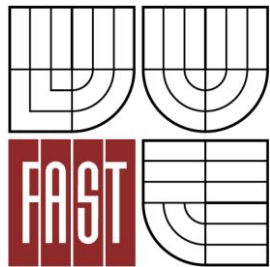




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÉ ŘEŠENÍ DŘEVĚNÉ STŘEŠNÍ KONSTRUKCE

STATIC ANALYSIS OF THE TIMBER ROOF STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR SEDLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ KYTÝR, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Petr Sedlák

Název Statické řešení dřevěné střešní konstrukce

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Kytýr, CSc.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2012

Datum odevzdání bakalářské práce 24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] Bittnar, Z., Šejnoha, J. Numerické metody mechaniky 1, 2. Vydavatelství ČVUT, Praha: 1992.
- [2] Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. FEM – Principy a praxe metody konečných prvků. Vydavatelství Computer Press, Praha: 1997.
- [3] Servít, R. a kol. Teorie pružnosti a plasticity I, II. SNTL/ALFA, Praha: 1981, 1984.
- [4] Straka, B. Navrhování dřevěných konstrukcí. Skriptum, CERM, Brno: 1996.
- [5] Theory Reference – ANSYS, release 12.0.

Zásady pro vypracování

Pro již realizovanou dřevěnou konstrukci zastřešení haly tělocvičny při Základní škole TGM v Bílovci vytvořit různé 2D numerické modely obloukového vazníku a provést statické řešení programovým systémem ANSYS při uplatnění současných normových předpisů. Výsledky získané z těchto modelů porovnat s původním statickým výpočtem provedeným klasickým způsobem.

Předepsané přílohy

.....
doc. Ing. Jiří Kytýr, CSc.
Vedoucí bakalářské práce



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Kytýr, CSc.
Autor práce	Petr Sedlák
Škola	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta	Stavební
Ústav	Ústav stavební mechaniky
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Název práce	Statické řešení dřevěné střešní konstrukce
Název práce v anglickém jazyce	Static Analysis of the Timber Roof Structure
Typ práce	Bakalářská práce
Přidělovaný titul	Bc.
Jazyk práce	Čeština
Datový formát elektronické verze	.pdf
Anotace práce	Bakalářská práce se zabývá numerickým modelováním a posouzením již realizované dřevěné konstrukce zastřešení haly tělocvičny Základní školy TGM v Bílovci. Studie je zpracována v programovém systému ANSYS. Jsou vytvořeny různé 2D numerické modely i 3D model, u kterých je provedeno posouzení podle současných normových předpisů.
Anotace práce v anglickém jazyce	This thesis with the numerical modeling and assessment has been carried timber roof structure of the gymnasium hall of the elementary school TGM at Bílovec. The study was realized in program system ANSYS. They are created a variety 2D and 3D numerical models which are assessed according to current normative regulations.
Klíčová slova	Statika, dřevo, střecha, konstrukce, vazník, pevnost, anizotropie, numerický model, ANSYS, posouzení
Klíčová slova v anglickém jazyce	Statics, Wood, Roof, Structure, Truss, Strength, Anisotropy, Numerical Model, ANSYS, Assessment

Bibliografická citace VŠKP

SEDLÁK, Petr. *Statické řešení dřevěné střešní konstrukce*. Brno, 2013. 67 s.,
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební
mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Kytýr, CSc.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá numerickým modelováním a posouzením již realizované dřevěné konstrukce zastřešení haly tělocvičny Základní školy TGM v Bílovci. Studie je zpracována v programovém systému ANSYS. Jsou vytvořeny různé 2D numerické modely i 3D model, u kterých je provedeno posouzení podle současných normových předpisů.

Klíčová slova

Statika, dřevo, střecha, konstrukce, vazník, pevnost, anizotropie, numerický model, ANSYS, posouzení

Abstract

This thesis with the numerical modeling and assessment has been carried timber roof structure of the gymnasium hall of the elementary school TGM at Bílovec. The study was realized in program system ANSYS. They are created a variety 2D and 3D numerical models which are assessed according to current normative regulations.

Keywords

Statics, Wood, Roof, Structure, Truss, Strength, Anisotropy, Numerical Model, ANSYS, Assessment

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2013

.....
podpis autora

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 23.5.2013

.....
podpis autora
Petr Sedlák

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Kytýrovi, CSc. za trpělivost a odborné vedení mé práce. Dále děkuji panu doc. Ing. Bohumilu Strakovi, CSc. za poskytnutí podkladů a cenné rady.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům nejen za podporu během studia, ale také za to, že mi umožnili tuto školu studovat.

Obsah

1.	Úvod	3
2.	Dřevo ve stavebnictví	7
2.1.	Druhy dřeva pro stavební konstrukce	7
2.2.	Vady dřeva	7
2.3.	Výhody a nevýhody dřeva	9
2.4.	Požadavky na dřevěné konstrukce	9
2.5.	Spoje dřevěných konstrukcí	10
3.	Vlastnosti dřeva	13
3.1.	Vybrané fyzikální vlastnosti	13
3.2.	Vybrané mechanické vlastnosti	14
3.2.1.	Pružnost	14
3.2.2.	Pevnost	16
3.2.3.	Plasticita	18
3.2.4.	Houževnatost	19
3.2.5.	Tvrдость	20
3.3.	Ortotropie dřeva	20
3.3.1.	Tenzor napětí	20
3.3.2.	Tenzor deformace	21
3.3.3.	Hookův zákon	22

4.	Řešená dřevěná střešní konstrukce	24
4.1.	Geometrické uspořádání	25
4.2.	Statické působení	26
4.3.	Výpočtové 2D numerické modely	28
4.4.	Výpočtový 3D numerický model	29
4.5.	Použité konečné prvky	30
4.6.	Charakteristika průřezů	31
4.7.	Zatěžovací stavy	32
4.8.	Kombinace zatěžovacích stavů	36
5.	Výsledky řešení střešní konstrukce	37
5.1.	Posouzení průřezů na mezní stav únosnosti	37
5.2.	Posouzení vazníku na mezní stav použitelnosti	51
5.3.	Vyhodnocení výsledků 3D modelu	56
5.4.	Posouzení spoje	61
6.	Závěr	63
7.	Použitá literatura	64
8.	Seznam symbolů	66

1. Úvod

Dřevo patří vedle přírodního kamene k nejstarším a nejoblíbenějším přírodním materiálům s různým využitím. Bylo pravděpodobně využíváno již v pravěku, i když hmotné doklady se nedochovaly [28]. Představuje přírodní materiál rostlinného původu. Dřevo je pro svůj přírodní charakter, přirozenou kresbu, fyzikální vlastnosti, estetický vzhled apod. žádaným prvkem při zlepšování životního prostředí člověka [4]. Průmyslově se využívá především dřevo kmene stromů, minimálně se používá dřevo větví. Dřevěné konstrukce patří k nejstarším typům konstrukcí a prošly dlouhým vývojem.

Ve světě ale i v České republice je řada staveb ze dřeva, které stojí za povšimnutí. Nejstarší a největší dřevěnou budovou na světě je chrám Tódaidži v Japonsku (obr. 1.1) přibližně z 8. století [23]. Konstrukce je z obrovských trámů nesoucí dřevěnou střechu. Stavba měří na délku 58 m, na šířku 51 m a na výšku má okolo 50 m.



Obr. 1.1 Chrám Tódaidži v Japonsku [21]

Naopak největší dřevěnou konstrukcí světa je podle [32] Metropol Parasol (obr. 1.2 a obr. 1.3) na adrese Plaza de la Encarnación, 40003 – Sevilla ve Španělsku. Dřevěná konstrukce “deštníku“ byla vyrobena z vrstveného dřeva. Deštník je složen z celkem 3400 dřevěných elementů o šířce 68 – 311 mm a délce 1,5 – 16,5 m. Bylo použito 11000 kusů spojovacích prostředků vážících od 2,9 do 70 kg.



Obr. 1.2 Metropol Parasol v Seville – pohled zespodu [32]



Obr. 1.3 Metropol Parasol v Seville – pohled zeshora [36]

Další zajímavou dřevostavbou a nejvyšší dřevěnou horskou dráhou v Evropě je horská dráha Heide Parku v Německu (obr. 1.4.). Výška je přibližně 60 metrů a rychlost pojezdu vozíků zde dosahuje až 120 km/h. Její nejstrmější část činí 61° [33].



Obr. 1.4 Dřevěná horská dráha – Heide Park [33]

Velmi pěkná je i lávka pro pěší a cyklisty přes kanál Main – Donau v Essingu v Německu [9] postavená v roce 1987, viz obr 1.5.



Obr. 1.5 Lávka přes kanál Main – Donau [27]

Na obr. 1.6 je jedna z unikátních a technologicky náročných dřevěných staveb v České republice. Jedná se o nejvyšší dřevěnou rozhlednu v Evropě postavenou u obce Bohdaneč ve středních Čechách [31]. Výška činí 52,2 m.



Obr. 1.6 Rozhledna Bohdanka u Bohdanče [31]

Cíl práce

Cílem bakalářské práce je pro již realizovanou dřevěnou konstrukci zastřešení haly tělocvičny při Základní škole TGM v Bílovci vytvořit různé 2D numerické modely obloukového vazníku a provést pro různé kombinace zatížení statické řešení programovým systémem ANSYS. Byl vytvořen i 3D numerický model. Výsledky získané z těchto modelů byly vzájemně porovnány a srovnány s hodnotami získanými z původního návrhu a výkresů provedeného klasickým způsobem [14].

2. Dřevo ve stavebnictví

Dřevo jako stavební materiál je ve stavebnictví velmi často používán. Dřevo a materiály na bázi dřeva vyskytující se u stavebních konstrukcí musí splňovat určité požadavky (pevnost, trvanlivost, ap.) [12]. V současné době se dřevo používá zejména na:

- montované rodinné domy,
- lehké střešní konstrukce,
- vícepodlažní budovy (bytové domy, administrativní budovy, školy),
- sportovní haly,
- církevní objekty (kostely),
- mosty a lávky pro pěší,
- smíšené konstrukce ze dřeva, oceli a betonu.

2.1. Druhy dřeva pro stavební konstrukce

Při použití dřeva pro stavební konstrukce upřednostňujeme zejména dostupnost, tvrdost, opracovatelnost, izolační vlastnosti či odolnost vůči chemickému prostředí [24]. Pro stavební konstrukce jsou nejpoužívanější jehličnaté dřeviny. V tab. 2.1 je procentuální zastoupení v přírodě a způsob použití jehličnatých dřevin v České republice.

Tab. 2.1 Způsob použití a procentuální zastoupení v ČR [9]

Dřevina	Zastoupení	Použití
smrk	54,1 %	trámy, bednění, podbití
borovice	17,5 %	prostředí se střídáním vlhka a sucha
jedle	0,9 %	interiéry
buk	6,4 %	dýhy a překližky
dub	6,0 %	Obklady, dřevěné hmoždíky, kolíky

2.2. Vady dřeva

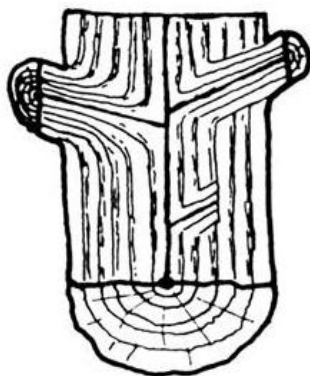
Vady dřeva zhoršují mechanické vlastnosti, především pevnost dřeva v tahu. Omezují a zabraňují použití dřeva pro daný účel jeho použití. Vady dřeva se rozdělují na [22]:

- růstové vady,
- výrobní vady,
- biologická poškození.

Vybrané růstové vady

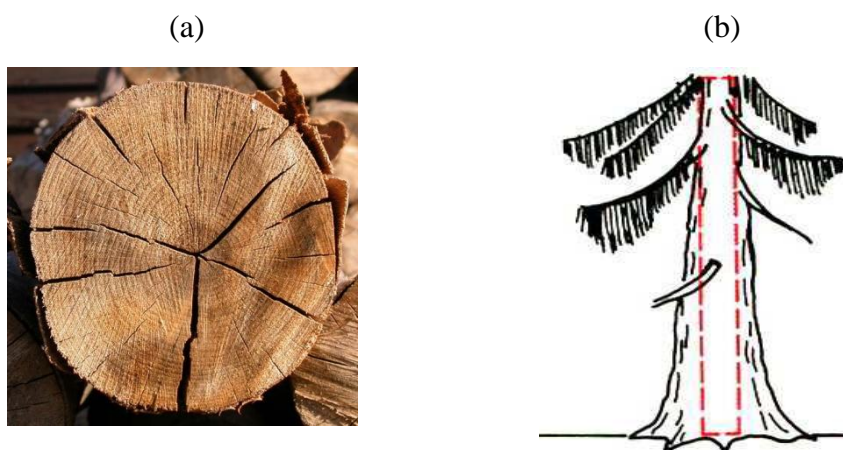
Mezi růstové vady patří např. suky, trhliny, vady tvaru kmene, poškození houbami.

- *Suky* (obr. 2.1) jsou základy živých větví nebo větví odumřelých během růstu stromu. Tvorba suku je přirozenou vlastností dřeviny a souvisí s tvorbou koruny stromu [11].



Obr. 2.1 Schéma tvorby suku [29]

- *Trhliny* vznikají vlivem sesychání dřeva, při růstu stromu, při těžbě a manipulaci. Mohou se vyskytovat v radiálním (obr. 2.2a) a tangenciálním směru [11].
- *Vady tvaru kmene* – do této skupiny patří vady deformující ideální válcovitý tvar kmene [11]. Jedná se o křivost, sbíhavost (obr. 2.2b), boulovitost, náběhy kořenů, apod.



Obr. 2.2 Růstové vady: (a) trhliny ve dřevu vlivem sesychání [26], (b) sbíhavost [30]

Výrobní vady

Výrobní vady jsou vady, které vzniknout např. při těžbě dřeva, manipulaci nebo uskladňování. Do výrobních vad patří [22]:

- sklon vláken (šikmý řez),
- vytrhaná vlákna,
- oblina.

Biologická poškození

Proti biologickému poškození je dřevo třeba chránit nástřiky nebo nátěry. Mezi biologická poškození náleží:

- dřevokazní škůdci,
- plísně,
- dřevokazné houby,

2.3. Výhody a nevýhody dřeva

Dřevo jako přírodní materiál rostlinného původu má své výhody, ale i nedostatky. Mezi výhody patří [11]:

- pružnost, pevnost a lehkost materiálu,
- dobré tepelně izolační vlastnosti,
- schopnost přenášet velké zatížení,
- schopnost tlumit vibrace a možnost spojování,
- výborné rezonanční vlastnosti,
- estetický vzhled pro dekorační vlastnosti.

Naopak mezi nedostatky dřeva se zahrnují [11]:

- změna vlastností,
- rozdílné vlastnosti v různých směrech (anizotropie),
- přítomnost vad dřeva,
- nestejnorodá struktura a hořlavost.

2.4. Požadavky na dřevěné konstrukce

Dřevěná konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby byla schopna užívání k požadovanému účelu, a to se zřetelem k předpokládané životnosti a pořizovacím nákladům. Dále musí odolat všem zatížením a vlivům, jejichž výskyt se dá během provádění a užívání očekávat [9].

Dřevěná konstrukce je spolehlivá, jestliže je:

- dostatečně únosná – namáhání prvků a spojů nepřekročí přípustné hodnoty,
- tuhá – přetvoření konstrukce a jejích částí nepřekročí přípustné mezní hodnoty,

- polohově stabilní – dostatečná bezpečnost proti překlolení, posunutí a nadzdvihnutí.

Mezní stavy

Mezní stavy jsou takové stavy, kdy po jejich překročení konstrukce již nesplňuje návrhové podmínky spolehlivosti. Rozlišují se mezní stavy únosnosti (únosnost, překlolení, posunutí a nadzdvihnutí konstrukce) a mezní stavy použitelnosti (přetvoření a kmitání konstrukce).

Ověření spolehlivosti konstrukce je založeno na metodě dílčích součinitelů zatížení a materiálů [9].

