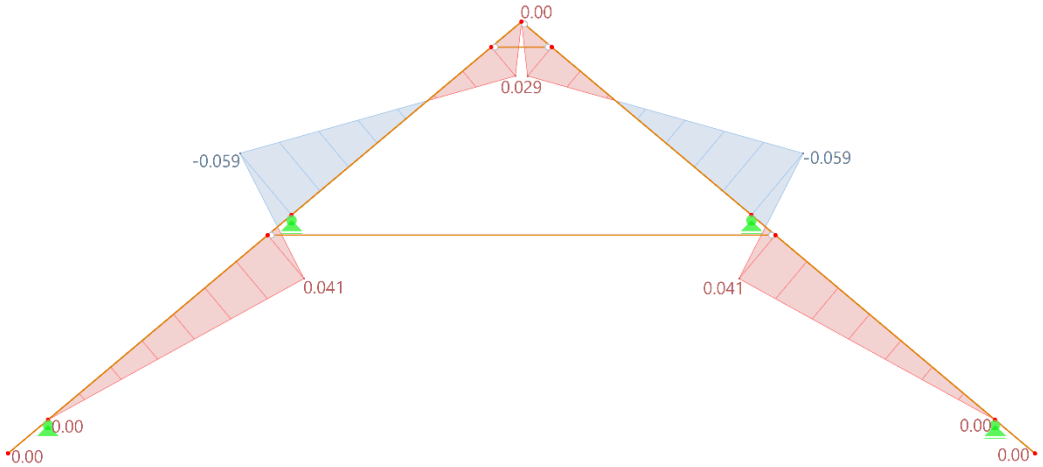
Obr. 6.28 Výsledný průběh normálových sil od jednotkového zatížení [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.29 Výsledný průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení [kN]

- Momenty



Obr. 6.30 Výsledný průběh momentů od jednotkového zatížení [kNm]

6.2.1.6 VÝPOČET SVISLÉ DEFORMACE V BODĚ „g“:

$$\delta_g = 2 \cdot \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0{,}029 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}001087 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{0{,}029}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot \right.$$
$$\cdot 2{,}5 \cdot \left[0{,}029 - \frac{1}{3}(0{,}029 + 0{,}059) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}111) \cdot 2{,}5 \cdot \left[0{,}029 - \frac{2}{3}(0{,}029 + \right.$$
$$\left. + 0{,}059) \right] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}047279 \cdot 2{,}5 \cdot \left(\frac{0{,}029 - 0{,}059}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}111) \cdot 0{,}3 \cdot \left[0{,}041 - \right.$$
$$\left. - \frac{2}{3}(0{,}041 + 0{,}059) \right] + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 0{,}3 \cdot \left[0{,}041 - \frac{1}{3}(0{,}041 + 0{,}059) \right] + \frac{2}{3} \cdot$$
$$\cdot 0{,}000681 \cdot 0{,}3 \cdot \left(\frac{-0{,}059 + 0{,}041}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0{,}041 + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}0076) \cdot$$
$$\left. \cdot 2{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0{,}041 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}057208 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{0{,}041}{2} \right\}$$

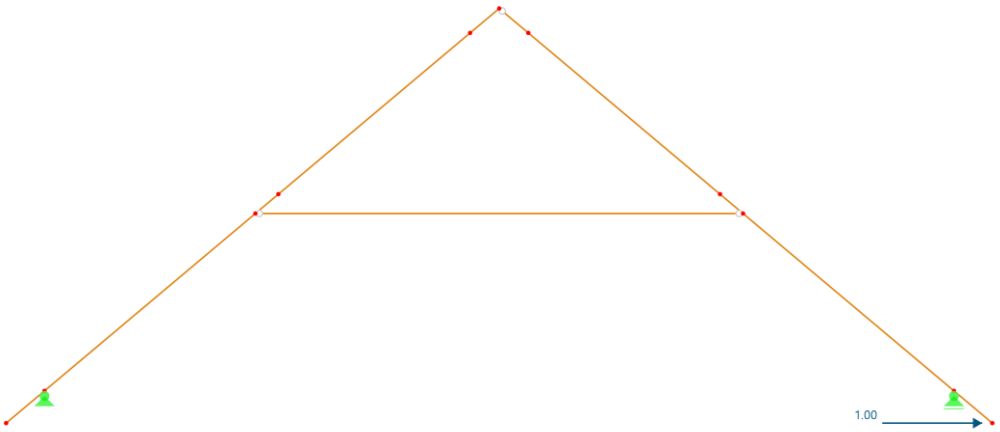
$$\delta_g = 2 \cdot \frac{0{,}005921}{EI_1} = \frac{0{,}011843}{EI_1} = \frac{0{,}011843}{0{,}251533} = \mathbf{0{,}047\ mm}$$

6.2.2 VÝPOČET VODOROVNÉHO POSUNU V BODĚ „b´“

Pomocí metody jednotkových sil vypočítám vodorovný posun na hraně střechy v místě okapu na pravé straně (v bodě „b´“). Zatížím tedy konstrukci jednotkovým vodorovným zatížením v bodě „b´“ směrem doprava a vypočtu a vykreslím průběhy vnitřních sil. Tyto výsledky musím nejdříve spočítat silovou metodou.

6.2.2.1 JEDNOTKOVÉ ZATÍŽENÍ NA ZÁKLADNÍ SOUSTAVĚ

SCHÉMA ZATÍŽENÍ



Obr. 6.31 Jednotkové zatížení v bodě „b´“ ve směru počítaného posunu [kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0 \text{ kN}$$

$$R_{ax} - \bar{X}_{b'} = 0$$

$$R_{ax} - 1 = 0$$

$$R_{ax} = \mathbf{1 \text{ kN}}$$

$$R_{ax}' = \sin\alpha \cdot R_{ax} = \sin 40° \cdot 1 = 0{,}643 \text{ kN}$$

$$R_{ax}'' = \cos\alpha \cdot R_{ax} = \cos 40° \cdot 1 = 0{,}766 \text{ kN}$$

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

$$\bar{X}_{b'} \cdot 0{,}321 + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$1 \cdot 0{,}321 + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$0{,}321 + R_{bz} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{bz} = \frac{-0{,}321}{9{,}084} = \mathbf{-0{,}035 \text{ kN}}$$

$$R_{bz}' = \cos\alpha \cdot R_{bz} = \cos 40° \cdot (-0{,}035) = -0{,}027 \text{ kN}$$

$$R_{bz}'' = \sin\alpha \cdot R_{bz} = \sin 40° \cdot (-0{,}035) = -0{,}022 \text{ kN}$$

$$\sum F_z = 0 \text{ kN}$$

$$R_{az} - R_{bz} = 0$$

$$R_{az} - (-0{,}035) = 0$$

$$R_{az} = \mathbf{0{,}035\ kN}$$

$$R_{az}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot 0{,}035 = 0{,}027 \text{ kN}$$

$$R_{az}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot 0{,}035 = 0{,}022 \text{ kN}$$

$$\bar{X}_{b'}' = \sin\alpha \cdot \bar{X}_{b'} = \sin 40° \cdot 1 = 0{,}643 \text{ kN}$$

$$\bar{X}_{b'}'' = \cos\alpha \cdot \bar{X}_{b'} = \cos 40° \cdot 1 = 0{,}766 \text{ kN}$$

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

    $$\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$$

    $$R_{az} \cdot 4{,}542 + R_{ax} \cdot (1{,}961 + 1{,}851) - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

    $$0{,}035 \cdot 4{,}542 + 1 \cdot 3{,}812 - N_{x2} \cdot 2{,}044 = 0$$

    $$N_{x2} \cdot 2{,}044 = 3{,}971$$

    $$N_{x2} = \frac{3{,}971}{2{,}044} = 1{,}943 \text{ kN}$$

    $$N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot 1{,}943 = 1{,}249 \text{ kN}$$

    $$N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot 1{,}943 = 1{,}488 \text{ kN}$$