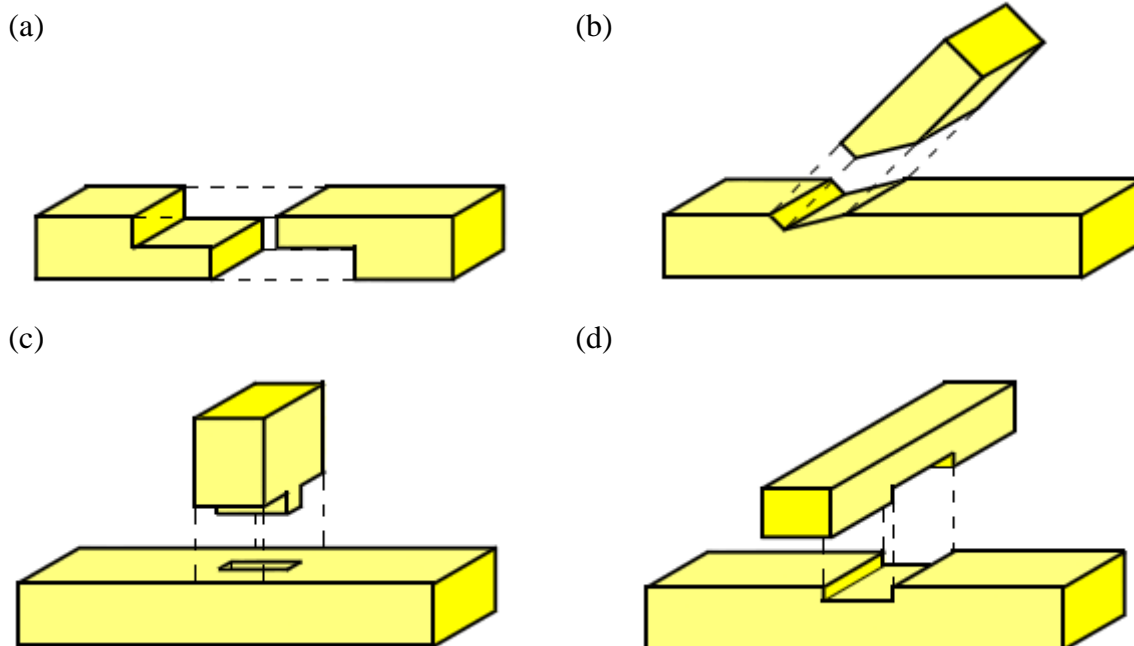
2.5. Spoje dřevěných konstrukcí

Konstrukční prvky dřevěných konstrukcí spojujeme pomocí tesařských technologií, mechanickými spojovacími prostředky nebo lepením. Spoje dřevěných konstrukcí tedy jsou [8]:

- tesařské spoje,
- mechanické spoje,
- lepené spoje.

Tesařské spoje

Tesařské spoje jsou poměrně málo únosné, jejich výroba je pracná a spojena se značnou ztrátou dřeva. Jedná se zpravidla o kontaktní spoje, kde jsou síly přenášeny tlakovým kontaktem [8]. Na obr. 2.3 jsou znázorněny základní typy tesařských spojů.



Obr. 2.3 Základní typy tesařských spojů: (a) přeplátování, (b) zapuštění, (c) čepování, (d) karpování [13]

Mechanické spoje

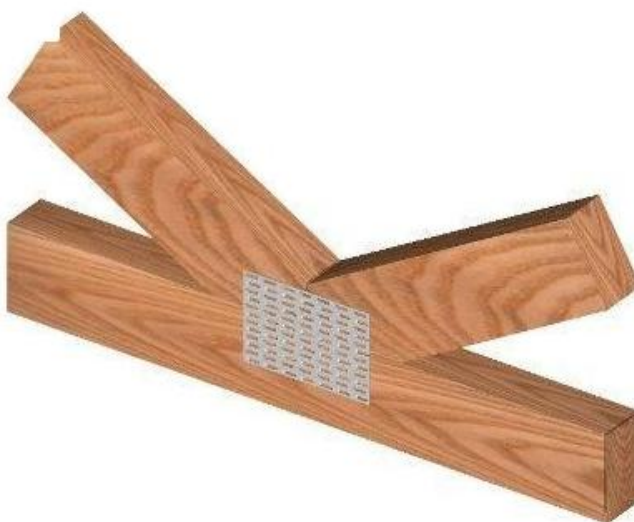
Mechanické spojovací prostředky rozdělujeme podle přenosu sil ve spoji na [9]:

- *spojovací prostředky kolíkového typu*, které jsou při přenosu sil ohýbány a zatlačovány do dřeva – hřebíky (obr. 2.4), sponky, svorníky, kolíky, vruty)



Obr. 2.4 Hřebíkový spoj se styčníkovým plechem a se svorníky [14]

- *spojovací prostředky povrchového typu*, které jsou zalisovány do dřeva a k přenosu sil dochází na povrchu konstrukčních prvků – desky s prolisovanými trny (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Deska s prolisovanými trny [37]

2.5.3. Lepené spoje

Používají se především u lepeného lamelového dřeva. Lepené lamelové dřevo (obr. 2.6) se lepí z prken nebo fošen tloušťky max. 45 mm [9]. Délka prvků se běžně pohybuje v rozmezí 1,5 m až 5,0 m. Typický je zubovitý spoj jednotlivých kusů řeziva, pomocí kterého se vytváří tzv. nekonečná lamela.



Obr. 2.6 Lepené lamelové dřevo [35]

3. Vlastnosti dřeva

V této práci jsem do vlastností dřeva zahrnul jen vybrané fyzikální vlastnosti a vybrané mechanické vlastnosti.

3.1. Vybrané fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti můžeme zkoumat bez narušení struktury a celistvosti materiálu [22]. Mezi fyzikální vlastnosti patří hustota, vlhkost, propustnost, tepelné vlastnosti a povrchové vlastnosti.

Hustota

Hustota je výrazně ovlivněna vlhkostí dřeva. V tab. 3.1 je uvedeno porovnání hustot vybraných typů dřevin.

Tab. 3.1 Hustota dřeva [10]

Dřevina	Hustota dřeva [kg/m ³]		
	čerstvé	na vzduchu vyschlé	uměle dosušené
borovice	700	520	510
buk	990	720	570
dub	1000	760	660
jedle	100	460	420
smrk	740	470	440

Vlhkost

Vlhkost je důležitou vlastností při volbě použitelnosti dřeva. Vyjadřuje se v procentech hmotnosti dřeva. Je v rovnováze s vlhkostí vzduchu v okolí. Vlhkost zjišťujeme elektrickými vlhkoměry pro orientační měření, pro přesnější měření se používá váhová a destilační metoda.

Vlhkost absolutní – množství vody ve dřevě vyjádřené v procentech z hmotnosti absolutně suchého dřeva.

Vlhkost relativní – množství vody ve dřevě vyjádřené v procentech z hmotnosti dřeva vlhkého.

Propustnost

Schopnost dřeviny propouštět vodu a vzduch. Propustnost vody je dána umístěním kapilár v kmeni stromu a směrem kapilárních vláken [10].

Tepelné vlastnosti

Patří sem tepelná vodivost a teplotní délková roztažnost. Tepelná vodivost dřeva je poměrně malá z důvodu malé objemové hmotnosti (dřevo je tepelný izolant). Součinitel teplotní délkové roztažnosti je nízký a uvádí se hodnotou změny jednotkové

délky při zvýšení teploty o 1 °C. Např. u smrkového dřeva rovnoběžně s vlákny je hodnota součinitele teplotní délkové roztažnosti $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a kolmo na vlákna $34,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [10].

Povrchové vlastnosti

Sleduje se barva, lesk, textura a i vůně dřeva.

3.2. Vybrané mechanické vlastnosti

Do této skupiny vlastností patří zejména pružnost a pevnost. Dřevo má při relativně nízké hmotnosti dobrou pevnost. Podle [11] mechanické vlastnosti dělíme na dvě skupiny, a to na základní a odvozené.

Mezi základní vlastnosti patří pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Mezi odvozené vlastnosti zařazujeme např. tvrdost.

3.2.1. Pružnost

Pružnost dřeva definujeme jako schopnost dosáhnout původní tvar po uvolnění vnějších sil. Pružnost určují parametry [11]:

- modul pružnosti (E),
- Poissonův součinitel (ν),
- mez úměrnosti (σ),
- energie pružné deformace (W_p).

Modul pružnosti

Vyjadřuje vnitřní odpor proti pružné deformaci. Rozlišuje se modul pružnosti E při normálovém namáhání (tah, tlak, ohyb) a modul pružnosti G při tangenciálním namáhání (kroucení, smyk). Všeobecně se může napsat

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}, \quad (3.1)$$

Modul pružnosti v tahu a tlaku E se konkrétně určí

$$E = \frac{F l}{A \Delta l}, \quad (3.2)$$

kde Δl je změna délky [m], l je původní délka [m], na které se měřila deformace, A je plocha [m²], na které působí síla F [N].

Při smyku je vztah mezi příslušným napětím a poměrným zkosením z počátku lineární a lze ho vyjádřit vztahem

$$\tau = G \gamma, \quad (3.3)$$

kde modul pružnosti ve smyku $G = \frac{d\tau}{d\gamma}$. (3.4)

Platí $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, (3.5)

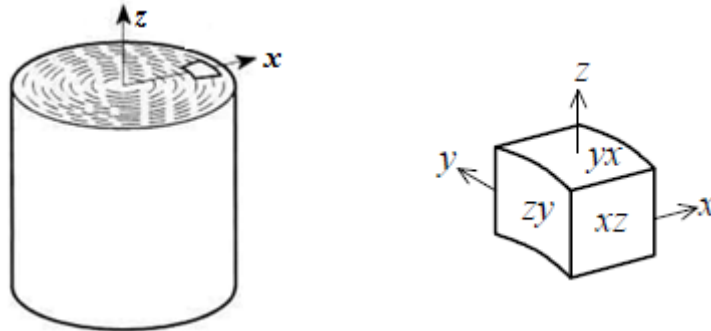
kde E je modul pružnosti v tahu a tlaku, ν je Poissonův součinitel.

Poissonův součinitel

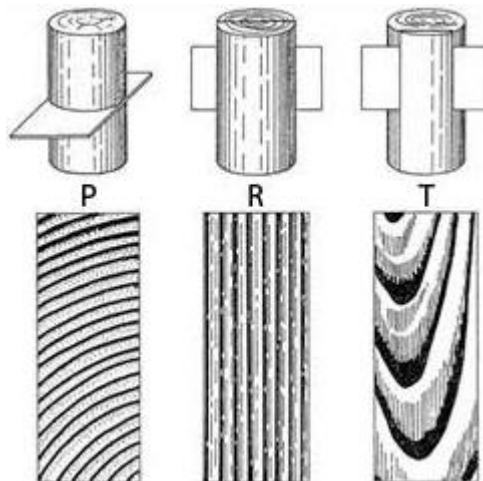
Je důležitou charakteristikou pružnosti dřeva a využívá se především při objemových změnách způsobených vlivem mechanických zatížení. Vyjadřuje poměr příčného přetvoření k podélnému přetvoření. Stanoví se

$$\nu_{yz} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad \text{a} \quad \nu_{xz} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \quad (3.6)$$

kde ε_y je příčné poměrné přetvoření v tangenciálním směru, ε_x je příčné poměrné přetvoření v radiálním směru a ε_z je příčné poměrné přetvoření ve směru vláken. Hlavní osy a roviny dřeva (obr. 3.1) a směry řezů (obr. 3.2).



Obr. 3.1 Hlavní osy a hlavní roviny dřeva [12]



Obr. 3.2 Hlavní směry řezů dřeva:

P – příčný řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez [25]

3.2.2. Pevnost

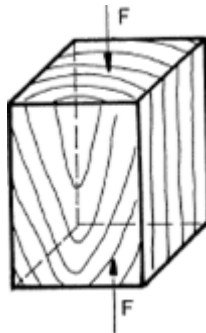
Pevností dřeva rozumíme odpor nebo odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Číselně pevnost vyjadřujeme napětím, při kterém se poruší jeho soudržnost (tab. 3.2). Podle způsobu zatížení rozdělujeme [11]:

- pevnost v tlaku,
- pevnost v tahu,
- pevnost v ohybu,
- pevnost v kroucení,
- pevnost ve smyku.

Pevnost v tlaku

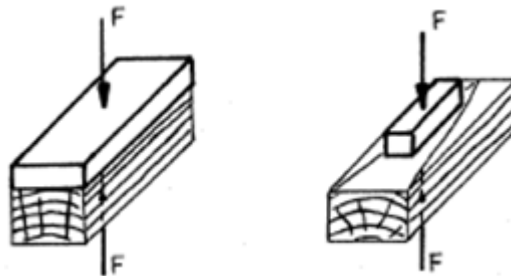
S ohledem na ortotropii dřeva rozdělujeme pevnost dřeva v tlaku na:

- pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny (obr. 3.3),



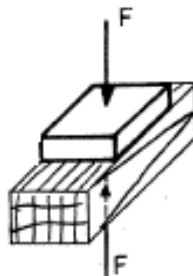
Obr. 3.3 Tlak rovnoběžně s vlákny

- pevnost v tlaku kolmo na vlákna v radiálním směru (obr. 3.4),



Obr. 3.4 Tlak kolmo na vlákna v radiálním směru

- pevnost v tlaku kolmo na vlákna v tangenciálním směru (obr. 3.5).

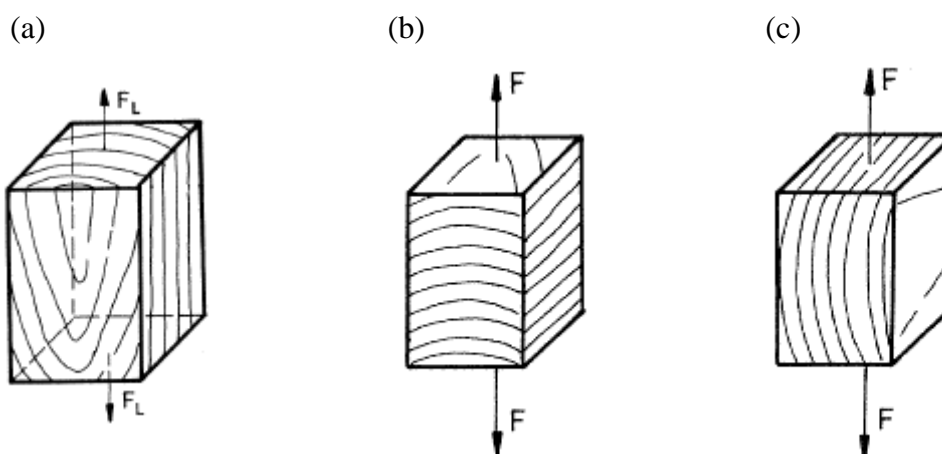


Obr. 3.5 Tlak kolmo na vlákna v tangenciálním směru

Pevnost v tahu

Podobně jako u tlaku tak i pevnost v tahu rozdělujeme na [11]:

- pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny (obr. 3.6a),
- pevnost v tahu kolmo na vlákna v radiálním směru (obr. 3.6b),
- pevnost v tahu kolmo na vlákna v tangenciálním směru (obr. 3.6c).

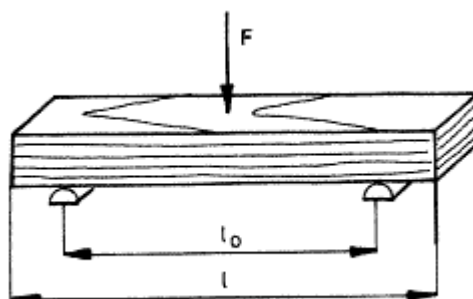


Obr. 3.6 Pevnost v tahu: (a) rovnoběžně s vlákny, (b) kolmo na vlákna v radiálním směru, (c) kolmo na vlákna v tangenciálním směru

Pevnost v ohybu

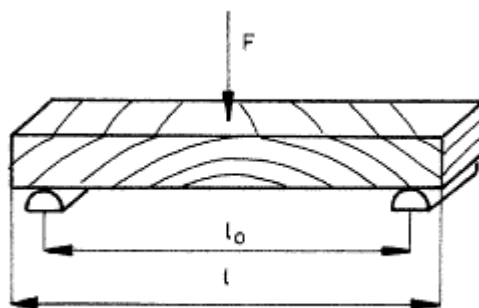
S ohledem na průběh vláken rozdělujeme pevnost v ohybu na [11]:

- pevnost v ohybu kolmo na vlákna v radiálním nebo tangenciálním směru (obr. 3.7),



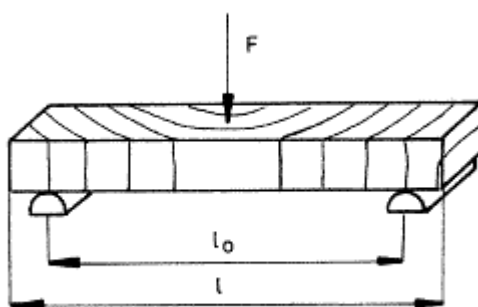
Obr. 3.7 Ohyb kolmo na vlákna v radiálním směru

- pevnost v ohybu s průběhem vláken příčně k ose tělesa (obr. 3.8),



Obr. 3.8 Ohyb kolmo na osu tělesa

- Pevnost v ohybu rovnoběžně s vlákny (obr. 3.9).