  - Posouvající síly

    $$V_{x2} = 0 \text{ kN}$$

  - Momenty

    $$M_{x2} = 0 \text{ kNm}$$

- Krokve
  - Normálové síly

    $$N_a^L = 0 \text{ kN}$$

    $$N_a^P = -R_{az}'' + R_{ax}'' = -0{,}022 + 0{,}766 = 0{,}744 \text{ kN}$$

    $$N_h^L = N_a^P = 0{,}744 \text{ kN}$$

    $$N_h^P = N_h^L - N_{x2}'' = 0{,}744 - 1{,}488 = -0{,}744 \text{ kN}$$

    $$N_c = N_h^P = -0{,}744 \text{ kN}$$

$N_e = N_c = -0{,}744 \text{ kN}$

$N_g^L = N_e = -0{,}744 \text{ kN}$

$N_{b'} = \bar{X}_{b'}'' = 0{,}766 \text{ kN}$

$N_b^P = N_{b'} = 0{,}766 \text{ kN}$
$N_b^L = N_b^P - R_{bz}'' = 0{,}766 - (-0{,}022) = 0{,}788 \text{ kN}$

$N_i^P = N_b^L = 0{,}788 \text{ kN}$
$N_i^L = N_i^P - N_{x2}'' = 0{,}788 - 1{,}488 = -0{,}700 \text{ kN}$

$N_d = N_i^L = -0{,}700 \text{ kN}$

$N_f = N_d = -0{,}700 \text{ kN}$

$N_g^P = N_f = -0{,}700 \text{ kN}$

- Posouvající síly

$V_a^L = 0 \text{ kN}$
$V_a^P = R_{az}' + R_{ax}' = 0{,}027 + 0{,}643 = 0{,}670 \text{ kN}$

$V_h^L = V_a^P = 0{,}670 \text{ kN}$
$V_h^P = V_h^L - N_{x2}' = 0{,}670 - 1{,}249 = -0{,}579 \text{ kN}$

$V_c = V_h^P = -0{,}579 \text{ kN}$

$V_e = V_c = -0{,}579 \text{ kN}$

$V_g^L = V_e = -0{,}579 \text{ kN}$

$V_{b'} = \bar{X}_{b'}' = 0{,}643 \text{ kN}$

$V_b^P = V_{b'} = 0{,}643 \text{ kN}$
$V_a^L = V_b^P + R_{bz}' = 0{,}643 + (-0{,}027) = 0{,}616 \text{ kN}$

$V_i^P = V_a^L = 0{,}616 \text{ kN}$
$V_i^L = V_i^P - N_{x2}' = 0{,}616 - 1{,}249 = -0{,}633 \text{ kN}$

$V_d = V_i^L = -0{,}633 \text{ kN}$

$V_f = V_d = -0{,}633\ \text{kN}$

$V_g^P = V_f = -0{,}633\ \text{kN}$

- Momenty

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

$M_h^L = R_{az}{}' \cdot\ 2{,}75 + R_{ax} \cdot 2{,}75 = 0{,}027 \cdot 2{,}75 + 0{,}643 \cdot 2{,}75 = 1{,}843\ \text{kNm}$

$M_c^L = R_{az}{}' \cdot\ (2{,}75 + 0{,}3) + R_{ax}{}' \cdot\ (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}{}' \cdot 0{,}3$
$M_c^L = 0{,}027 \cdot 3{,}05 + 0{,}643 \cdot 3{,}05 - 1{,}249 \cdot 0{,}3 = 1{,}669\ \text{kNm}$

$M_e^L = R_{az}{}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) + R_{ax}{}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}{}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5)$
$M_e^L = 0{,}027 \cdot 5{,}55 + 0{,}643 \cdot 5{,}55 - 1{,}249 \cdot 2{,}8 = 0{,}220\ \text{kNm}$

$M_g^L = R_{az}{}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) + R_{ax}{}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}{}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379)$
$M_g^L = 0{,}027 \cdot\ 5{,}929 + 0{,}643 \cdot\ 5{,}929 - 1{,}249 \cdot 3{,}179 = 0{,}0\ \text{kNm}$

$M_b^P = \bar{X}_b{}' \cdot 0{,}5 = 0{,}643 \cdot 0{,}5 = 0{,}322\ \text{kNm}$

$M_i^P = \bar{X}_b{}' \cdot (0{,}5 + 2{,}75) + R_{bz}{}' \cdot 2{,}75 = 0{,}643 \cdot 3{,}25 + (-0{,}027) \cdot 2{,}75$
$M_i^P = 2{,}016\ \text{kNm}$

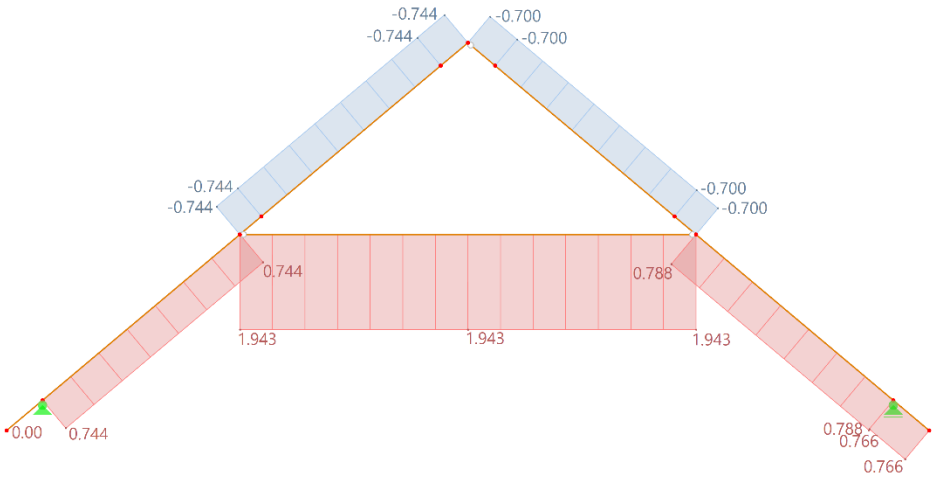
$M_d^P = \bar{X}_b{}' \cdot (3{,}25 + 0{,}3) + R_{bz}{}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}{}' \cdot 0{,}3$
$M_c^P = 0{,}643 \cdot 3{,}55 + (-0{,}027) \cdot 3{,}05 - 1{,}249 \cdot 0{,}3 = 1{,}826\ \text{kNm}$

$M_f^L = \bar{X}_b{}' \cdot (3{,}55 + 2{,}5) + R_{bz}{}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}{}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5)$
$M_f^P = 0{,}643 \cdot 6{,}05 + (-0{,}027) \cdot 5{,}55 - 1{,}249 \cdot 2{,}8 = 0{,}241\ \text{kNm}$

$M_g^P = \bar{X}_b{}' \cdot (6{,}05 + 0{,}379) + R_{az}{}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}{}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379)$
$M_g^P = 0{,}643 \cdot 6{,}429 + (-0{,}027) \cdot\ 5{,}929 - 1{,}249 \cdot 3{,}179 = 0{,}0\ \text{kNm}$

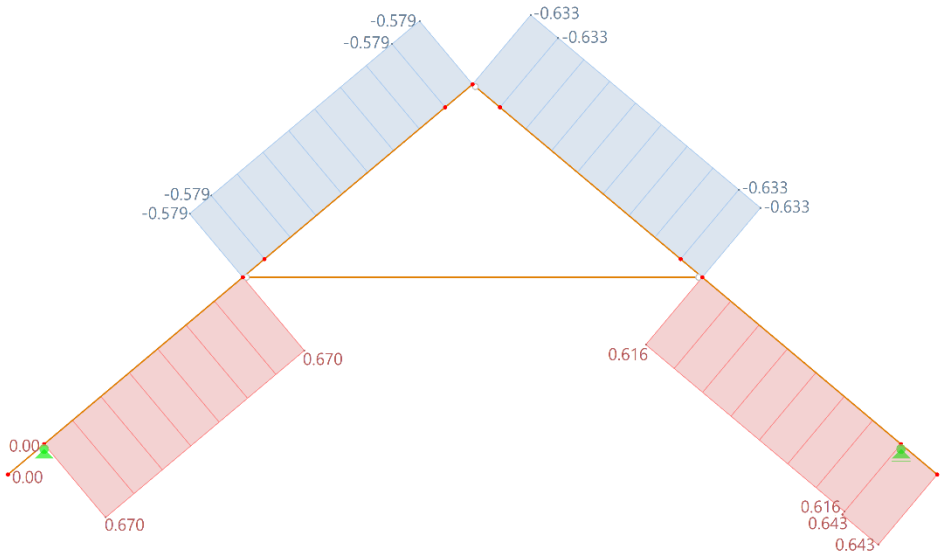
PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL NA ZÁKLADNÍ SOUSTAVĚ