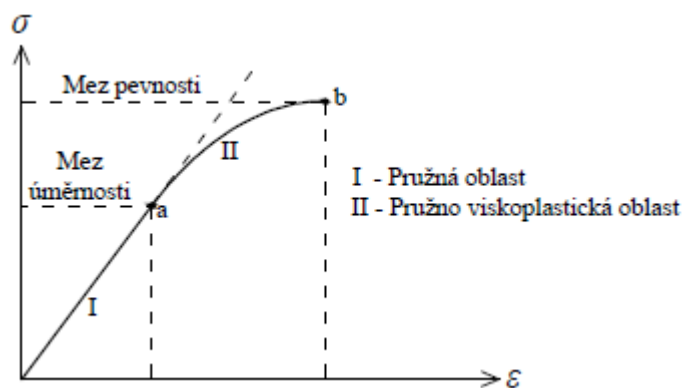
Obr. 3.9 Ohyb rovnoběžně s vlákny

Tab. 3.2 Pevnost vybraných dřevin [22]

Dřevina	Modul pružnosti (při ohybu) [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tahu		Pevnost v tlaku		Pevnost ve smyku [MPa]
			podélná [MPa]	příčná [MPa]	podélná [MPa]	příčná [MPa]	
borovice	12000	100	104	3,0	55	7,7	10,0
buk	16000	123	135	7,0	62	9,5	8,0
dub	13000	110	90	4,0	65	11,0	11,0
jedle	11000	73	84	2,3	47	-	5,0
smrk	11000	78	90	2,7	50	5,8	6,7

3.2.3. Plasticita

Plasticita je schopnost dřeva měnit vlivem vnějších sil svůj tvar bez zřejmého vnějšího porušení, plasticky se deformovat před zlomem. Plastická deformace dřeva se při krátkodobém zatížení začíná projevovat tehdy, když napětí překročí mez úměrnosti (obr. 3.10) [11].

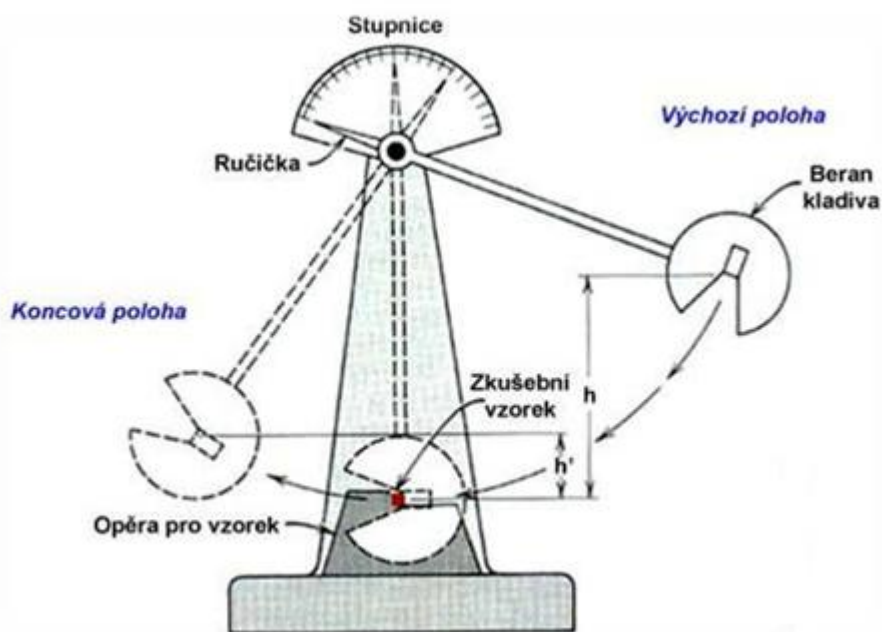


Obr. 3.10 Diagram napětí – poměrné přetvoření

3.2.4. Houževnatost

Houževnatost dělíme na statickou a rázovou. Statická houževnatost dřeva je mechanická vlastnost, která představuje mechanickou energii spotřebovanou na vznik plastické deformace [11]. Rázová houževnatost (tab. 3.3) je schopnost dřeva absorbovat práci rázovým pohybem. Cílem tohoto namáhání je zjistit velikost práce, která se spotřebovala na zlomení dřeva za daných podmínek.

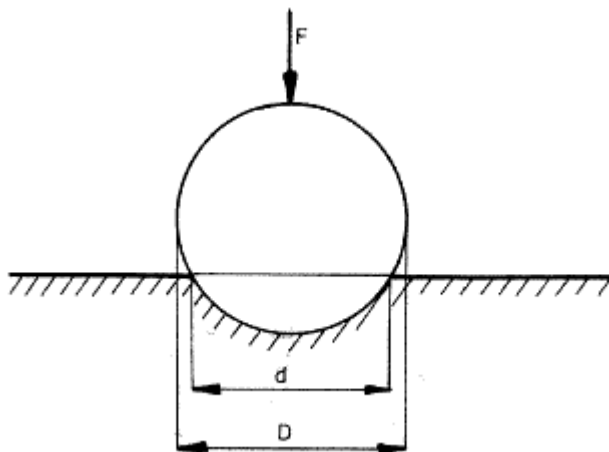
Pro zjištění rázové houževnatosti se používá Charpyho kladivo (obr. 3.11).



Obr. 3.11 Schéma Charpyho kladiva [34]

3.2.5. Tvrdost

Tvrdostí rozumíme schopnost dřeva klást odpor proti vnikání jiného tělesa do jeho struktury (tab. 3.3). Tvrdost stanovujeme např. Brinellovou zkouškou (obr. 3.12). Ocelovou kuličku o průměru $D = 10$ mm vtlačujeme do dřeva pod danou sílu, která se určuje podle tvrdosti dřeviny.



Obr. 3.12 Schéma zkoušky Brinellovoy tvrdosti [11]

Tab. 3.3 Houževnatost a tvrdost vybraných dřevin [22]

Dřevina	Rázová houževnatost [J/cm ²]	Tvrdost dřeva [MPa] při vlhkosti					
		čelní		radiální		tangenciální	
		12%	> 30%	12%	> 30%	12%	> 30%
borovice	4	28,5	13,5	24	11	25	11,5
buk	10	61	36,5	43,5	25,5	44,5	26,5
dub	6	67,5	40	56	33,5	49	29
smrk	4,6	26	12	18	8,5	18,5	8,5

3.3. Ortotropie dřeva

Materiál dřeva vykazuje ortotropní vlastnosti, kde mechanické vlastnosti se liší ve směru tří vzájemně kolmých os. Pro určení ortotropního materiálu je třeba 9 konstant.

3.3.1. Tenzor napětí

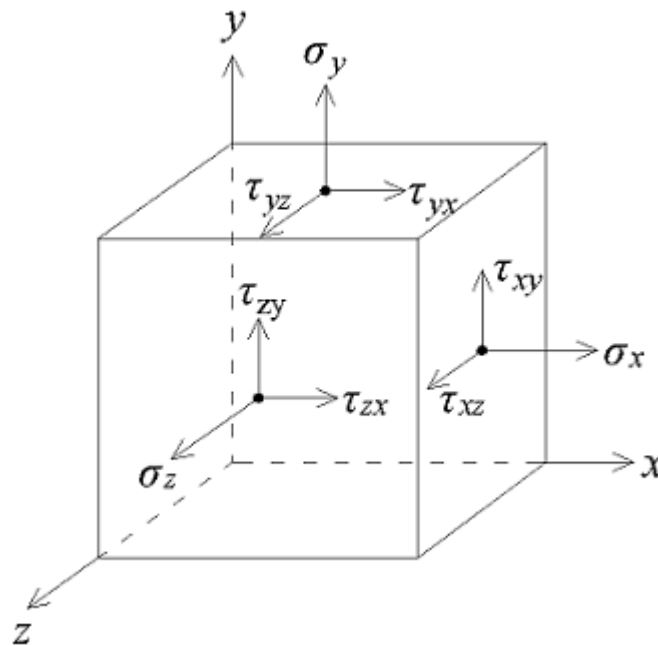
Tenzor napětí

$$[\mathbf{T}_\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

tvoří devět složek pole napětí. Při platnosti věty o vzájemnosti smykových napětí (obr. 3.13) je tenzor napětí symetrický. Jedná se o tři normálové složky σ_x , σ_y a σ_z a tři smykové složky τ_{xy} , τ_{xz} a τ_{yz} [5].

Těchto šest nezávislých složek napětí se dá zapsat do sloupcové matice

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (3.8)$$



Obr. 3.13 Hlavní roviny a plochy složek napětí

3.3.2. Tenzor poměrných přetvoření

Tenzor poměrných přetvoření

$$[\mathbf{T}_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

tvoří devět složek pole poměrných přetvoření. Podobně k (3.8) lze zapsat tři normálové složky ε_x , ε_y a ε_z a tři smykové složky γ_{xy} , γ_{xz} a γ_{yz} do sloupcové matice [5].

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (3.10)$$

kde γ je zkosení a ε poměrné přetvoření.

3.3.3. Hookův zákon

Při jednoosé napjatosti se napětí σ_x vypočítá,

$$\sigma_x = E_x \varepsilon_x, \quad (3.11)$$

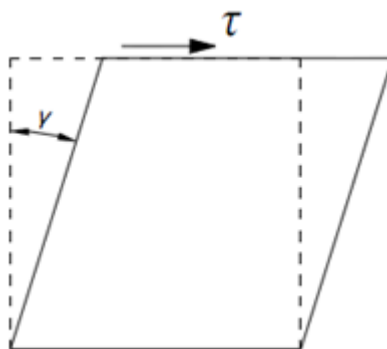
kde E_x je modul pružnosti v tahu a tlaku ve směru osy x , ε_x je poměrné přetvoření ve směru osy x . Odpovídající deformace se zapsat jako

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} = \frac{1}{E_x} \sigma_x. \quad (3.12)$$

Pro poměrné zkosení (obr. 3.14) lze podobně k (3.11) zapsat vztah

$$\tau = G \gamma, \quad (3.13)$$

kde τ je smykové napětí, G modul pružnosti ve smyku a γ je zkosení.



Obr. 3.14 Zkosení způsobené vlivem smykového napětí

Zbývající normálové složky poměrného přetvoření nejsou nulové, ale v důsledku příčné kontrakce budou mít opačné znaménko a jejich velikost bude násobena Poissonovým součinitelem ν [5]:

$$\varepsilon_y = -\nu_{xy} \varepsilon_x = -\frac{1}{E_x} \nu_{xy} \sigma_x, \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_z = -\nu_{xz} \varepsilon_x = -\frac{1}{E_x} \nu_{xz} \sigma_x \quad (3.15)$$

Po sečtení všech složek poměrného přetvoření se získají výrazy

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x} (\sigma_x - \nu_{xy} \sigma_y - \nu_{xz} \sigma_z), \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E_y} (-\nu_{yx} \sigma_x + \sigma_y - \nu_{yz} \sigma_z), \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_z} (-\nu_{zx} \sigma_x - \nu_{zy} \sigma_y + \sigma_z). \quad (3.18)$$

Takto vyjádřené složky poměrného přetvoření se dají zapsat maticovou formou

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{C}] \{\boldsymbol{\sigma}\}, \quad (3.19)$$

kde $[\mathbf{C}]$ je matice pružné poddajnosti materiálu [5].

Po rozepsání je

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & -\frac{\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

Současně musí být splněny podmínky

$$\begin{aligned} \frac{\nu_{xy}}{E_y} &= \frac{\nu_{yx}}{E_x}, \\ \frac{\nu_{xz}}{E_z} &= \frac{\nu_{zx}}{E_x}, \\ \frac{\nu_{yz}}{E_z} &= \frac{\nu_{zy}}{E_y}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

4. Řešená dřevěná střešní konstrukce

Posuzovanou stavbou je již realizovaná dřevěná konstrukce zastřešení haly tělocvičny Základní školy TGM v Bílovci (obr. 4.1 a obr. 4.2). Konstrukci zastřešení tvoří trojkloubové příhradové oblouky o běžném rozpětí 59 m (obr. 4.3). Veškeré podklady poskytl doc. Ing. Bohumil Straka, CSc. z Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí.



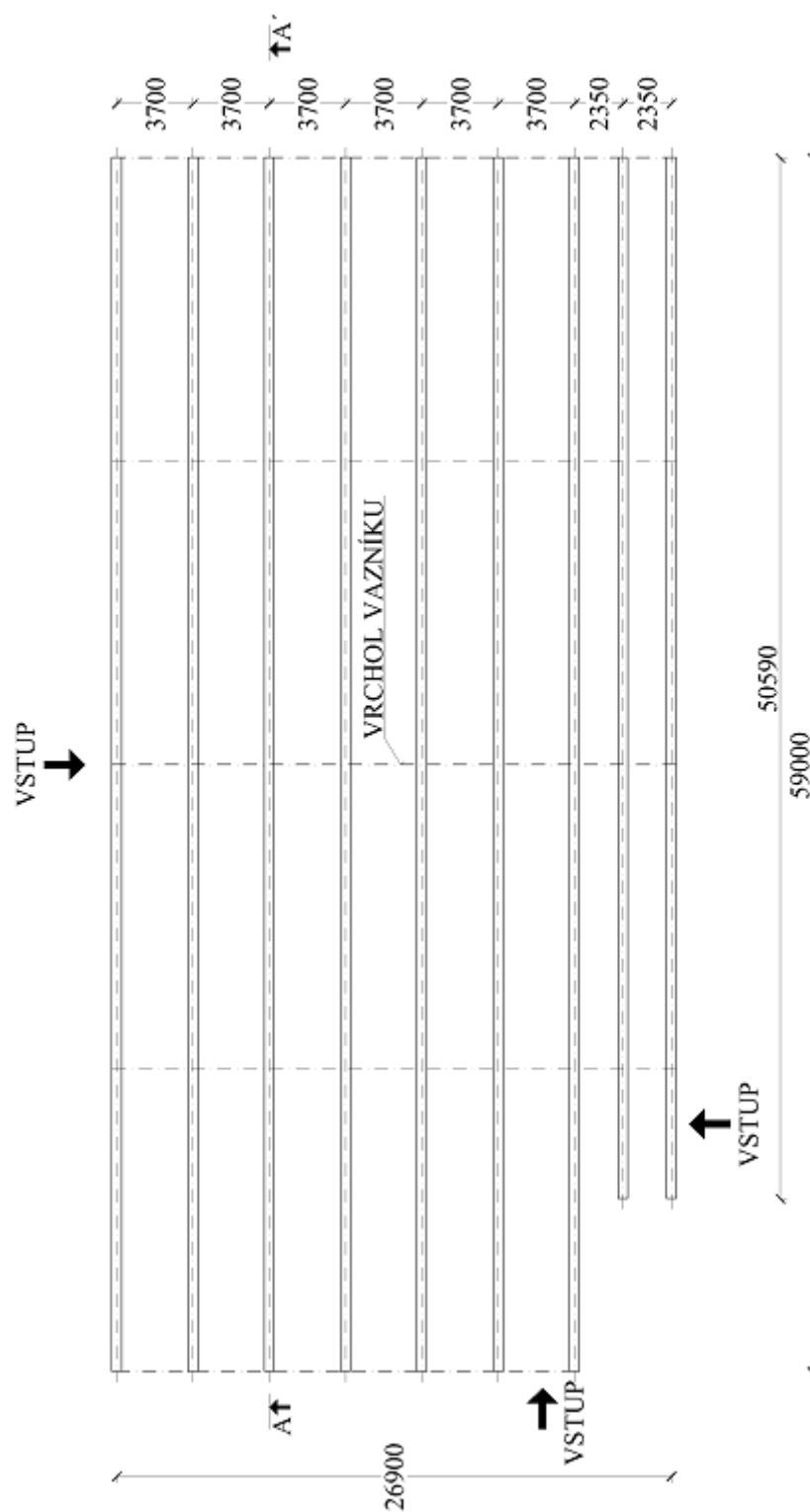
Obr. 4.1 Konstrukce zastřešení během výstavby [14]



Obr. 4.2 Vnitřní pohled na střešní konstrukci [14]

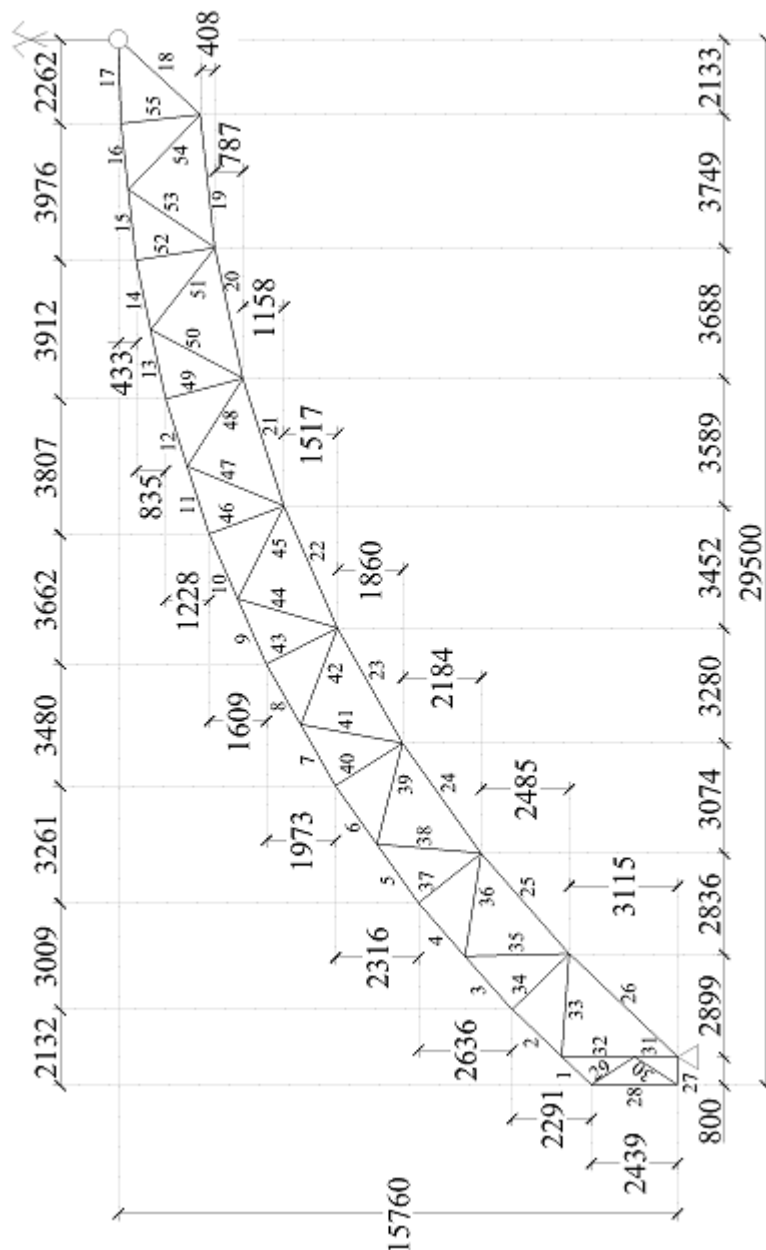
4.1. Geometrické uspořádání

Půdorys haly (obr. 4.3) je ve tvaru obdélníku o rozměrech 59 x 26,9 m. Celková výška haly ve vrcholu činí 15,76 m. Vazníky jsou v osové vzdálenosti 2,35 m a 3,7 m a jsou v příčném směru ztuženy podélnými a příčnými ztužidly [29].