- Normálové síly



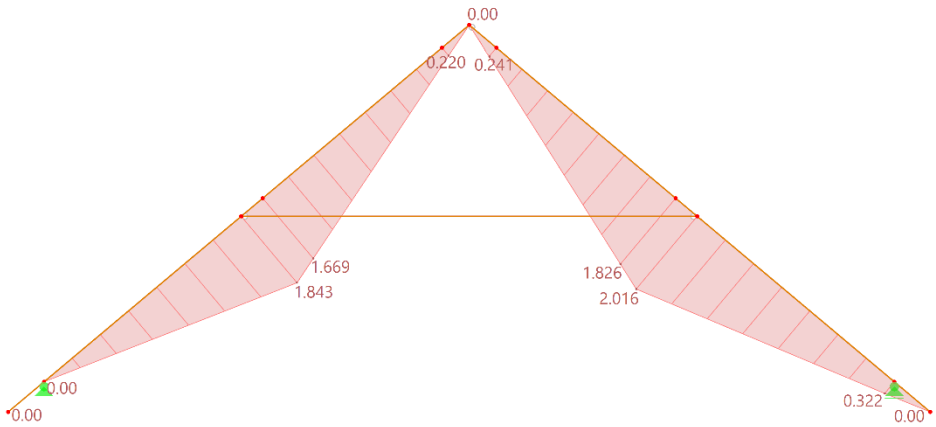
Obr. 6.32 Průběh normálových sil od jednotkového zatížení v bodě „b´“ [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.33 Průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení v bodě „b´“ [kN]

- Momenty



Obr. 6.34 Průběh momentů od jednotkového zatížení v bodě „b´“ [kNm]

6.2.2.2 DEFORMAČNÍ SOUČINITELE

Deformační součinitele od jednotkového zatížení

$$\delta_{1,0} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 1{,}669 \cdot (0{,}379 + 2{,}5) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}669 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3} \cdot \right. \right.$$
$$\cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \left. \right] + \frac{1}{2} \cdot 1{,}843 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{1}{3} \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot 1{,}843 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}565) + \frac{1}{2} \cdot 2{,}016 \cdot (0{,}379 + 2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) +$$
$$\left. + \frac{1}{2} \cdot 2{,}016 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}322 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}542) \right\}$$

$$\delta_{1,0} = \frac{-8{,}326132}{EI_1} = \frac{-8{,}326132}{0{,}251533} = -33{,}102$$

$$\delta_{2,0} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 1{,}843 \cdot (0{,}379 + 2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}542) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}843 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot \right.$$
$$\cdot (-0{,}542) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}826 \cdot (0{,}379 + 2{,}5) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625) + \frac{1}{2} \cdot 1{,}826 \cdot 0{,}3 \cdot$$
$$\cdot \left[-1{,}565 + \frac{2}{3} \cdot (-1{,}625 + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot 2{,}016 \cdot 0{,}3 \cdot \left[-1{,}565 + \frac{1}{3} \cdot (-1{,}625 + \right.$$
$$\left. \left. + 1{,}565) \right] + \frac{1}{2} \cdot 2{,}016 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-1{,}565) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}322 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-1{,}565) \right\}$$

$$\delta_{2,0} = \frac{-8{,}863744}{EI_1} = \frac{-8{,}863744}{0{,}251533} = -35{,}239$$

$$\delta_{3,0} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 0{,}220 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}220 \cdot (2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \right.$$
$$+ \frac{1}{2} \cdot 1{,}843 \cdot (2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}241 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\left. \cdot 0{,}241 \cdot (2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{2}{3} \cdot (-0{,}213) + \frac{1}{2} \cdot 2{,}016 \cdot (2{,}5 + 0{,}3) \cdot \frac{1}{3} \cdot (-0{,}213) \right\}$$

$$\delta_{3,0} = \frac{-0{,}487636}{EI_1} = \frac{-0{,}487636}{0{,}251533} = -1{,}939$$

Deformační součinitele od 1.ZS

Výpočet viz kapitola 6.1.2.5 Deformační součinitele od zatěžovacích stavů.

$$\delta_{1,1} = 24{,}343$$

$$\delta_{2,1} = 14{,}235$$

$$\delta_{3,1} = 1{,}173$$

Deformační součinitele od 2.ZS

Výpočet viz kapitola 6.1.2.5 Deformační součinitele od zatěžovacích stavů.

$$\delta_{1,2} = 14{,}235$$

$$\delta_{2,2} = 24{,}343$$

$$\delta_{3,2} = 1{,}173$$

Deformační součinitele od 3.ZS

Výpočet viz kapitola 6.1.2.5 Deformační součinitele od zatěžovacích stavů.

$\delta_{1,3} = 1{,}173$

$\delta_{2,3} = 1{,}173$

$\delta_{3,3} = 0{,}382$

6.2.2.3 VÝPOČET NEZNÁMÝCH SIL

Postup výpočtu je totožný s výpočtem v kap. 6.1.2.6 Výpočet neznámých sil.

$$\delta_1 = 0: \quad \delta_{1,0} + \delta_{1,1} \cdot X_1 + \delta_{1,2} \cdot X_2 + \delta_{1,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_2 = 0: \quad \delta_{2,0} + \delta_{2,1} \cdot X_1 + \delta_{2,2} \cdot X_2 + \delta_{2,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_3 = 0: \quad \delta_{3,0} + \delta_{3,1} \cdot X_1 + \delta_{3,2} \cdot X_2 + \delta_{3,3} \cdot X_3 = 0$$

$$\delta_{1,0} + \delta_{1,1} \cdot X_1 + \delta_{1,2} \cdot X_2 + \delta_{1,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_{2,0} + \delta_{2,1} \cdot X_1 + \delta_{2,2} \cdot X_2 + \delta_{2,3} \cdot X_3 = 0$$
$$\delta_{3,0} + \delta_{3,1} \cdot X_1 + \delta_{3,2} \cdot X_2 + \delta_{3,3} \cdot X_3 = 0$$

$$-33{,}102 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot X_3 = 0$$
$$-35{,}239 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot X_3 = 0$$
$$-1{,}939 + 1{,}173 \cdot X_1 + 1{,}173 \cdot X_2 + 0{,}382 \cdot X_3 = 0$$

$$0{,}382 \cdot X_3 = 1{,}939 - 1{,}173 \cdot X_1 - 1{,}173 \cdot X_2$$
$$X_3 = \frac{1{,}939}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2$$

$$-33{,}102 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot \left(\frac{1{,}939}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2\right) = 0$$
$$-35{,}239 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 1{,}173 \cdot \left(\frac{1{,}939}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_1 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot X_2\right) = 0$$

$$-33{,}102 + 24{,}343 \cdot X_1 + 14{,}235 \cdot X_2 + 5{,}954 - 3{,}600 \cdot X_1 - 3{,}600 \cdot X_2 = 0$$
$$-35{,}239 + 14{,}235 \cdot X_1 + 24{,}343 \cdot X_2 + 5{,}954 - 3{,}600 \cdot X_1 - 3{,}600 \cdot X_2 = 0$$

$$20{,}743 \cdot X_1 + 10{,}635 \cdot X_2 - 27{,}148 = 0$$
$$10{,}635 \cdot X_1 + 20{,}743 \cdot X_2 - 29{,}285 = 0$$

Vyjádření neznámé X_1 a dosazení do první rovnice:

$$10{,}635 \cdot X_1 = -20{,}743 \cdot X_2 + 29{,}285$$

$$X_1 = -\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot X_2 + \frac{29{,}285}{10{,}635}$$

$$20{,}743 \cdot \left(-\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot X_2 + \frac{29{,}285}{10{,}635}\right) + 10{,}635 \cdot X_2 - 27{,}148 = 0$$

$$-40{,}458 \cdot X_2 + 57{,}119 + 10{,}635 \cdot X_2 - 27{,}148 = 0$$

$$-29{,}823 \cdot X_2 + 29{,}971 = 0$$

$$29{,}823 \cdot X_2 = 29{,}971$$

$$X_2 = \frac{29{,}971}{29{,}823} = \mathbf{1{,}005\ kN}$$

Vypočtenou hodnotu X_2 dosadím do již vyjádřených rovnic pro výpočet neznámých sil X_1 a X_3.