Obr. 4.3 Půdorys střešní konstrukce, M 1:500 [14]

Hlavní nosná konstrukce je tvořena soustavou trojúhelníkových oblouků (obr. 4.4), které jsou vytvořeny ze zdvojeného (složeného) profilu.



Obr. 4.4 Obrysové míry vazníku (řez A-A') – polovina příčné vazby, M 1:250 [14]

4.2. Statické působení

Zatížení působící na střešní plášť je přenášeno přes záklop na střešní vaznice, které jsou ve vzdálenostech cca 1 m. Odtud se plošné zatížení z vaznic přenáší bodovými silami do styčníků obloukového vazníku. Styčníky jsou řešeny pomocí tenkých ocelových plechů vkládaných do výřezů ve dřevěných prvcích (obr. 2.4) [29]. Ze styčníků se zatížení přenáší do kloubových ložisek umístěných na základových patkách (obr. 4.5). Klouby trojúhelníkového oblouku jsou umístěny na patkách a ve vrcholu vazníku (obr. 4.6).



Obr. 4.5 Kloubové ložisko na základové patce [14]

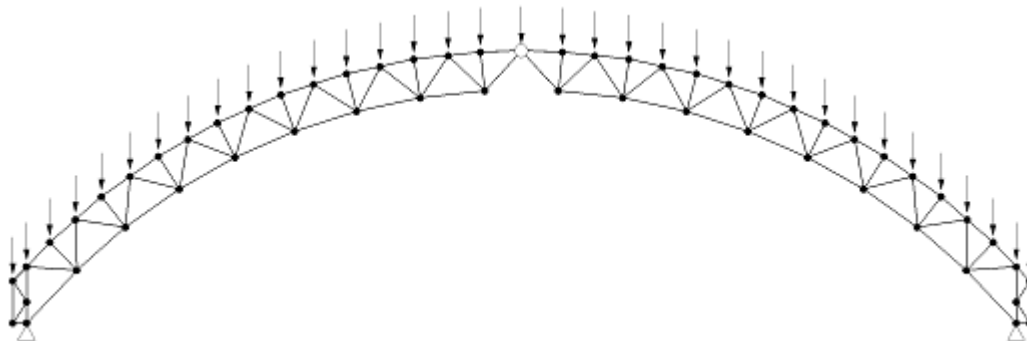


Obr. 4.6 Vrcholový kloub [14]

4.3. Výpočtové 2D numerické modely

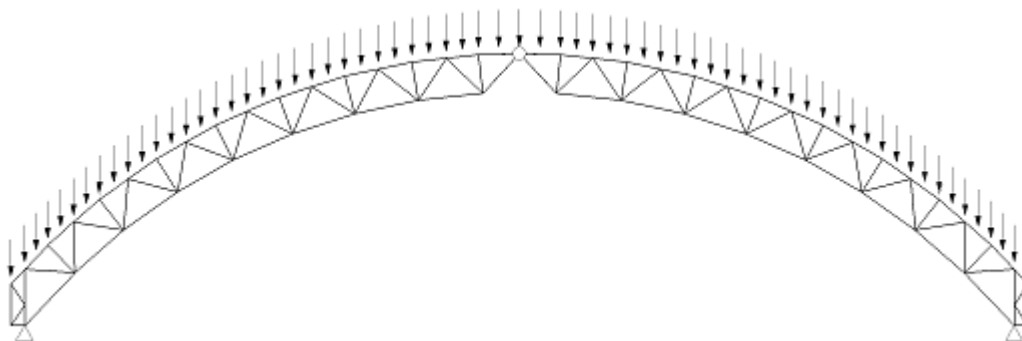
Modely jsou vytvořeny v programovém systému ANSYS dle podkladů [14]. Celkově jsou zhotoveny tři 2D numerické modely a po zhodnocení výsledků je vybrán model pro návrh na stranu bezpečnou.

Model M1 představuje všechny kloubově připojené pruty s použitím konečného prvku LINK1 (obr. 4.7).



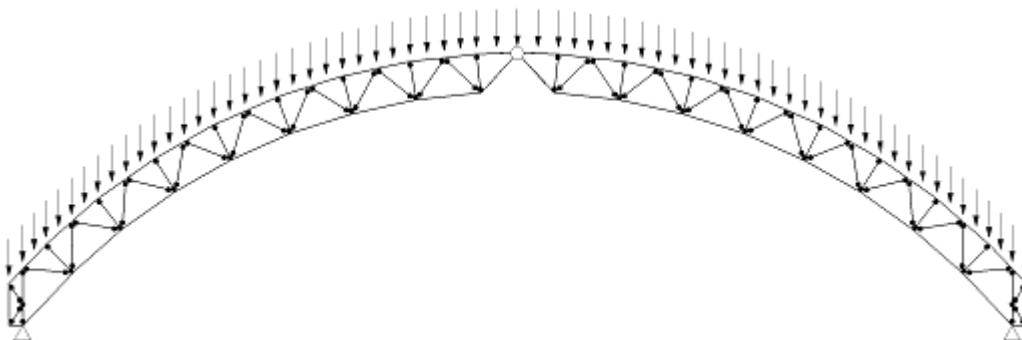
Obr. 4.7 Schéma vazníku s kloubově připojenými pruty

Model M2 tvoří všechny tuze připojené pruty s aplikovaným konečným prvkem BEAM 44. Na obr. 4.8 je znázorněn model a rozdělení zatížení do styčniců a vaznic.



Obr. 4.8 Schéma vazníku s tuze připojenými pruty

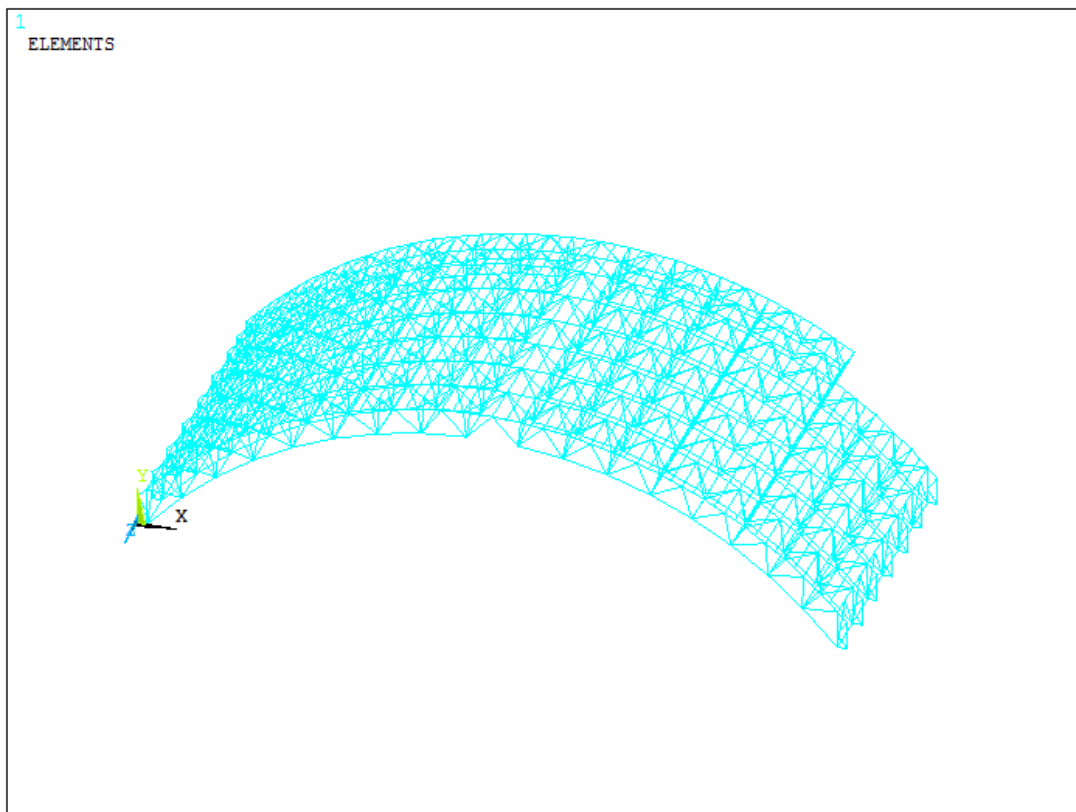
Model M3 reprezentuje průběžné pásy s kloubově připojenými svislicemi a diagonálami (obr. 4.9). Zde je použita kombinace prvků BEAM44 a LINK1.



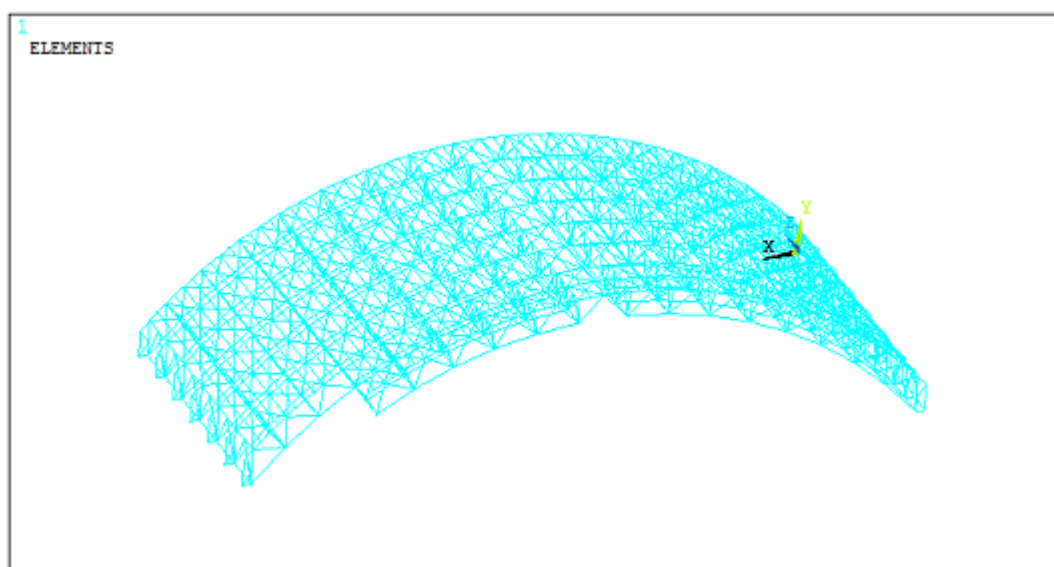
Obr. 4.9 Schéma vazníku s průběžnými pásy a kloubově připojené svislice a diagonály

4.4. Výpočtový 3D numerický model

Prostorový model tvoří tuze připojené prvky s použitím prvku BEAM 44. Model byl vytvořen dle pokladů [14]. Na obr. 4.10 a obr. 4.11 je uveden axonometrický pohled na model konstrukce zastřešení.



Obr. 4.10 3D model s tuze připojenými prvky

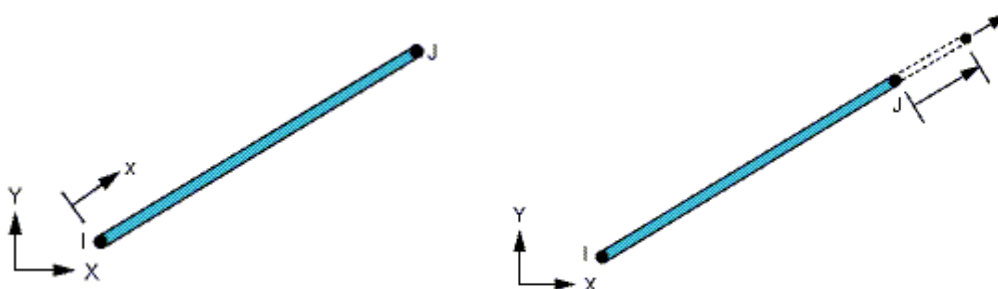


Obr. 4.11 3D model s tuze připojenými prvky

4.5. Použité konečné prvky

LINK1

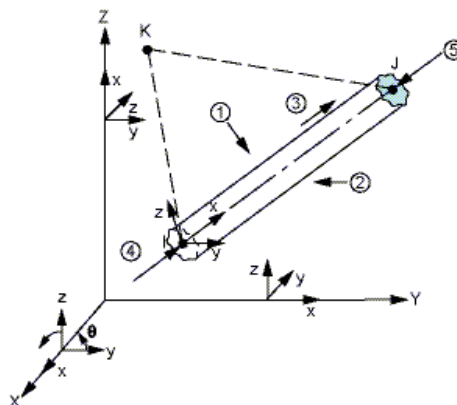
Je 2D prutový prvek se dvěma stupni volnosti v každém uzlu (obr. 4.12), a to posuvy ve směru osy x a y . Prvek přenáší pouze tah a tlak.



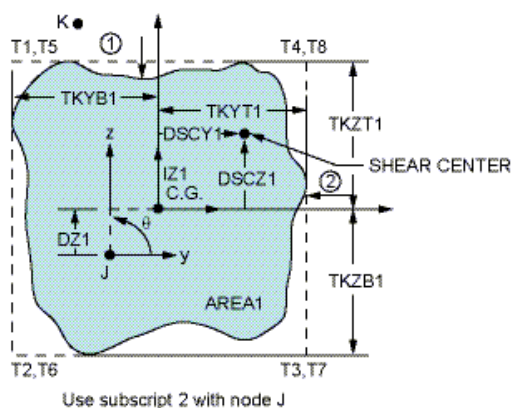
Obr. 4.12 2D konečný prvek LINK1 [15]

BEAM44

Je 3D elastický prutový prvek s šesti stupni volnosti v každém uzlu (obr. 4.13 a obr. 4.14), a to posuvy ve směru osy x , y a z a rotace kolem osy x , y a z . Prvek přenáší tah, tlak, ohyb, smyk a kroucení.



Obr. 4.13 3D konečný prvek BEAM44 [15]

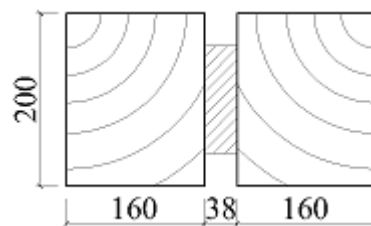


Obr. 4.14 Průřez 3D konečným prvek BEAM44 [15]

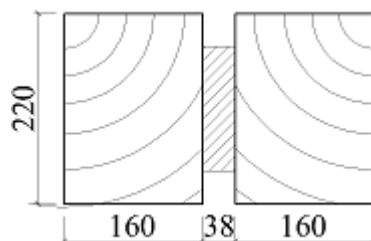
4.6. Charakteristika průřezů

Trojkloubový příhradový oblouk je vyroben z celkově šesti různých průřezů:

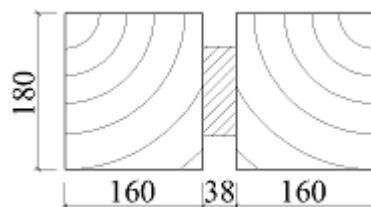
- horní pás



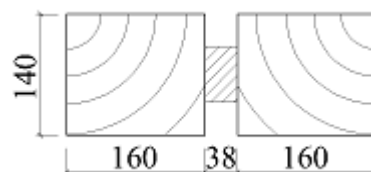
- dolní pás



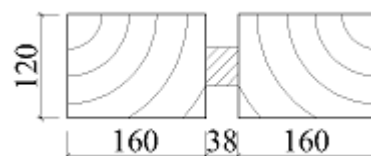
- nadpodporová svislice



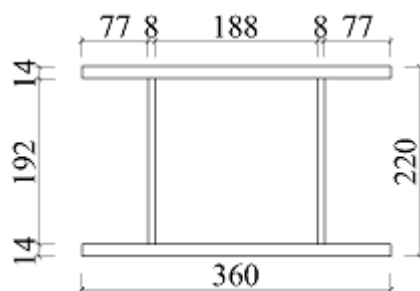
- diagonála



- svislice



- pata vazníku



Obr. 4.15 Použité průřezy vazníku

4.7. Zatěžovací stavy

Výpočet je proveden podle Eurokódu [18]. Veškeré zatížení působící na konstrukci je přepočítáno do osových sil působících ve styčnicích a vaznicích. Uvažovány jsou následující zatěžovací stavy [16], [17], [18]:

- ZS1 – Vlastní tíha
- ZS2 – Stálé zatížení
- ZS3 – Sníh plný
- ZS4 – Sníh nesymetrický pravý I
- ZS5 – Sníh nesymetrický levý I
- ZS6 – Sníh nesymetrický pravý II
- ZS7 – Sníh nesymetrický levý II
- ZS8 – Vítr příčný
- ZS9 – Vítr podélný

ZS1 – Vlastní tíha

Vlastní tíha konstrukce je stanovena výpočetním programem ANSYS. Konstrukce byla zhotovena ze dřeva třídy C22. Pata vazníku je tvořena dvěma I č. 200 z oceli S235 (tab.4.1).