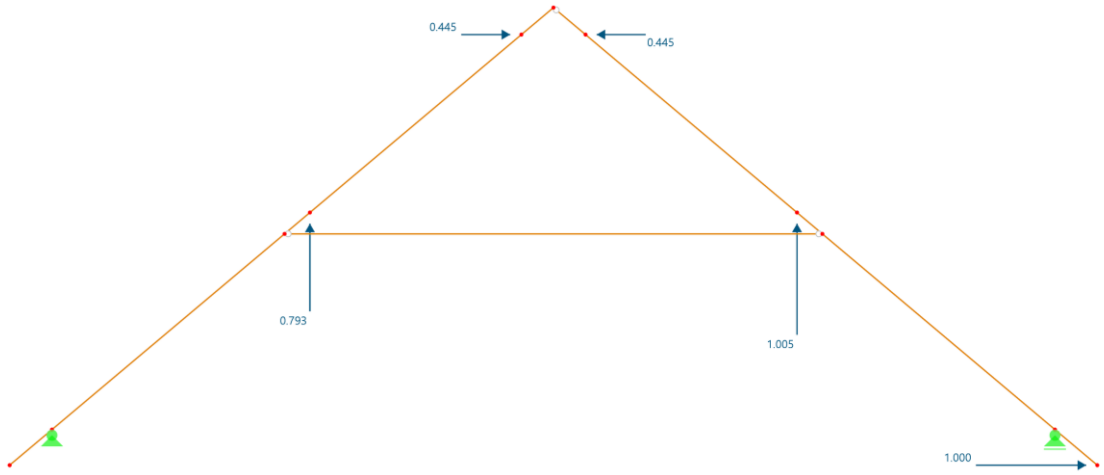
$$X_1 = -\frac{20{,}743}{10{,}635} \cdot 1{,}005 + \frac{29{,}285}{10{,}635} = \mathbf{0{,}793\ kN}$$

Hodnotu vypočtených sil dosadím do vyjádřené rovnice pro výpočet X_3.

$$X_3 = \frac{1{,}939}{0{,}382} - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot 1{,}005 - \frac{1{,}173}{0{,}382} \cdot 0{,}793 = \mathbf{-0{,}445\ kN}$$

6.2.2.4 VÝPOČET VNITŘNÍCH SIL

SCHÉMA ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE



Obr. 6.35 Zatížení pro výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení [kN]

VÝPOČET REAKCÍ

$$\sum F_x = 0 \text{ kN}$$

$$R_{ax} + \mathrm{X}_3 - \mathrm{X}_3 - \bar{X}_{b'} = 0$$

$$R_{ax} = \mathrm{X}_3 - \mathrm{X}_3 + \bar{X}_{b'} = 0{,}264 - 0{,}264 + 1 = \mathbf{1{,}0\ kN}$$

$$R_{ax}{}' = \sin\alpha \cdot R_{ax} = \sin 40° \cdot 1 = 0{,}643 \text{ kN}$$

$$R_{ax}{}'' = \cos\alpha \cdot R_{ax} = \cos 40° \cdot 1 = 0{,}766 \text{ kN}$$

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

$$X_1 \cdot 2{,}336 + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) - X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) + \bar{X}_{b'} \cdot 0{,}321 + X_2 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$0{,}793 \cdot 2{,}336 + 0 + 1{,}005 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + 1 \cdot 0{,}321 + R_{bz} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$8{,}955 + R_{bz} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{bz} = \frac{-8{,}955}{9{,}084} = \mathbf{-0{,}986\ kN}$$

$$R_{bz}{}' = \cos\alpha \cdot R_{bz} = \cos 40° \cdot (-0{,}986) = -0{,}755 \text{ kN}$$

$$R_{bz}{}'' = \sin\alpha \cdot R_{bz} = \sin 40° \cdot (-0{,}986) = -0{,}634 \text{ kN}$$

$$\sum M_b = 0 \text{ kNm}$$

$$-X_2 \cdot 2{,}336 - X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) + X_3 \cdot (1{,}8 + 2{,}089 - 0{,}321) - X_1 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + \bar{X}_{b'} \cdot 0{,}321 - R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-1{,}005 \cdot 2{,}336 + 0 - 0{,}793 \cdot (2{,}336 + 2 \cdot 2{,}206) + 1 \cdot 0{,}321 - R_{az} \cdot 2 \cdot 4{,}542 = 0$$

$$-7{,}378 - R_{az} \cdot 9{,}084 = 0$$

$$R_{az} = \frac{-7{,}378}{9{,}084} = \mathbf{-0{,}812\ kN}$$

$$R_{az}' = \cos\alpha \cdot R_{az} = \cos 40° \cdot (-0{,}812) = -0{,}622 \text{ kN}$$

$$R_{az}'' = \sin\alpha \cdot R_{az} = \sin 40° \cdot (-0{,}812) = -0{,}522 \text{ kN}$$

$$\sum F_z = 0 \text{ kN}$$

$$X_1 + X_2 + R_{az} + R_{bz} = 0$$

$$1{,}005 + 0{,}793 - 0{,}812 - 0{,}986 = 0$$

$$0 = 0 \text{ [kN]}$$

$$X_1' = \cos\alpha \cdot X_1 = \cos 40° \cdot 0{,}793 = 0{,}607 \text{ kN}$$

$$X_1'' = \sin\alpha \cdot X_1 = \sin 40° \cdot 0{,}793 = 0{,}510 \text{ kN}$$

$$X_2' = \cos\alpha \cdot X_2 = \cos 40° \cdot 1{,}005 = 0{,}770 \text{ kN}$$

$$X_2'' = \sin\alpha \cdot X_2 = \sin 40° \cdot 1{,}005 = 0{,}646 \text{ kN}$$

VNITŘNÍ SÍLY NA KONSTRUKCI

- Kleštiny vedlejší
  - Normálové síly

    $N_{x3} = -X_3 = 0{,}445 \text{ kN}$

    $N_{x3}' = \sin\alpha \cdot N_{x3} = \sin 40° \cdot 0{,}445 = 0{,}286 \text{ kN}$

    $N_{x3}'' = \cos\alpha \cdot N_{x3} = \cos 40° \cdot 0{,}445 = 0{,}341 \text{ kN}$

  - Posouvající síly

    $V_{x3} = 0 \text{ kN}$

  - Momenty

    $M_{x3} = 0 \text{ kNm}$

- Kleštiny hlavní
  - Normálové síly

    $\sum M_g^L = 0 \text{ kNm}$

    $R_{az} \cdot 4{,}542 + R_{ax} \cdot (1{,}851 + 1{,}961) - N_{x2} \cdot 2{,}044 + X_1 \cdot 2{,}206 - N_{x3} \cdot 0{,}244 = 0$

    $-0{,}812 \cdot 4{,}542 + 1 \cdot 3{,}812 - N_{x2} \cdot 2{,}044 + 0{,}793 \cdot 2{,}206 - 0{,}445 \cdot 0{,}244 = 0$

    $N_{x2} \cdot 2{,}044 = 1{,}765$

    $N_{x2} = \frac{1{,}765}{2{,}044} = 0{,}863 \text{ kN}$

    $N_{x2}' = \sin\alpha \cdot N_{x2} = \sin 40° \cdot 0{,}863 = 0{,}555 \text{ kN}$

    $N_{x2}'' = \cos\alpha \cdot N_{x2} = \cos 40° \cdot 0{,}863 = 0{,}555 \text{ kN}$