Tab. 4.1 Materiálové charakteristiky [8]

Materiálové charakteristiky	Dřevo	Ocel
hustota [kgm^{-3}]	410	7850
Poissonův součinitel [-]	0,1	0,3
modul pružnosti [GPa]	10	210

ZS2 – Stálé zatížení

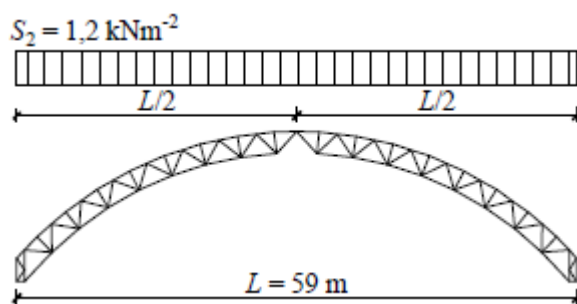
Stálé zatížení tvoří střešní plášť a podhled o intenzitě $g_s = 0,70 \text{ kNm}^{-2}$, která je uvažována dle [14].

ZS3 – Sníh plný

Tělocvična základní školy se nachází v Bílovci (okres Nový Jičín, Moravskoslezský kraj). Podle sněhové mapy je zde III. sněhová oblast ($s_k = 1,5 \text{ kNm}^{-2}$).

$$s = \mu_i C_e C_t S_k$$

$$s = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = \mathbf{1,2 \text{ kNm}^{-2}}$$



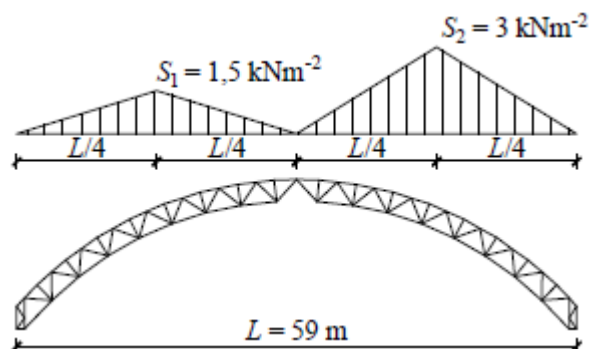
ČSN EN 1991 – 1 – 3 (Eurokód 1) uvádí dvě varianty nesymetrického sněhu:

$$s = \mu_3 C_e C_t S_k$$

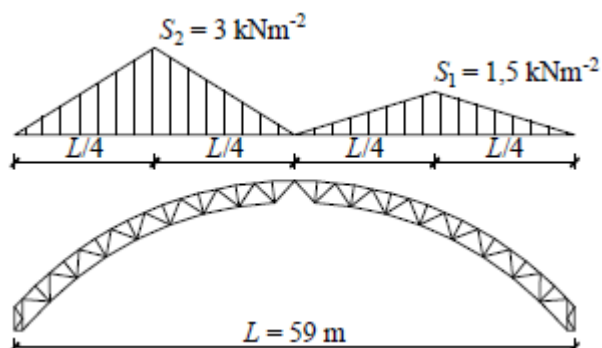
$$s_1 = 0,5 \mu_3 C_e C_t S_k = 0,5 \cdot 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 1,5 \text{ kNm}^{-2}$$

$$s_2 = \mu_3 C_e C_t S_k = 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 3,0 \text{ kNm}^{-2}$$

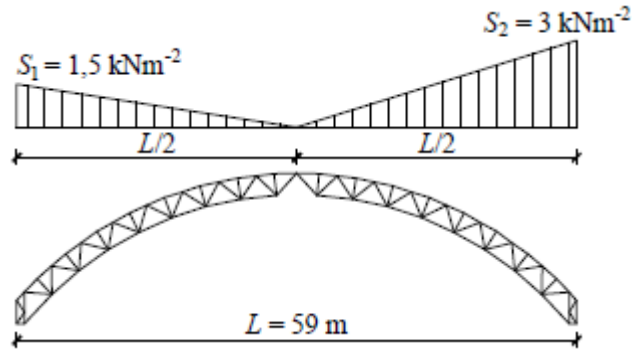
ZS4 – Sníh nesymetrický pravý I



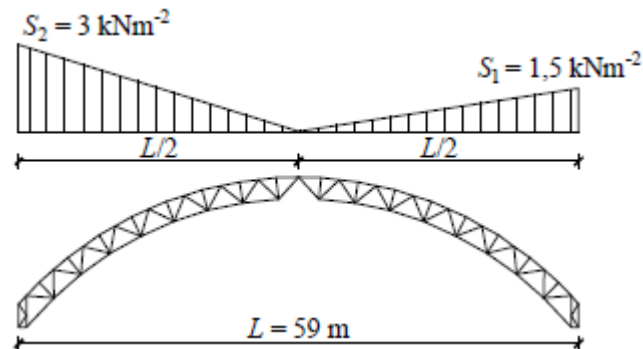
ZS5 – Sníh nesymetrický levý I



ZS6 – Sníh nesymetrický pravý II



ZS7 – Sníh nesymetrický levý II



ZS8 – Vítr příčný

Tělocvična základní školy se nachází v Bílovci (okres Nový Jičín, Moravskoslezský kraj). Podle větrné mapy je zde II. větrná oblast ($v_{b0} = 25 \text{ ms}^{-1}$). Pro Bílovec je kategorie terénu IV, výška konstrukce ve vrcholu je 15,76 m.

Základní rychlost větru:

$$v_b = C_{\text{dir}} C_{\text{season}} v_{b0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ ms}^{-1}$$

Střední rychlost větru:

$$v_m(z) = C_r(z) C_0(z) v_b = 0,645 \cdot 1,0 \cdot 25 = 16,13 \text{ ms}^{-1}$$

$$z_{\text{min}} \leq z \leq z_{\text{max}}$$

$$10 \text{ m} \leq 15,76 \text{ m} \leq 200 \text{ m}$$

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0} = 0,234 \cdot \ln \frac{15,76}{1,0} = 0,645$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{1,0}{0,05} \right)^{0,07} = 0,234$$

Turbulence větru:

$$z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$10 \text{ m} \leq 15,76 \text{ m} \leq 200 \text{ m}$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{5,85}{16,13} = 0,363$$

$$\sigma_v = k_r v_b k_1 = 0,234 \cdot 25 \cdot 1,0 = 5,85$$

Maximální dynamický tlak:

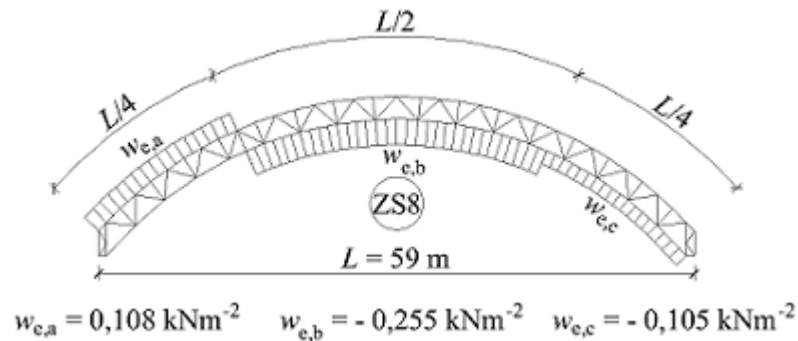
$$q_p(z_e) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,363] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 16,13^2 = 0,2632 \text{ kNm}^2$$

$$w_{e,a} = q_p(z_e) C_{pe,a} = 0,2632 \cdot 0,41 = \mathbf{0,108 \text{ kNm}^{-2}}$$

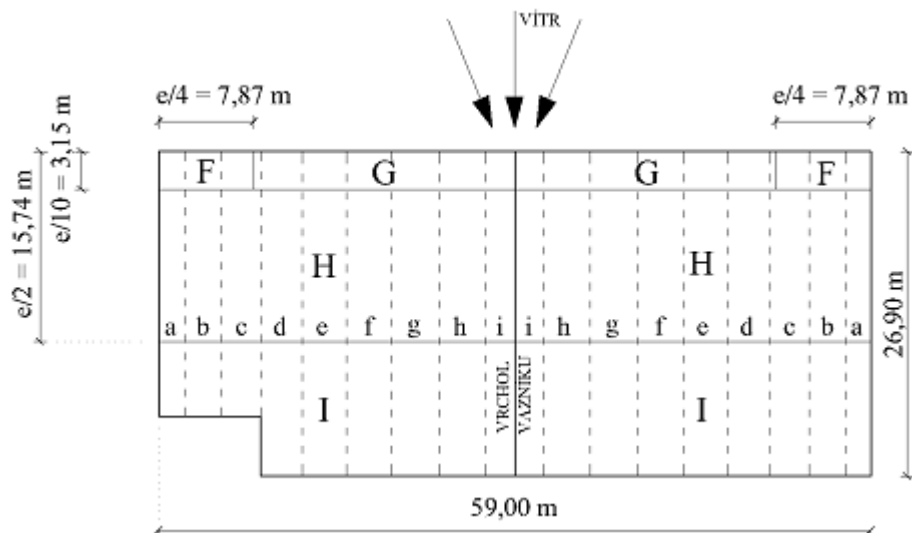
$$w_{e,b} = q_p(z_e) C_{pe,b} = 0,2632 \cdot (-0,97) = \mathbf{-0,255 \text{ kNm}^{-2}}$$

$$w_{e,c} = q_p(z_e) C_{pe,c} = 0,2632 \cdot (-0,4) = \mathbf{-0,105 \text{ kNm}^{-2}}$$

Schéma zatížení větrem a rozdělení na oblasti:



ZS9 – Podélný vítr



(čárkovaná čára charakterizuje změnu sklonu vazníku)

$$e = \min(b; 2h) = \min(59 \text{ m}; 2 \cdot 15,74 \text{ m}) = \min(59,31; 31,48) = 31,48 \text{ m}$$

Tab. 4.2 Hodnoty součinitelů C_{pe} a zatížení podélným větrem

Poloha	α [°]	C_{pe} [-] pro oblast				$w_{e(F)}$ [kNm ⁻²]	$w_{e(G)}$ [kNm ⁻²]	$w_{e(H)}$ [kNm ⁻²]	$w_{e(I)}$ [kNm ⁻²]
		F	G	H	I				
a	45	-1,10	-1,40	-0,90	-0,50	-0,29	-	-0,23	-0,13
b	41	-1,10	-1,40	-0,90	-0,50	-0,29	-	-0,23	-0,13
c	35	-1,10	-1,40	-0,83	-0,50	-0,29	-0,36	-0,22	-0,13
d	30	-1,10	-1,40	-0,80	-0,50	-	-0,36	-0,21	-0,13
e	24	-1,18	-1,38	-0,71	-0,50	-	-0,36	-0,18	-0,13
f	18	-1,25	-1,32	-0,63	-0,50	-	-0,34	-0,16	-0,13
g	12	-1,39	-1,30	-0,62	-0,51	-	-0,34	-0,16	-0,13
h	6	-1,56	-1,30	-0,69	-0,60	-	-0,34	-0,18	-0,16
i	0	-1,70	-1,25	-0,70	-0,60	-	-0,33	-0,18	-0,16

4.8. Kombinace zatěžovacích stavů

Pro výpočet byly uvažovány kombinace dle rovnic v ČSN EN 1990 [16]:

rovnice pro zatížení 6.10a:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gij} \cdot G_{kj} + \gamma_p \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot \psi_{Q1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq k} \gamma_{Qi} \cdot \psi_{Qi} \cdot Q_{ki}$$

rovnice pro zatížení 6.10b:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gij} \cdot \xi \cdot G_{kj} + \gamma_p \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq k} \gamma_{Qi} \cdot \psi_{Qi} \cdot Q_{ki}$$

Mezní stav únosnosti

$$K1: 1,35 \text{ ZS1} + 1,35 \text{ ZS2} + 1,5 \text{ ZS3}$$

$$K2: 1,35 \text{ ZS1} + 1,35 \text{ ZS2} + 1,5 \text{ ZS4}$$

$$K3: 1,35 \text{ ZS1} + 1,35 \text{ ZS2} + 1,5 \text{ ZS5} + 0,7 \cdot 1,5 \text{ ZS8}$$

$$K4: 1,35 \text{ ZS1} + 1,35 \text{ ZS2} + 1,5 \text{ ZS6}$$

$$K5: 1,35 \text{ ZS1} + 1,35 \text{ ZS2} + 1,5 \text{ ZS7} + 0,7 \cdot 1,5 \text{ ZS8}$$

Mezní stav použitelnosti

$$K6: 1,0 \text{ ZS1} + 1,0 \text{ ZS2} + 1,0 \text{ ZS3}$$

$$K7: 1,0 \text{ ZS1} + 1,0 \text{ ZS2} + 1,0 \text{ ZS4}$$

$$K8: 1,0 \text{ ZS1} + 1,0 \text{ ZS2} + 1,0 \text{ ZS5} + 0,7 \text{ ZS8}$$

$$K9: 1,0 \text{ ZS1} + 1,0 \text{ ZS2} + 1,0 \text{ ZS6}$$

$$K10: 1,0 \text{ ZS1} + 1,0 \text{ ZS2} + 1,0 \text{ ZS7} + 0,7 \text{ ZS8}$$

5. Výsledky řešení střešní konstrukce

Jednotlivé případy nejvíce zatížených průřezů jsou posuzovány podle ČSN EN 1995-1-1 [19] na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti.