  - Posouvající síly

    $V_{x2} = 0 \text{ kN}$

  - Momenty

    $M_{x2} = 0 \text{ kNm}$

- Krokve
  - Normálové síly

    $N_a^L = 0 \text{ kN}$

    $N_a^P = -R_{az}'' + R_{ax}'' = -(-0{,}522) + 0{,}766 = 1{,}288 \text{ kN}$

    $N_h^L = N_a^P = 1{,}288 \text{ kN}$

    $N_h^P = N_h^L - N_{x2}'' = 1{,}288 - 0{,}661 = 0{,}627 \text{ kN}$

    $N_c^L = N_h^P = 0{,}627 \text{ kN}$

    $N_c^P = N_c^L - X_1'' = 0{,}627 - 0{,}510 = 0{,}117 \text{ kN}$

    $N_e^L = N_c^P = 0{,}117 \text{ kN}$

    $N_e^P = N_c^L - N_{x3}'' = 0{,}117 - 0{,}341 = -0{,}224 \text{ kN}$

    $N_g^L = N_e^P = -0{,}224 \text{ kN}$

    $N_{b'} = \bar{X}_{b'}'' = 0{,}766 \text{ kN}$

    $N_b^P = N_{b'} = 0{,}766 \text{ kN}$

    $N_b^L = N_b^P - R_{bz}'' = 0{,}766 - (-0{,}634) = 1{,}400 \text{ kN}$

    $N_i^P = N_b^L = 1{,}400 \text{ kN}$

$N_i^L = N_i^P - N_{x2}'' = 1{,}400 - 0{,}661 = 0{,}739\ \text{kN}$

$N_d^P = N_i^L = 0{,}739\ \text{kN}$

$N_d^L = N_d^P - X_2'' = 0{,}739 - 0{,}646 = 0{,}093\ \text{kN}$

$N_f^P = N_d^L = 0{,}093\ \text{kN}$

$N_f^L = N_f^P + N_{x3}'' = 0{,}093 - 0{,}341 = -0{,}248\ \text{kN}$

$N_g^P = N_f^L = -0{,}248\ \text{kN}$

- Posouvající síly

$V_a^L = 0\ \text{kN}$

$V_a^P = R_{az}' + R_{ax}' = -0{,}622 + 0{,}643 = 0{,}021\ \text{kN}$

$V_h^L = V_a^P = 0{,}021\ \text{kN}$

$V_h^P = V_h^L - N_{x2}' = 0{,}021 - 0{,}555 = -0{,}534\ \text{kN}$

$V_c^L = V_h^P = -0{,}534\ \text{kN}$

$V_c^P = V_c^L + X_1' = -0{,}534 + 0{,}607 = 0{,}073\ \text{kN}$

$V_e^L = V_c^P = 0{,}073\ \text{kN}$

$V_e^P = V_e^L + N_{x3}' = 0{,}073 + (-0{,}286) = -0{,}213\ \text{kN}$

$V_g^L = V_e^P = -0{,}213\ \text{kN}$

$V_{b'} = \bar{X}_{b'}' = 0{,}643\ \text{kN}$

$V_b^P = V_{b'} = 0{,}643\ \text{kN}$

$V_a^L = V_b^P + R_{bz}' = 0{,}643 + (-0{,}755) = -0{,}112\ \text{kN}$

$V_i^P = V_a^L = -0{,}112\ \text{kN}$

$V_i^L = V_i^P - N_{x2}' = -0{,}112 - 0{,}555 = -0{,}667\ \text{kN}$

$V_d^P = V_i^L = -0{,}667\ \text{kN}$

$V_d^L = V_d^P + X_2' = -0{,}667 + 0{,}770 = 0{,}103\ \text{kN}$

$V_f^P = V_d^L = 0{,}103\ \text{kN}$

$V_f^L = V_f^P - N_{x3}' = 0{,}103 - 0{,}286 = -0{,}183\ \text{kN}$

$V_g^P = V_f^L = -0{,}183\ \text{kN}$

- Momenty

$M_a^L = 0$ kNm

$M_h^L = R_{az}{}' \cdot\ 2{,}75 + R_{ax} \cdot 2{,}75 = -0{,}622 \cdot 2{,}75 + 0{,}643 \cdot 2{,}75 = 0{,}058$ kNm

$M_c^L = R_{az}{}' \cdot\ (2{,}75 + 0{,}3) + R_{ax}{}' \cdot\ (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}{}' \cdot 0{,}3$
$M_c^L = -0{,}622 \cdot 3{,}05 + 0{,}643 \cdot 3{,}05 - 0{,}555 \cdot 0{,}3 = -0{,}102$ kNm

$M_e^L = R_{az}{}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) + R_{ax}{}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}{}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) + X_1{}' \cdot 2{,}5$
$M_e^L = -0{,}622 \cdot 5{,}55 + 0{,}643 \cdot 5{,}55 - 0{,}555 \cdot 2{,}8 + 0{,}607 \cdot 2{,}5 = 0{,}080$ kNm

$M_g^L = R_{az}{}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) + R_{ax}{}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}{}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + X_1{}' \cdot (2{,}5 + 0{,}379) - N_{x3}{}' \cdot 0{,}379$
$M_g^L = -0{,}622 \cdot 5{,}929 + 0{,}643 \cdot 5{,}929 - 0{,}555 \cdot 3{,}179 + 0{,}607 \cdot 2{,}879 - 0{,}286 \cdot 0{,}379 = 0{,}0$ kNm

$M_b^P = \bar{X}_{b'}{}' \cdot 0{,}5 = 0{,}643 \cdot 0{,}5 = 0{,}322$ kNm

$M_i^P = \bar{X}_{b'}{}' \cdot (0{,}5 + 2{,}75) + R_{bz}{}' \cdot 2{,}75 = 0{,}643 \cdot 3{,}25 + (-0{,}755) \cdot 2{,}75$
$M_i^P = 0{,}014$ kNm

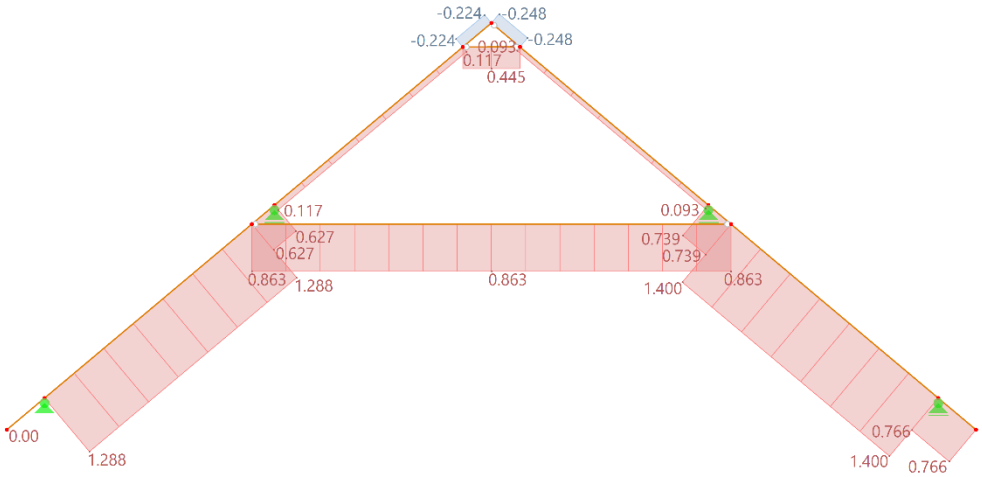
$M_d^P = \bar{X}_{b'}{}' \cdot (3{,}25 + 0{,}3) + R_{bz}{}' \cdot (2{,}75 + 0{,}3) - N_{x2}{}' \cdot 0{,}3$
$M_c^P = 0{,}643 \cdot 3{,}55 + (-0{,}755) \cdot 3{,}05 - 0{,}555 \cdot 0{,}3 = -0{,}187$ kNm

$M_f^L = \bar{X}_{b'}{}' \cdot (3{,}55 + 2{,}5) + R_{bz}{}' \cdot\ (3{,}05 + 2{,}5) - N_{x2}{}' \cdot (0{,}3 + 2{,}5) + X_2{}' \cdot 2{,}5$
$M_f^P = 0{,}643 \cdot 6{,}05 + (-0{,}755) \cdot 5{,}55 - 0{,}555 \cdot 2{,}8 + 0{,}770 \cdot 2{,}5 = 0{,}070$ kNm