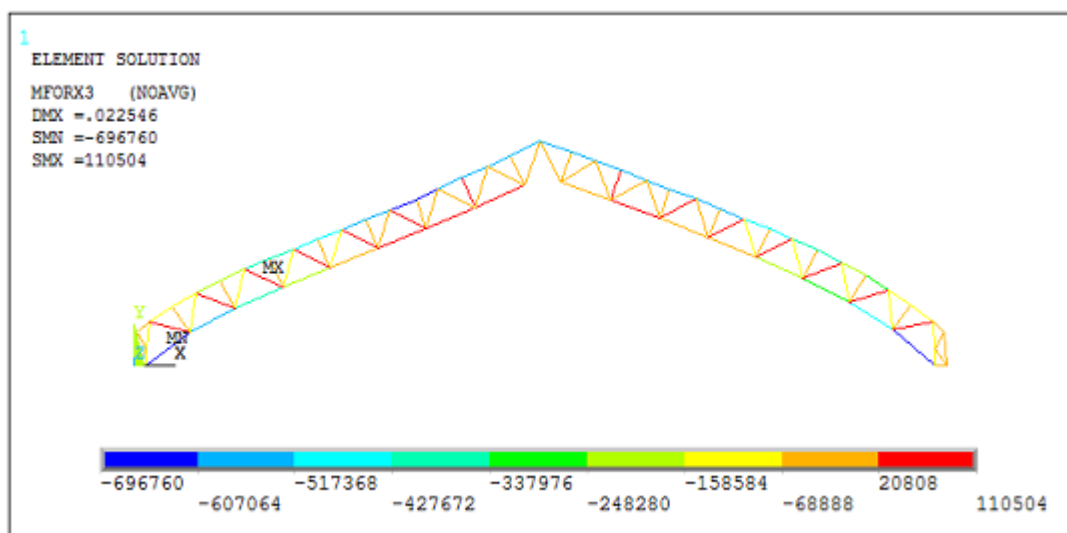
5.1. Posouzení průřezů na mezní stav únosnosti

Na mezní stav použitelnosti je posuzováno vybraných šest průřezů (obr. 4.15). Jedná se o horní a dolní pás, diagonálu, nadpodporovou svislici, svislici a patu vazníku. Výsledky získané z programového systému ANSYS jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Vybrané výsledky studie – MSÚ (kombinace K3)

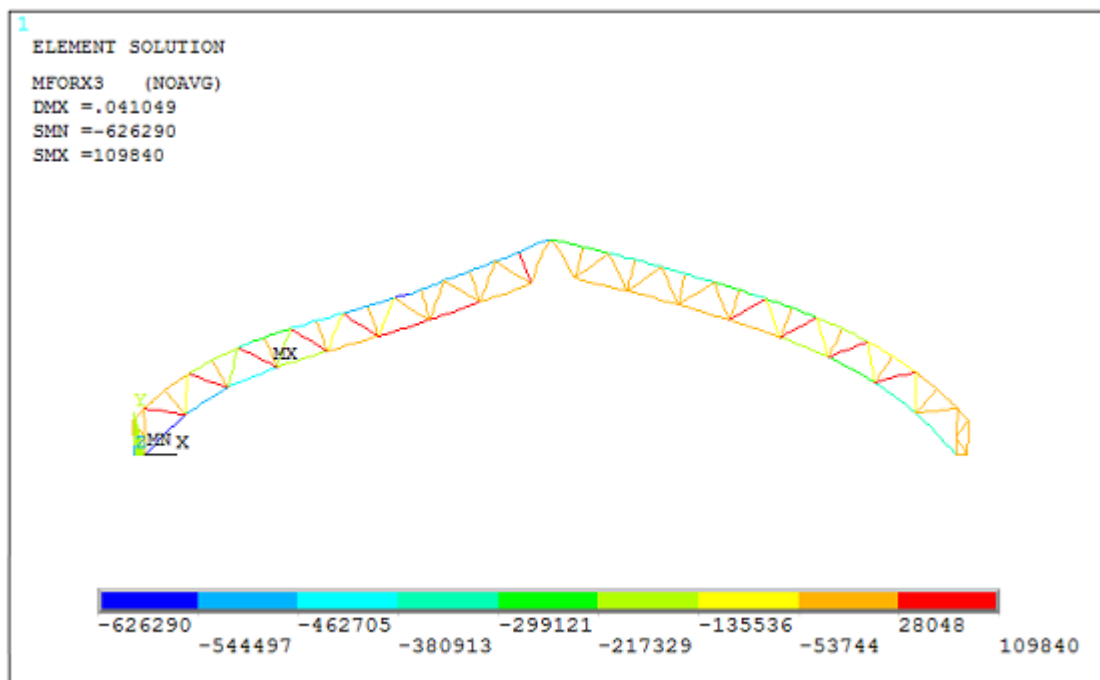
Průřez	Model							
	M1		M2			M3		
	Prut	N [N]	N [N]	V [N]	M [Nm]	N [N]	V [N]	M [Nm]
horní pás	č. 12	-620 530	-544 320	9 028	2 458	-553 070	-13 331	-5 399
dolní pás	č. 26	-696 760	-626 290	-27	-1 316	-627 820	12	-1 316
diagonála	č. 38	-154 290	-144 930	540	889	-145 630	0	0
	č. 39	110 500	109 840	-138	-198	111 120	0	0
nadpodp. svislice	č. 31	-120 400	-43 972	-644	-457	-44 093	0	0
svislice	č. 34	-11 900	-362	326	326	-547	0	0
	č. 52	28 759	24 414	113	-66	24 641	0	0
pata vazníku	č. 27	-3 304	2 206	2 673	346	1 155	2 208	-1 094

Na obr. 5.1 jsou znázorněny výsledky normálových sil pro model vazníku s kloubově připojenými pruty (model M1). Největší tlaková (normálová) síla od kombinace K3 vzniká na dolním pásu (prut č. 26) a její hodnota činí $-696,76$ kN, největší tahová (normálová) síla na diagonále (prut č. 39) o velikosti $110,504$ kN.



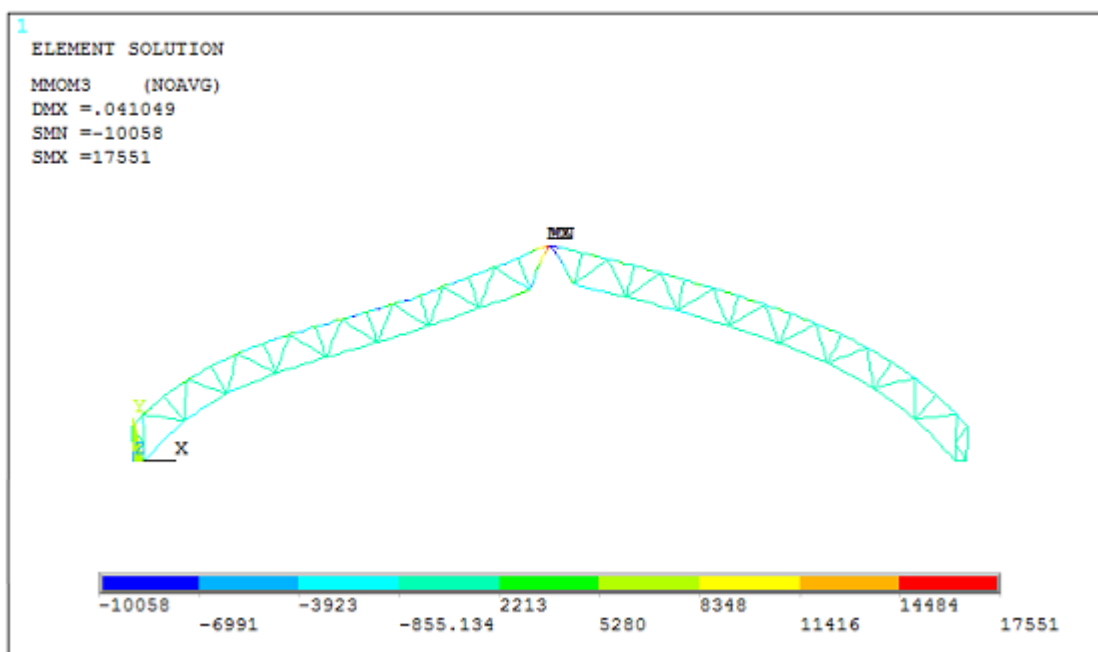
Obr. 5.1 Normálové síly na vazníku s kloubově připojenými pruty – M1 (K3)

Na vazníku s tuze připojenými pruty (model M2) vzniká největší hodnota tlakové (normálové) síly od kombinace K3 v prutu č. 26 (obr. 5.2) a činí $-626,29$ kN. Prutu č. 39 připadá největší tahová (normálová) síla s hodnotou $109,84$ kN.

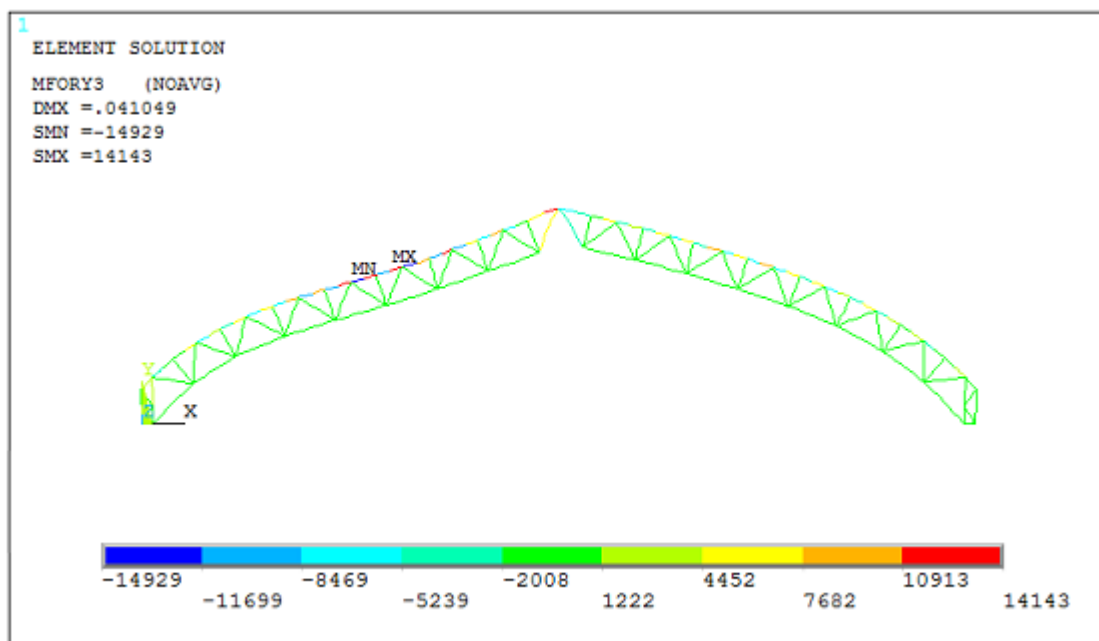


Obr. 5.2 Normálové síly na vazníku s tuze připojenými pruty – M2 (K3)

U modelu M2 vznikají vedle normálových sil také ohybové momenty (obr. 5.3) a posouvající síly (obr. 5.4). Hodnoty veličin jsou uvedeny v tab. 5.1.

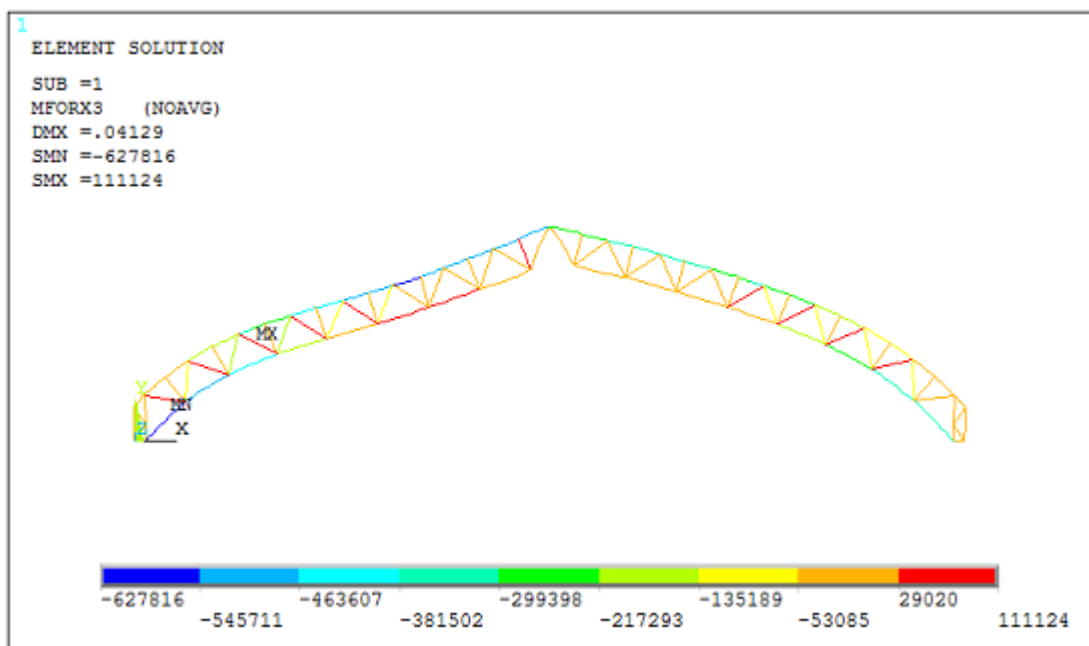


Obr. 5.3 Ohybové momenty na vazníku s tuze připojenými pruty – M2 (K3)



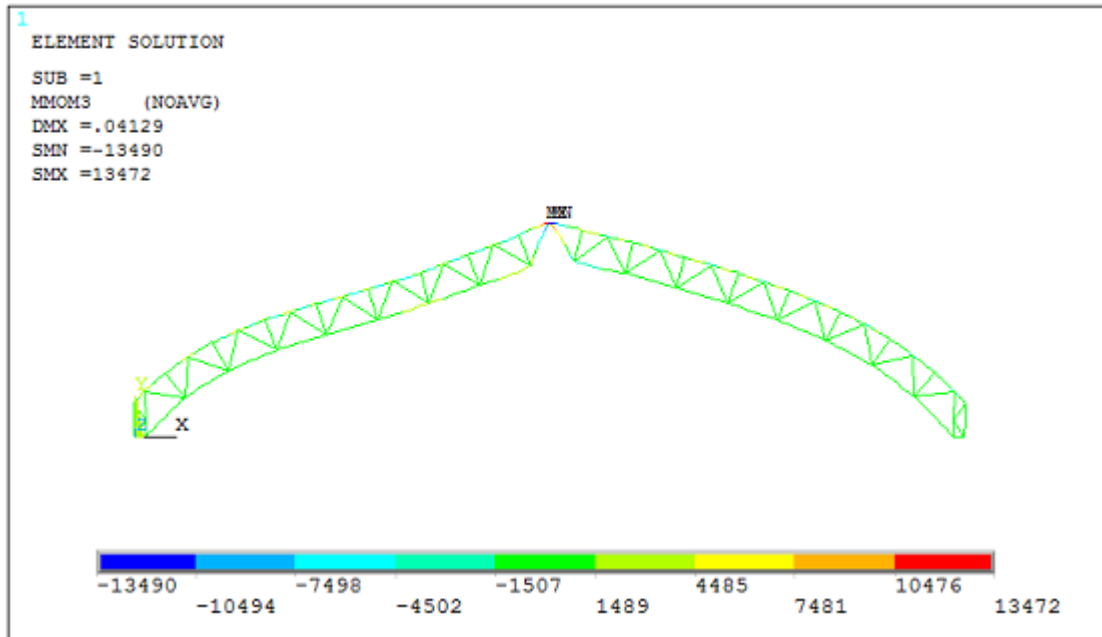
Obr. 5.4 Posouvající síly na vazníku s tuze připojenými pruty – M2 (K3)

Na obr. 5.5 jsou znázorněny hodnoty normálových sil pro model vazníku s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami (model M3). Maximální tlaková (normálová) síla je $-627,816$ kN na dolním pásu (prut č. 26). Největší hodnota tahové (normálové) síly vykazuje diagonála (prut č. 39) a její hodnota je $111,124$ kN.

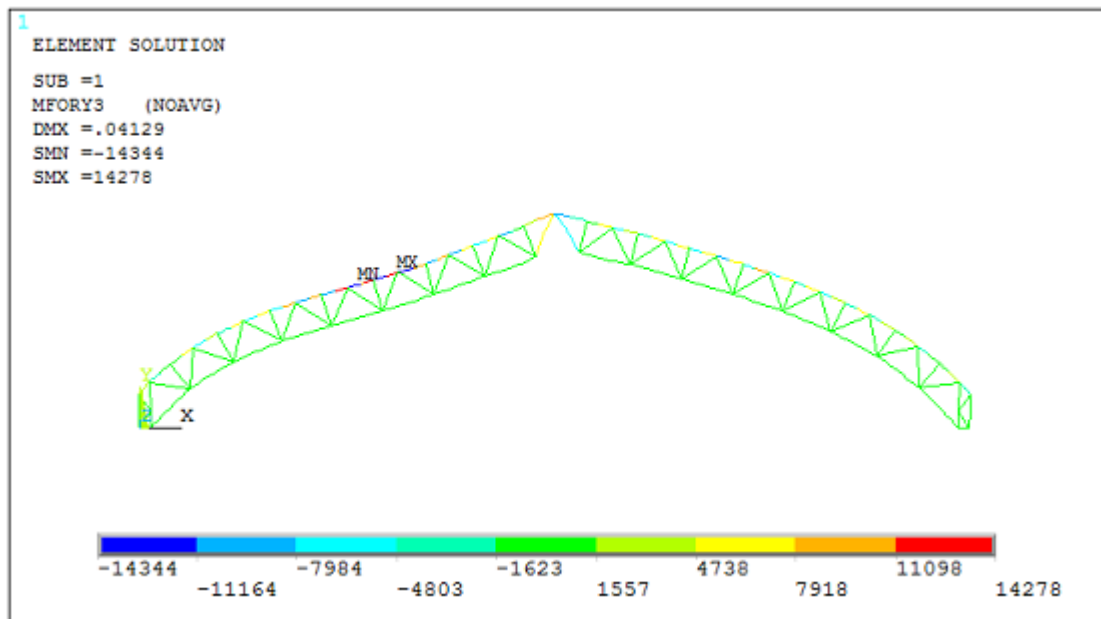


Obr. 5.5 Normálové síly na vazníku s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami – M3 (K3)

Hodnoty ohybových momentů (obr. 5.6) a posouvajících sil (obr. 5.7) vznikají také u modelu M3 ale pouze u horního a dolního pásu. Z důvodu kombinace prvků BEAM 44 (horní a dolní pás) a LINK1 (výplet vazníku). Hodnoty veličin odpovídající průřezům nejvíce zatížených normálovou silou (viz tab. 5.1).