$M_g^P = \bar{X}_{b'}{}' \cdot (6{,}05 + 0{,}379) + R_{bz}{}' \cdot (5{,}55 + 0{,}379) - N_{x2}{}' \cdot (2{,}8 + 0{,}379) + X_2{}' \cdot (2{,}5 + 0{,}379) - N_{x3}{}' \cdot 0{,}379$
$M_g^P = 0{,}643 \cdot 6{,}429 + (-0{,}755) \cdot\ 5{,}929 - 0{,}555 \cdot 3{,}179 + 0{,}770 \cdot 2{,}879 - 0{,}286 \cdot 0{,}379 = 0{,}0$ kNm

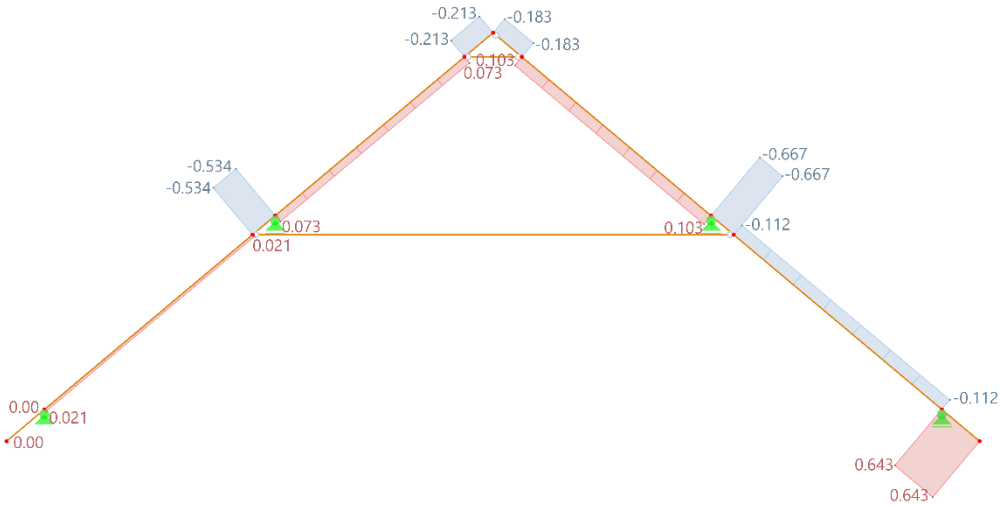
6.2.2.5 PRŮBĚHY VNITŘNÍCH SIL NA KONSTRUKCI

- Normálové síly



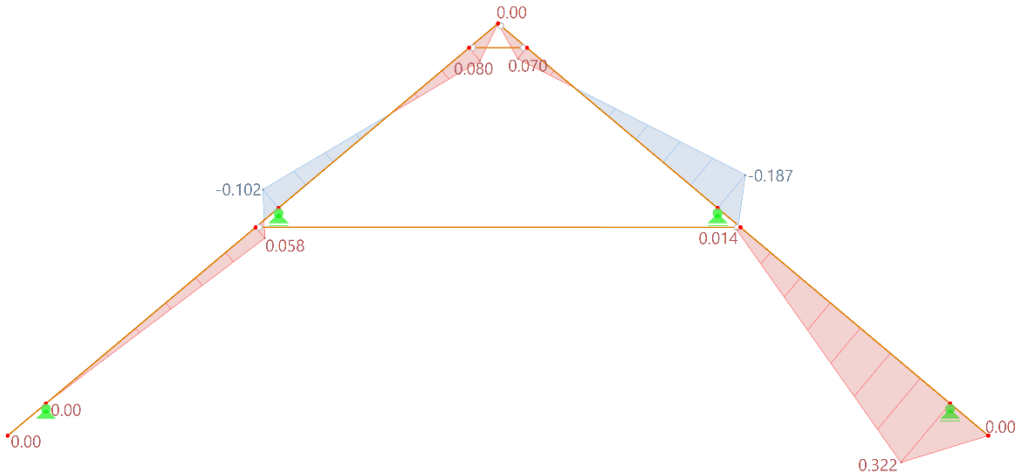
Obr. 6.36 Výsledný průběh normálových sil od jednotkového zatížení [kN]

- Posouvající síly



Obr. 6.37 Výsledný průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení [kN]

- Momenty



Obr. 6.38 Výsledný průběh momentů od jednotkového zatížení [kNm]

6.2.2.6 VÝPOČET VODOROVNÉ DEFORMACE V BODĚ „b´“:

$$\delta_{b'} = \frac{1}{EI_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0{,}080 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}001087 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{0{,}080}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 2{,}5 \cdot \right.$$
$$\cdot \left[0{,}080 - \frac{1}{3}(0{,}080 + 0{,}102) \right] + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}111) \cdot 2{,}5 \cdot \left[0{,}080 - \frac{2}{3}(0{,}080 + \right.$$
$$\left. + 0{,}102) \right] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}047279 \cdot 2{,}5 \cdot \left(\frac{0{,}080 - 0{,}102}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}111) \cdot 0{,}3 \cdot \left[0{,}058 - \right.$$
$$\left. - \frac{2}{3} \cdot (0{,}058 + 0{,}102) \right] + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 0{,}3 \cdot \left[0{,}058 - \frac{1}{3}(0{,}058 + 0{,}102) \right] + \frac{2}{3} \cdot$$
$$\cdot 0{,}000681 \cdot 0{,}3 \cdot \left(\frac{-0{,}102 + 0{,}058}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0{,}058 + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}0076) \cdot$$
$$\cdot 2{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0{,}058 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}057208 \cdot 2{,}75 \cdot \frac{0{,}058}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0{,}070 + \frac{2}{3} \cdot$$
$$\cdot 0{,}001087 \cdot 0{,}379 \cdot \frac{0{,}070}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot 2{,}5 \cdot \left[0{,}070 - \frac{1}{3}(0{,}070 + 0{,}187) \right] + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\cdot (-0{,}111) \cdot 2{,}5 \cdot \left[0{,}070 - \frac{2}{3} \cdot (0{,}070 + 0{,}187) \right] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}047279 \cdot 2{,}5 \cdot$$
$$\cdot \left(\frac{0{,}070 - 0{,}187}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot (-0{,}111) \cdot 0{,}3 \cdot \left[0{,}014 - \frac{2}{3}(0{,}014 + 0{,}187) \right] + \frac{1}{2} \cdot 0{,}013 \cdot$$
$$\cdot 0{,}3 \cdot \left[0{,}014 - \frac{1}{3}(0{,}014 + 0{,}187) \right] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}000681 \cdot 0{,}3 \cdot \left(\frac{-0{,}187 + 0{,}014}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot$$
$$\left. \cdot 0{,}013 \cdot 2{,}75 \cdot \left[0{,}014 + \frac{1}{3}(0{,}322 - 0{,}014) \right] + \frac{2}{3} \cdot 0{,}057208 \cdot 2{,}75 \cdot \left(\frac{0{,}014 + 0{,}322}{2} \right) \right\}$$

$$\delta_{b'} = \frac{0{,}040580}{EI_1} = \frac{0{,}040580}{0{,}251533} = \mathbf{0{,}161\ mm}$$

7. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

7.1 REAKCE PODPOR OD ZATÍŽENÍ

Tab. 7.1 Porovnání reakcí

	PROGRAM RFEM	RUČNÍ VÝPOČET
Reakce R_{az}, R_{bz} [kN]	0,1590	0,1585
Reakce R_{ax} [kN]	0	0
Reakce R_{cz}, R_{dz} [kN]	0,716	0,714