Obr. 5.6 Ohybové momenty na vazníku s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami – M3 (K3)



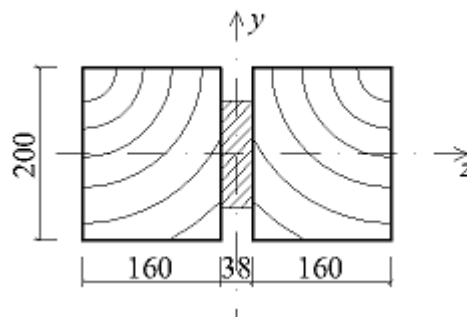
Obr. 5.7 Posouvající síly na vazníku s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami – M3 (K3)

Posouzení průřezů

Celkově je posouzeno šest průřezů. Horní a dolní pás, nadpodporová svíslice, diagonála a svíslice, které jsou zhotoveny ze dřeva C22, jsou posouzeny dle ČSN EN 1995-1-1 na vzpěr, tlak a tah. Pata vazníku je zhotovena z oceli S235 a je počítána podle ČSN EN 1993-1-1 na tlak a vzpěr.

Horní pás

$$\begin{aligned}
 A &= 2 \cdot b \cdot h = 2 \cdot 0,16 \cdot 0,2 = 0,064 \text{ m}^2 \\
 A_{\text{net}} &= 0,9 \cdot A = 0,9 \cdot 0,064 = 0,0576 \text{ m}^2 \\
 N_{\text{tlak}} &= -620,53 \text{ kN} \\
 I_y &= 2,133 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \\
 I_z &= 7,638 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$



Návrhová pevnost v tlaku

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{20}{1,3} = 13,85 \text{ MPa}$$

Normálové napětí v tlaku

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{\text{tlak}}}{A_{\text{net}}} = \frac{620\,530}{0,0576} = 10,77 \text{ MPa}$$

Poloměry setrvačnosti

$$\begin{aligned}
 i_y &= \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{2,133 \cdot 10^{-4}}{0,0576}} = 0,0609 \text{ m} \\
 i_z &= \sqrt{\frac{I_z}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{7,368 \cdot 10^{-4}}{0,0576}} = 0,1151 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Štíhlostní poměry

$$\begin{aligned}
 \lambda_y &= \frac{L_{\text{cr},y}}{i_y} = \frac{1}{0,0609} = 16,43 \\
 \lambda_z &= \frac{L_{\text{cr},z}}{i_z} = \frac{2}{0,1151} = 17,38 \\
 \sigma_{c,\text{crit},y} &= \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_y^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{16,43^2} = 244,9 \text{ MPa} \\
 \sigma_{c,\text{crit},z} &= \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_z^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{17,38^2} = 218,9 \text{ MPa} \\
 \lambda_{\text{rel},y} &= \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,\text{crit},y}}} = \sqrt{\frac{20}{244,9}} = 0,289 \\
 \lambda_{\text{rel},z} &= \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,\text{crit},z}}} = \sqrt{\frac{20}{218,91}} = 0,302
 \end{aligned}$$

Součinitelé vzpěrnosti

$$k_y = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (0,286 - 0,3) + 0,268^2]$$

$$k_y = 0,54$$

$$k_z = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (0,302 - 0,3) + 0,302^2]$$

$$k_z = 0,55$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 - 0,286^2}} = 1,00$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,55 + \sqrt{0,55^2 - 0,302^2}} = 1,00$$

Posouzení horního pásu na vzpěr

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{10,77}{1,00 \cdot 13,85} = 0,78 < 1,0$$

⇒ horní pás vyhovuje na vzpěr.

Posouzení horního pásu na tlak

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{10,77}{13,85} = 0,78 < 1,0$$

⇒ horní pás vyhovuje na tlak.

Dolní pás

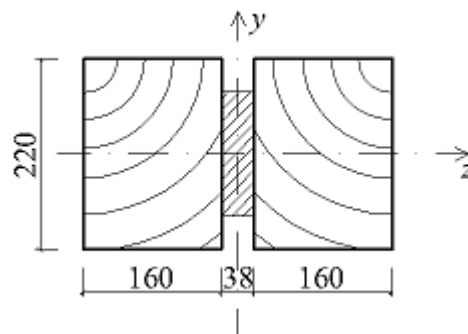
$$A = 2 \cdot b \cdot h = 2 \cdot 0,16 \cdot 0,22 = 0,0704 \text{ m}^2$$

$$A_{net} = 0,9 \cdot A = 0,9 \cdot 0,0704 = 0,0634 \text{ m}^2$$

$$N_{tlak} = -696,76 \text{ kN}$$

$$I_y = 2,840 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_z = 8,402 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$



Návrhová pevnost v tlaku

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{20}{1,3} = 13,85 \text{ MPa}$$

Normálové napětí v tlaku

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{tlak}}{A_{net}} = \frac{696\,760}{0,0634} = 11,00 \text{ MPa}$$

Poloměry setrvačnosti

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{2,840 \cdot 10^{-4}}{0,0634}} = 0,0669 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{8,402 \cdot 10^{-4}}{0,0634}} = 0,1152 \text{ m}$$

Štíhlostní poměry

$$\lambda_y = \frac{L_{\text{cr},y}}{i_y} = \frac{2}{0,0669} = 29,88$$

$$\lambda_z = \frac{L_{\text{cr},z}}{i_z} = \frac{2}{0,1152} = 17,36$$

$$\sigma_{\text{c,crit},y} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_y^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{29,88^2} = 74,07 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{c,crit},z} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_z^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{17,36^2} = 219,42 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{rel},y} = \sqrt{\frac{f_{\text{c},0,\text{k}}}{\sigma_{\text{c,crit},y}}} = \sqrt{\frac{20}{74,07}} = 0,52$$

$$\lambda_{\text{rel},z} = \sqrt{\frac{f_{\text{c},0,\text{k}}}{\sigma_{\text{c,crit},z}}} = \sqrt{\frac{20}{219,42}} = 0,302$$

Součinitelé vzpěrnosti

$$k_y = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel},y} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},y}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (0,52 - 0,3) + 0,52^2]$$

$$k_y = 0,76$$

$$k_z = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel},z} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},z}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (0,302 - 0,3) + 0,302^2]$$

$$k_z = 0,55$$

$$k_{\text{c},y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{\text{rel},y}^2}} = \frac{1}{0,76 + \sqrt{0,76^2 - 0,52^2}} = 0,94$$

$$k_{\text{c},z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{\text{rel},z}^2}} = \frac{1}{0,55 + \sqrt{0,55^2 - 0,302^2}} = 1,00$$

Posouzení dolního pásu na vzpěr

$$\frac{\sigma_{\text{c},0,\text{d}}}{k_{\text{c}} f_{\text{c},0,\text{d}}} \leq 1,0$$

$$\frac{11,0}{0,94 \cdot 13,85} = 0,85 < 1,0$$

$$\frac{11,0}{1,00 \cdot 13,85} = 0,78 < 1,0$$

⇒ **dolní pás vyhovuje na vzpěr.**

Posouzení dolního pásu na tlak

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{11,0}{13,85} = 0,78 < 1,0$$

⇒ **dolní pás vyhovuje na tlak.**

Nadpodporová svislice

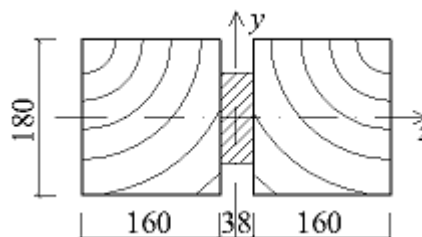
$$A = 2 \cdot b \cdot h = 2 \cdot 0,16 \cdot 0,18 = 0,0576 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{net}} = 0,9 \cdot A = 0,9 \cdot 0,0576 = 0,0518 \text{ m}^2$$

$$N_{\text{tlak}} = -120,40 \text{ kN}$$

$$I_y = 1,555 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_z = 6,784 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$



Návrhová pevnost v tlaku

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{20}{1,3} = 13,85 \text{ MPa}$$

Normálové napětí v tlaku

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{\text{tlak}}}{A_{\text{net}}} = \frac{120\,400}{0,0518} = 2,32 \text{ MPa}$$

Poloměry setrvačnosti

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{1,555 \cdot 10^{-4}}{0,0518}} = 0,0548 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{6,784 \cdot 10^{-4}}{0,0518}} = 0,1152 \text{ m}$$

Štíhlostní poměry

$$\lambda_y = \frac{L_{\text{cr},y}}{i_y} = \frac{3,25}{0,0548} = 59,34$$

$$\lambda_z = \frac{L_{\text{cr},z}}{i_z} = \frac{3,25}{0,1152} = 28,22$$

$$\sigma_{c,\text{crit},y} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_y^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{59,34^2} = 18,78 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,\text{crit},z} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_z^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{28,22^2} = 83,03 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} = \sqrt{\frac{20}{18,78}} = 1,032$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}} = \sqrt{\frac{20}{83,03}} = 0,491$$

Součinitelé vzpěrnosti

$$k_y = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (1,032 - 0,3) + 1,032^2]$$

$$k_y = 1,106$$

$$k_z = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (0,491 - 0,3) + 0,491^2]$$

$$k_z = 0,639$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,106 + \sqrt{1,106^2 - 1,032^2}} = 0,66$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,639 + \sqrt{0,639^2 - 0,491^2}} = 0,95$$

Posouzení nadpodporové svislice na vzpěr

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{2,32}{0,66 \cdot 13,85} = 0,25 < 1,0$$

$$\frac{2,32}{0,95 \cdot 13,85} = 0,18 < 1,0$$

⇒ **nadpodporová svislice vyhovuje na vzpěr.**

Posouzení nadpodporové svislice na tlak

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{2,32}{13,85} = 0,17 < 1,0$$

⇒ **nadpodporová svislice vyhovuje na tlak.**

Diagonála

$$A = 2 \cdot b \cdot h = 2 \cdot 0,16 \cdot 0,14 = 0,0448 \text{ m}^2$$

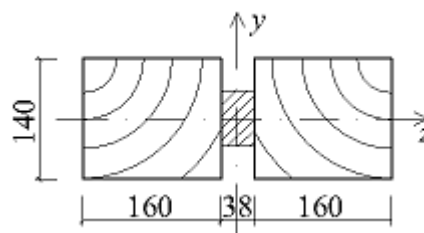
$$A_{\text{net}} = 0,9 \cdot A = 0,9 \cdot 0,0448 = 0,0403 \text{ m}^2$$

$$N_{\text{tlak}} = -154,29 \text{ kN}$$

$$N_{\text{tah}} = 110,50 \text{ kN}$$

$$I_y = 7,318 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_z = 5,347 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$



Návrhová pevnost v tlaku a tahu

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{20}{1,3} = 13,85 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{13}{1,3} = 9,0 \text{ MPa}$$

Normálové napětí v tlaku a tahu

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{\text{tlak}}}{A_{\text{net}}} = \frac{154\,290}{0,0403} = 3,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{\text{tah}}}{A_{\text{net}}} = \frac{110\,500}{0,0403} = 2,74 \text{ MPa}$$

Poloměry setrvačnosti

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{7,327 \cdot 10^{-5}}{0,0403}} = 0,0426 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{5,347 \cdot 10^{-4}}{0,0403}} = 0,1152 \text{ m}$$

Štíhlostní poměry

$$\lambda_y = \frac{L_{\text{cr},y}}{i_y} = \frac{2,95}{0,0426} = 69,25$$

$$\lambda_z = \frac{L_{\text{cr},z}}{i_z} = \frac{2,95}{0,1152} = 25,62$$

$$\sigma_{c,\text{crit},y} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_y^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{69,25^2} = 13,79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,\text{crit},z} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_z^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{25,62^2} = 100,74 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{rel},y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,\text{crit},y}}} = \sqrt{\frac{20}{13,79}} = 1,204$$

$$\lambda_{\text{rel},z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,\text{crit},z}}} = \sqrt{\frac{20}{100,74}} = 0,446$$

Součinitelé vzpěrnosti

$$k_y = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (1,204 - 0,3) + 1,204^2]$$

$$k_y = 1,315$$

$$k_z = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (0,446 - 0,3) + 0,446^2]$$

$$k_z = 0,614$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,315 + \sqrt{1,315^2 - 1,204^2}} = 0,54$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,614 + \sqrt{0,614^2 - 0,446^2}} = 0,96$$

Posouzení diagonály na vzpěr

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{3,83}{0,54 \cdot 13,85} = 0,51 < 1,0$$

$$\frac{3,83}{0,96 \cdot 13,85} = 0,29 < 1,0$$

⇒ **diagonála vyhovuje na vzpěr.**

Posouzení diagonály na tlak

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{3,83}{13,85} = 0,28 < 1,0$$

Posouzení diagonály na tah

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{2,74}{9,0} = 0,30 < 1,0$$

⇒ **diagonála vyhovuje na tlak i tah.**

Svislice

$$A = 2 \cdot b \cdot h = 2 \cdot 0,16 \cdot 0,12 = 0,0384 \text{ m}^2$$

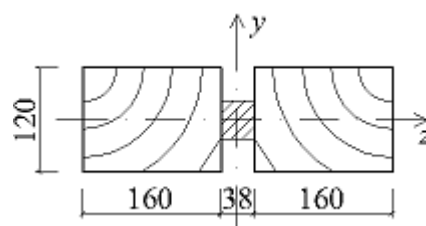
$$A_{net} = 0,9 \cdot A = 0,9 \cdot 0,0384 = 0,0346 \text{ m}^2$$

$$N_{tlak} = - 11,900 \text{ kN}$$

$$N_{tah} = 28,759 \text{ kN}$$

$$I_y = 4,608 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_z = 4,583 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$



Návrhová pevnost v tlaku a tahu

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{20}{1,3} = 13,85 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{13}{1,3} = 9,0 \text{ MPa}$$

Normálové napětí v tlaku a tahu

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{\text{tlak}}}{A_{\text{net}}} = \frac{11\,900}{0,0346} = 0,34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{\text{tah}}}{A_{\text{net}}} = \frac{28\,759}{0,0346} = 0,83 \text{ MPa}$$

Poloměry setrvačnosti

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{4,608 \cdot 10^{-5}}{0,0346}} = 0,0365 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A_{\text{net}}}} = \sqrt{\frac{4,583 \cdot 10^{-4}}{0,0346}} = 0,1152 \text{ m}$$

Štíhlostní poměry

$$\lambda_y = \frac{L_{\text{cr},y}}{i_y} = \frac{2,25}{0,0365} = 61,62$$

$$\lambda_z = \frac{L_{\text{cr},z}}{i_z} = \frac{2,25}{0,1152} = 19,53$$

$$\sigma_{c,\text{crit},y} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_y^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{61,62^2} = 17,42 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,\text{crit},z} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda_z^2} = \pi^2 \frac{6,7 \cdot 10^3}{19,53^2} = 173,37 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{rel},y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,\text{crit},y}}} = \sqrt{\frac{20}{17,42}} = 1,071$$

$$\lambda_{\text{rel},z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,\text{crit},z}}} = \sqrt{\frac{20}{173,37}} = 0,339$$

Součinitelé vzpěrnosti

$$k_y = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel},y} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},y}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (1,071 - 0,3) + 1,071^2]$$

$$k_y = 1,151$$

$$k_z = 0,5 [1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel},z} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},z}^2] = 0,5 [1 + 0,2 (0,339 - 0,3) + 0,339^2]$$

$$k_z = 0,561$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,151 + \sqrt{1,151^2 - 1,071^2}} = 0,64$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,561 + \sqrt{0,561^2 - 0,339^2}} = 0,99$$

Posouzení svislice na vzpěr

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,34}{0,64 \cdot 13,85} = 0,04 < 1,0$$

$$\frac{0,34}{0,99 \cdot 13,85} = 0,02 < 1,0$$

⇒ svislice vyhovuje na vzpěr.

Posouzení svislice na tlak

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,34}{13,85} = 0,02 < 1,0$$

Posouzení svislice na tah

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,83}{9,0} = 0,09 < 1,0$$

⇒ svislice vyhovuje na tlak i tah.