7.2 VNITŘNÍ SÍLY NA KONSTRUKCI

KROKVE

Tab. 7.2 Porovnání vnitřních sil na krokvích

UZEL	PROGRAM RFEM			RUČNÍ VÝPOČET		
	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]
a^L	0,026	-0,030	-0,0076	0,025	-0,030	-0,0076
a^P	-0,077	0,091		-0,077	0,091	
c^L	0,236	-0,423	-0,110	0,235	-0,421	-0,111
c^P	-0,224	0,125		-0,224	0,126	
e^L	-0,097	-0,027	0,012	-0,097	-0,025	0,013
e^P	-0,072	-0,021		-0,072	-0,019	
h^L	0,064	-0,076	0,014	0,063	-0,075	0,013
h^P	0,221	-0,405		0,220	-0,403	
g	-0,052	-0,044	0	-0,053	-0,042	0

KLEŠTINY HLAVNÍ

Tab. 7.3 Porovnání vnitřních sil hlavních kleštin

	PROGRAM RFEM			RUČNÍ VÝPOČET		
	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]
KRAJ	0,091	0,353	0	0,091	0,353	0
STŘED		0	0,430		0	0,430

KLEŠTINY VEDLEJŠÍ

Tab. 7.4 Porovnání vnitřních sil vedlejších kleštin

UMÍSTĚNÍ	PROGRAM RFEM			RUČNÍ VÝPOČET		
	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]
KRAJ	-0,023	0,012	0	-0,023	0,0115	0
STŘED		0	0,002		0	0,002

7.3 VYBRANÉ POSUNY KONSTRUKCE

Tab. 7.5 Porovnání vybraných posunů

	PROGRAM RFEM	RUČNÍ VÝPOČET
Svislý posun hřebene	0,063 mm	0,047 mm
Vodorovný posun okapu	0,173 mm	0,161 mm

8. ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla vypracována statická analýza dřevěného krovu. Na dřevěném krovu s pochozí půdou jsem provedl výpočet stálého zatížení a zatížení proměnného. Do zatížení stálého byla zařazena vlastní tíha konstrukce a ostatní stálé zatížení, kde bylo počítáno se zatížením od střešních skladeb a skladby podlahy na půdě. Mezi proměnné zatížení bylo započítáno zatížení užitné od pochozí podlahy na půdě a užitné zatížení na střešní krytině. Dále bylo v proměnných zatíženích vypočítáno zatížení od sněhu a větru. Tato zatížení jsem rozdělil do 11 zatěžovacích stavů. Veškerá zatížení byla počítána dle platných norem.

Pro výpočet a vykreslení vnitřních sil pomocí programu RFEM byly připraveny dva statické modely. Jedna varianta konstrukce byla podepřena čtyřmi kloubovými podporami, z nichž byla pouze jedna podpora pevná v místě uložení konstrukce na pozednice. Druhá varianta byla vytvořena se stejným počtem kloubových podpor, ale obsahovala dvě pevné podpory v místě uložení konstrukce na pozednice.

Dále jsem v programu RFEM vytvořil výpočtový model krovu s příslušným statickým působením konstrukce v obou variantách statického působení a nastavil jednotlivým prvkům konstrukce jejich materiálové a průřezové charakteristiky. Dále jsem model zatížil předem vypočtenými hodnotami zatížení z jednotlivých zatěžovacích stavů. V programu RFEM bylo provedeno nastavení pro výpočet kombinací podle rovnic 6.10a a 6.10b dle ČSN EN 1990 – Zásady navrhování konstrukcí. Bylo vytvořeno 101 kombinací a výsledná obálka jejich výsledků.

Z programu RFEM jsem vynesl průběhy vnitřních sil od vlastní tíhy konstrukce a dále obálku vnitřních sil od kombinací zatížení. Tyto výsledky byly rozděleny podle variant statického podepření konstrukce.

Následně byl proveden kontrolní ruční výpočet vnitřních sil na konstrukci od zatížení vlastní tíhou prvků. Výpočet jsem řešil na statickém modelu varianty 1 s pouze jednou pevnou kloubovou podporou. Tento výpočet byl proveden pomocí silové metody, jelikož konstrukce byla 3x staticky neurčitá. Na základní soustavě jsem vypočetl a vykreslil průběhy vnitřních sil.

Na řešené konstrukci jsem také vypočítal za pomoci metody jednotkových sil vybrané deformace. Pro výpočet jsem zvolil svislý posun hřebene střechy, tedy nejvyšší bod konstrukce, a vodorovný posun v místě okapu. Tyto posuny byly opět řešeny na statickém modelu varianty 1.

Výsledky z početního programu RFEM a výsledky z ručních výpočtů byly zapsány do tabulky a porovnány. Jednotlivé výsledky vnitřních sil se téměř shodují Tento rozdíl v tisícinách jednotek vznikl nejspíše kvůli zaokrouhlování při jednotlivých krocích ručního výpočtu. Vypočtené hodnoty deformací se liší u svislého

posunu hřebene zhruba o 25 %. U vypočtené vodorovné deformace je tento rozdíl okolo 7 %.

Výsledky průběhů vnitřních sil a deformací konstrukce podle způsobu podepření se liší. Při modelu varianty 1 je zatížení přenášeno více do vaznice, zatímco u varianty 2 je toto zatížení spíše přenášeno do pozednic. U varianty 2 se dvěma neposuvnými (pevnými) podporami vznikají menší posouvající (smykové) vnitřní síly, menší maximální hodnoty průběhu momentů a také menší deformace konstrukce. Dále je zde rozdíl v průběhu normálových sil, kde u varianty 2 jsou prvky namáhané spíše v tlaku (působení tahu je velmi malé), oproti variantě 1, kde v prvcích může dojít jak k tlaku tak i k tahu. Výsledky u varianty 2 vycházejí symetricky, jelikož je konstrukce symetricky podepřená i zatížená.

9. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] ČSN EN 1991-1-1; *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha, Český normalizační institut, 2004.

[2] ČSN EN 1990-1-3. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem.* Praha: Český normalizační institut, 2005.

[3] ČSN EN 1991-1-3 ed. 2; *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*. Česká agentura pro standardizaci na základě ustanovení § 5 odst. 2 zákona č. 22/1997 Sb., 2022.

[4] ČSN EN 1991-1-4; *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Česká agentura pro standardizaci na základě ustanovení § 5 odst. 2 zákona č. 22/1997 Sb., 2020.

[5] ČSN EN 1990 ed. 2; *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.* Česká agentura pro standardizaci na základě ustanovení § 5 odst. 2 zákona č. 22/1997 Sb., 2021.

[6] KADLČÁK, J. a J. KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí II., Staticky neurčité prutové konstrukce.* VUTIUM, 2004.

10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 3D model řešeného krovu 11
Obr. 2.1 Statické schéma konstrukce s rozměry [mm] 12
Obr. 2.2 Rozměry prvků krovu 13
Obr. 3.1 Zatěžovací šířky 14
Obr. 3.2 Stálá zatížení - vlastní tíha [kN/m] 15
Obr. 3.3 Skladba S1 – půdní prostor 16
Obr. 3.4 Skladba S2 – prostor podkroví 17
Obr. 3.5 Skladba S3 – okapní část 18
Obr. 3.6 Skladba S4 – podlaha na půdě 19
Obr. 3.7 Ostatní stálá zatížení [kN/m; kN] 20
Obr. 3.8 Užitné zatížení [kN/m] 21
Obr. 3.9 Mapa sněhových oblastí na území ČR[3] 22
Obr. 3.10 Tvarové součinitele zatížení sněhem pro sedlové střechy[2] 23
Obr. 3.11 Zatížení sněhem - sníh plný [kN/m] 25
Obr. 3.12 Zatížení sněhem - sníh navátý zleva [kN/m] 25
Obr. 3.13 Zatížení sněhem - sníh navátý zprava [kN/m] 26
Obr. 3.14 Mapa větrných oblastí na území ČR[4] 26
Obr. 3.15 Oblasti působení větru ve směru θ=0˚[4] 29
Obr. 3.16 Skutečné rozměry oblastí pro θ=0˚ [mm] 30
Obr. 3.17 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zleva – sání [kN/m] 32
Obr. 3.18 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zleva – tlak + sání [kN/m] 33
Obr. 3.19 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zprava – sání [kN/m] 33
Obr. 3.20 Zatížení větrem ve směru θ=0˚ zprava – tlak + sání [kN/m] 34
Obr. 3.21 Oblasti působení větru ve směru θ=0˚[4] 34
Obr. 3.22 Skutečné rozměry oblastí pro θ=90˚ [mm] 35
Obr. 3.23 Zatížením větrem ve směru θ=90˚ – sání [kN/m] 36
Obr. 5.1 Statické schéma konstrukce s jednou pevnou kloubovou podporou 38
Obr. 5.2 Statické schéma konstrukce se dvěma pevnými kloubovými podporami 39
Obr. 5.3 Reakce od vlastní tíhy – VAR1 [kN] 39
Obr. 5.4 Průběh normálových sil od vlastní tíhy - VAR1 [kN] 40
Obr. 5.5 Průběh posouvajících sil od vlastní tíhy - VAR1 [kN] 40
Obr. 5.6 Průběh momentů od vlastní tíhy - VAR1 [kNm] 40
Obr. 5.7 Svislá deformace konstrukce od vlastní tíhy - VAR1 [mm] 41
Obr. 5.8 Vodorovná deformace konstrukce od vlastní tíhy - VAR1 [mm] 41
Obr. 5.9 Celková deformace konstrukce od vlastní tíhy - VAR1 [mm] 41
Obr. 5.10 Maximální reakce od kombinací - VAR1 [kN] 42
Obr. 5.11 Obálka průběhu normálových sil od kombinací - VAR1 [kN] 42
Obr. 5.12 Obálka průběhu posouvajících sil od kombinací - VAR1 [kN] 42
Obr. 5.13 Obálka průběhu momentů od kombinací - VAR1 [kNm] 43
Obr. 5.14 Svislá deformace konstrukce od kombinací - VAR1 [mm] 43
Obr. 5.15 Vodorovná deformace konstrukce od kombinací - VAR1 [mm] 43
Obr. 5.16 Celková deformace konstrukce [mm] 44
Obr. 5.17 Reakce od vlastní tíhy – VAR2 [kN] 44
Obr. 5.18 Průběh normálových sil od vlastní tíhy – VAR2 [kN] 45
Obr. 5.19 Průběh posouvajících sil od vlastní tíhy – VAR2 [kN] 45
Obr. 5.20 Průběh momentů od vlastní tíhy – VAR2 [kNm] 45
Obr. 5.21 Svislá deformace konstrukce od vlastní tíhy – VAR2 [mm] 46
Obr. 5.22 Vodorovná deformace konstrukce od vlastní tíhy – VAR2 [mm] 46

Obr. 5.23 Celková deformace konstrukce od vlastní tíhy – VAR2 [mm] 46
Obr. 5.24 Maximální reakce od kombinací – VAR2 [kN] 47
Obr. 5.25 Obálka průběhu normálových sil od kombinací – VAR2 [kN] 47
Obr. 5.26 Obálka průběhu posouvajících sil od kombinací – VAR2 [kN] 47
Obr. 5.27 Obálka průběhu momentů od kombinací – VAR2 [kNm] 48
Obr. 5.28 Svislá deformace konstrukce od kombinací – VAR2 [mm] 48
Obr. 5.29 Vodorovná deformace konstrukce od kombinací – VAR2 [mm] 48
Obr. 5.30 Celková deformace konstrukce- VAR2 [mm] 49
Obr. 6.1 Řešená konstrukce s označením uzlů 50
Obr. 6.2 Základní soustava 51
Obr. 6.3 Zatížení pro 0.ZS – vlastní tíha [kN/m; kN] 53
Obr. 6.4 Průběh normálových sil od 0.ZS [kN] 57
Obr. 6.5 Průběh posouvajících sil od 0.ZS [kN] 57
Obr. 6.6 Průběh momentů od 0.ZS [kNm] 57
Obr. 6.7 Zatížení pro 1.ZS – jednotková síla [kN] 58
Obr. 6.8 Průběh normálových sil od 1.ZS [kN] 62
Obr. 6.9 Průběh posouvajících sil od 1.ZS [kN] 62
Obr. 6.10 Průběh momentů od 1.ZS [kNm] 62
Obr. 6.11 Zatížení pro 2.ZS - jednotková síla [kN] 63
Obr. 6.12 Průběh normálových sil od 2.ZS [kN] 67
Obr. 6.13 Průběh posouvajících sil od 2.ZS [kN] 67
Obr. 6.14 Průběh momentů od 2.ZS [kNm] 67
Obr. 6.15 Zatížení pro 3.ZS - jednotkové zatížení [kN] 68
Obr. 6.16 Průběh normálových sil od 3.ZS [kN] 72
Obr. 6.17 Průběh posouvajících sil od 3.ZS [kN] 72
Obr. 6.18 Průběh momentů od 3.ZS [kNm] 72
Obr. 6.19 Zatížení pro výpočet vnitřních sil [kNm; kN] 79
Obr. 6.20 Výsledný průběh normálových sil na konstrukci [kN] 84
Obr. 6.21 Výsledný průběh posouvajících sil na konstrukci [kN] 84
Obr. 6.22 Výsledný průběh momentů na konstrukci [kNm] 84
Obr. 6.23 Jednotkové zatížení v bodě „g“ ve směru počítaného posunu [kN] 85
Obr. 6.24 Průběh normálových sil od jednotkového zatížení v bodě „g“ [kN] 88
Obr. 6.25 Průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení v bodě „g“ [kN] 88
Obr. 6.26 Průběh momentů od jednotkového zatížení v bodě „g“ [kNm] 89
Obr. 6.27 Zatížení pro výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení [kN] 92
Obr. 6.28 Výsledný průběh normálových sil od jednotkového zatížení [kN] 96
Obr. 6.29 Výsledný průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení [kN] 96
Obr. 6.30 Výsledný průběh momentů od jednotkového zatížení [kNm] 96
Obr. 6.31 Jednotkové zatížení v bodě „b´“ ve směru počítaného posunu [kN] 98
Obr. 6.32 Průběh normálových sil od jednotkového zatížení v bodě „b´“ [kN] 102
Obr. 6.33 Průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení v bodě „b´“ [kN] 102
Obr. 6.34 Průběh momentů od jednotkového zatížení v bodě „b´“ [kNm] 102
Obr. 6.35 Zatížení pro výpočet vnitřních sil od jednotkového zatížení [kN] 106
Obr. 6.36 Výsledný průběh normálových sil od jednotkového zatížení [kN] 111
Obr. 6.37 Výsledný průběh posouvajících sil od jednotkového zatížení [kN] 111
Obr. 6.38 Výsledný průběh momentů od jednotkového zatížení [kNm] 111

11. SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Vybrané materiálové charakteristiky dřeva 12
Tab. 3.1 Výpočet zatížení od prvků krovu 15
Tab. 3.2 Výpočet zatížení od skladby S1 16
Tab. 3.3 Vypočet zatížení od skladby S2 17
Tab. 3.4 Výpočet zatížení od skladby S3 18
Tab. 3.5 Výpočet zatížení od skladby S4 19
Tab. 3.6 Výpočet zatížení od střešních žlabů 20
Tab. 3.7 Výpočet užitného zatížení 21
Tab. 3.8 Tvarové součinitele zatížení sněhem[2] 23
Tab. 3.9 Doporučené hodnoty součinitele C_e pro různé typy krajiny[2] 24
Tab. 3.10 Výpočet zatížení od sněhu 25
Tab. 3.11 Základní rychlost větru[4] 27
Tab. 3.12 Kategorie terénů a jejich parametry[3] 28
Tab. 3.13 Hodnoty součinitele vnějšího tlaku pro θ=0˚[4] 30
Tab. 3.14 Výpočet liniového zatížení větrem ve směru θ = 0˚ 32
Tab. 3.15 Hodnota součinitele vnějšího tlaku pro θ=90˚[4] 35
Tab. 3.16 Výpočet liniového zatížení větrem ve směru θ = 90˚ 36
Tab. 6.1 Výpočet charakteristického zatížení od 0.ZS 52
Tab. 7.1 Porovnání reakcí 113
Tab. 7.2 Porovnání vnitřních sil na krokvích 113
Tab. 7.3 Porovnání vnitřních sil hlavních kleštin 113
Tab. 7.4 Porovnání vnitřních sil vedlejších kleštin 113
Tab. 7.5 Porovnání vybraných posunů 114