Pata vazníku dle [20]

$$A = 0,013152 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{net}} = 0,9 \cdot A = 0,9 \cdot 0,013152 = 0,011837 \text{ m}^2$$

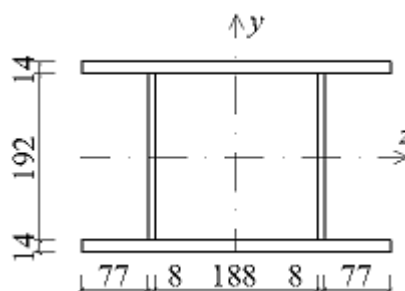
$$N_{\text{tlak}} = - 3,304 \text{ kN}$$

$$I_y = 11,654 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_z = 13,899 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$



$$\frac{c}{t} < 33\varepsilon$$

$$\frac{188}{14} = 13.43 < 33$$

⇒ třída průřezu 1

Posouzení na tlak

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,011837 \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 2782 \text{ kN}$$

$$N_{E,d} = 3,304 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} < 1,0$$

$$\frac{3,304}{2782} = 0,001 < 1,0$$

⇒ **patka vyhovuje na tlak.**

Posouzení na vzpěr

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{net} f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{net} f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,011837 \cdot 235 \cdot 10^6}{3304}} = 29,02$$

$$\Phi = 0,5 [1 + \alpha (\lambda' - 0,2) + \lambda'^2] = 0,5 [1 + 0,34 (0,309 - 0,2) + 0,309^2] = 0,565$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \lambda^2}} = \frac{1}{0,565 + \sqrt{0,565^2 - 0,309^2}} = 0,96$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{net} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,96 \cdot 0,011837 \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 2682 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} < 1,0$$

$$\frac{3,304}{2682} = 0,001 < 1,0$$

⇒ **patka vyhovuje na vzpěr.**

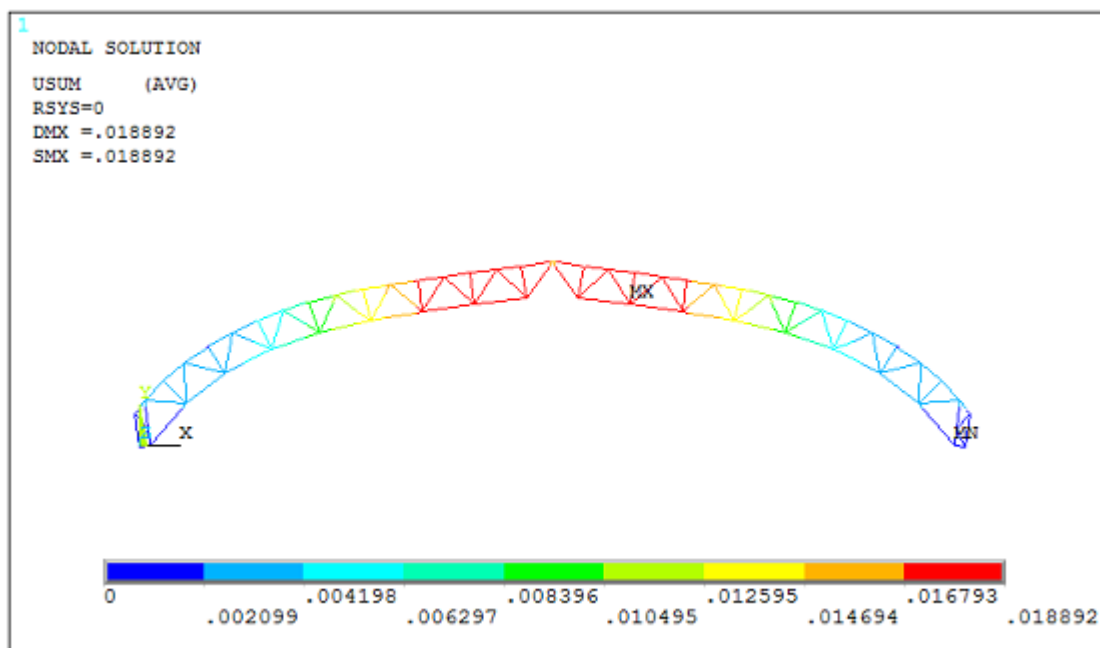
5.2. Posouzení vazníku na mezní stav použitelnosti

Průhyby byly sledovány ve čtvrtině rozpětí a vrcholu vazníku a také maximální průhyb. Největší průhyb ve čtvrtině vazníku a také maximální průhyb připadá kombinaci K8. Ve vrcholu vazníku je nejvyšší průhyb vyvozen kombinací K6. V tab. 5.2 jsou uvedeny hodnoty průhybů od jednotlivých kombinací. Žlutá políčka představují nejvyšší dosažený průhyb v určeném místě od příslušné kombinace.

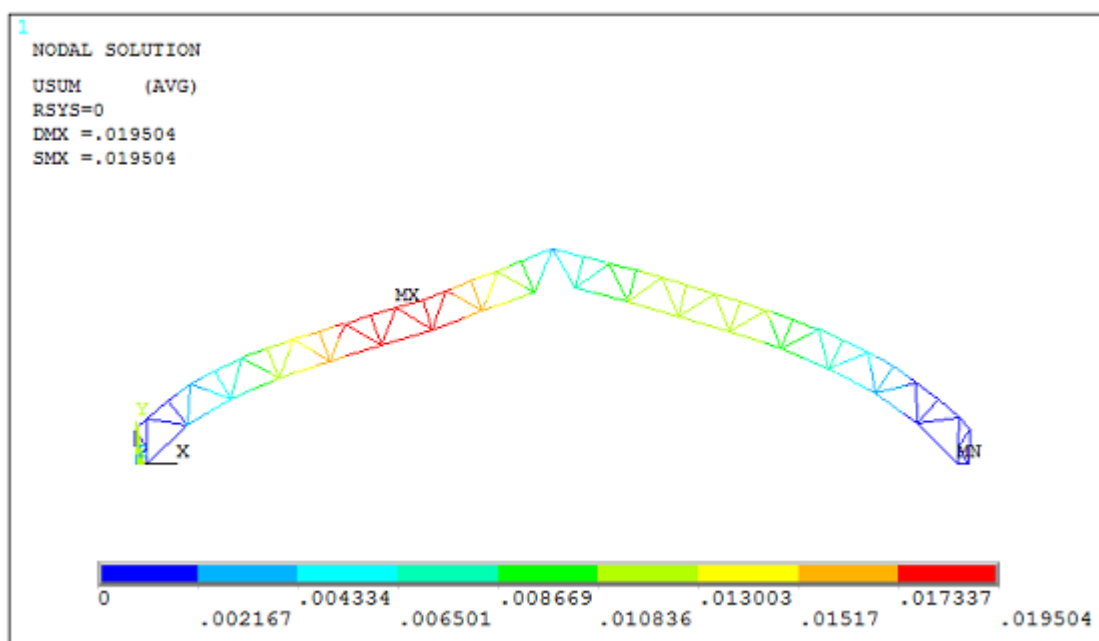
Tab. 5.2 Průhyby vazníku

Komb.	Průhyb vazníku [mm]								
	M1			M2			M3		
	ve čtvrtině	ve vrcholu	max.	ve čtvrtině	ve vrcholu	max.	ve čtvrtině	ve vrcholu	max.
K6	8,48	16,58	18,89	9,16	14,70	16,77	9,54	14,97	16,98
K7	9,49	5,88	19,44	4,11	6,63	16,42	7,31	11,26	17,71
K8	14,56	3,61	19,50	15,22	6,10	18,85	16,23	4,98	18,95
K9	9,43	9,78	16,36	3,99	3,59	13,59	7,19	4,92	13,69
K10	12,90	2,91	15,46	5,73	2,51	13,10	10,56	2,99	12,60

Největší průhyb ve vrcholu vazníku pro model M1 od kombinaci K6 je 16,58 mm (obr. 5.8) Hodnota průhybu od kombinace K8 ve čtvrtině vazníku činí 14,56 mm (obr. 5.9) a velikost maximálního průhybu je 19,50 mm.

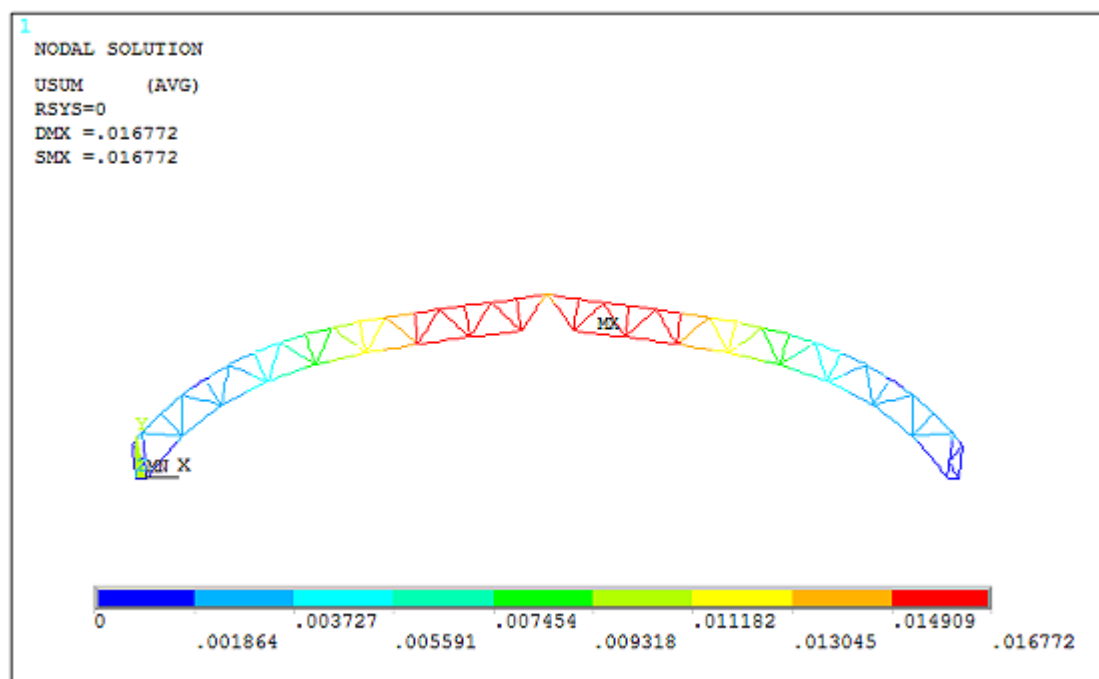


Obr. 5.8 Průhyb ve vrcholu vazníku s kloubově připojenými pruty – M1 (K6)

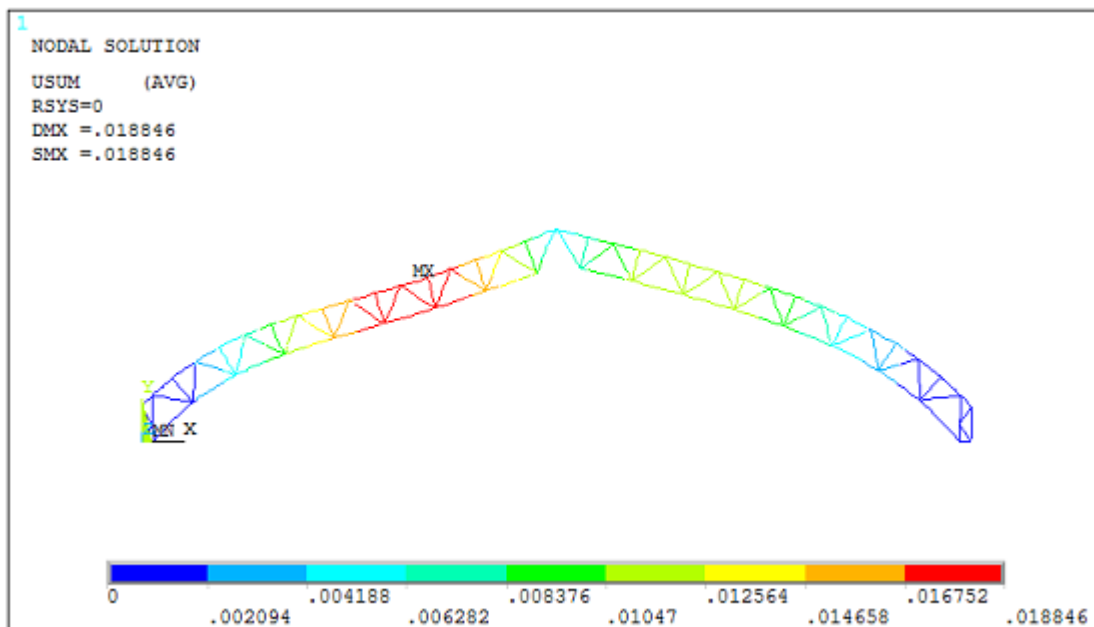


Obr. 5.9 Průhyb ve čtvrtině vazníku s kloubově připojenými pruty – M1 (K8)

Na obr. 5.10 je uveden průhyb ve vrcholu vazníku s tuze připojenými pruty o velikosti 14,7 mm. Obr. 5.11 ukazuje maximální průhyb od kombinace K8, který činí 18,85 mm a průhyb ve čtvrtině s velikostí 15,22 mm.

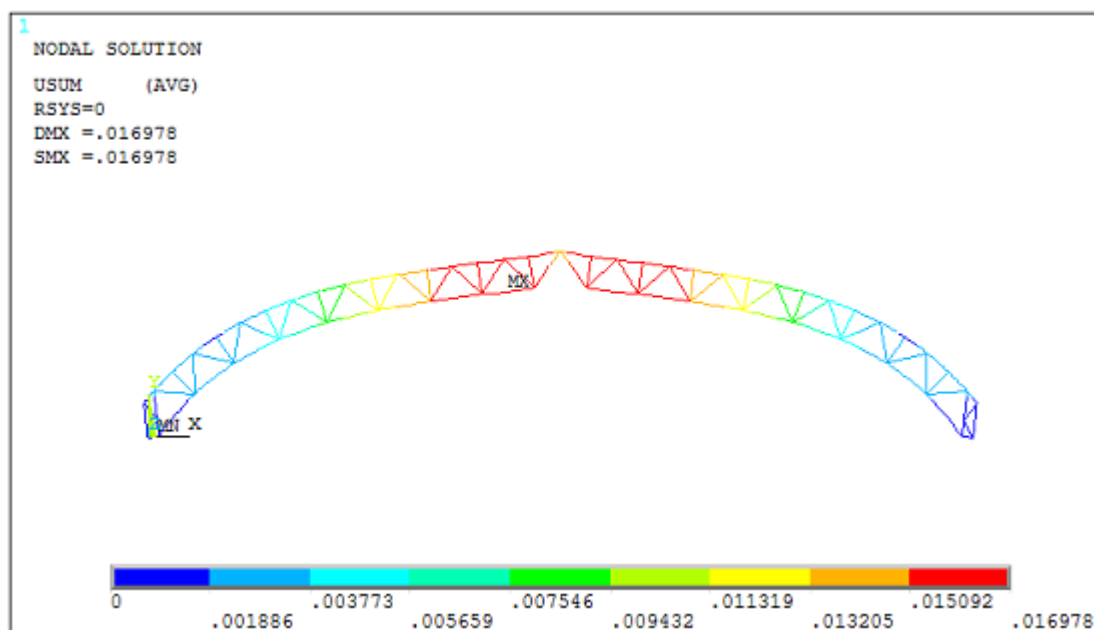


Obr. 5.10 Průhyb ve vrcholu vazníku s tuze připojenými pruty – M2 (K6)

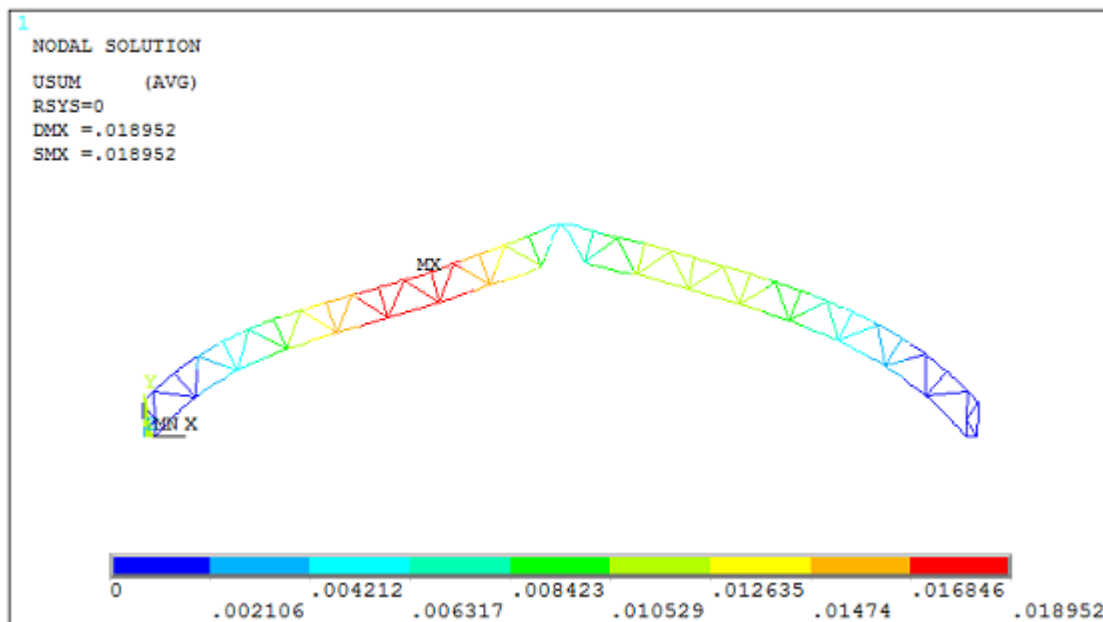


Obr. 5.11 Průhyb ve čtvrtině vazníku s tuze připojenými pruty – M2 (K8)

Průhyb ve vrcholu vazníku od kombinaci K6 je 14,97 mm (obr. 5.12). Maximální průhyb od kombinace K8 pro model s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami (M3) je 18,95 mm, průhyb ve čtvrtině vazníku činí 16,23 mm (obr. 5.13).



Obr. 5.12 Průhyb ve vrcholu vazníku s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami – M3 (K6)



Obr. 5.13 Průhyb ve čtvrtině vazníku s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami – M3 (K8)

Posouzení průhybu

$$\delta_{\text{lim}} = \frac{L_k}{600} = \frac{60\,000}{600} = 100 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{max}} = 19,50 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{lim}} > \delta_{\text{max}}$$

$$100 \text{ mm} > 19,50 \text{ mm}$$

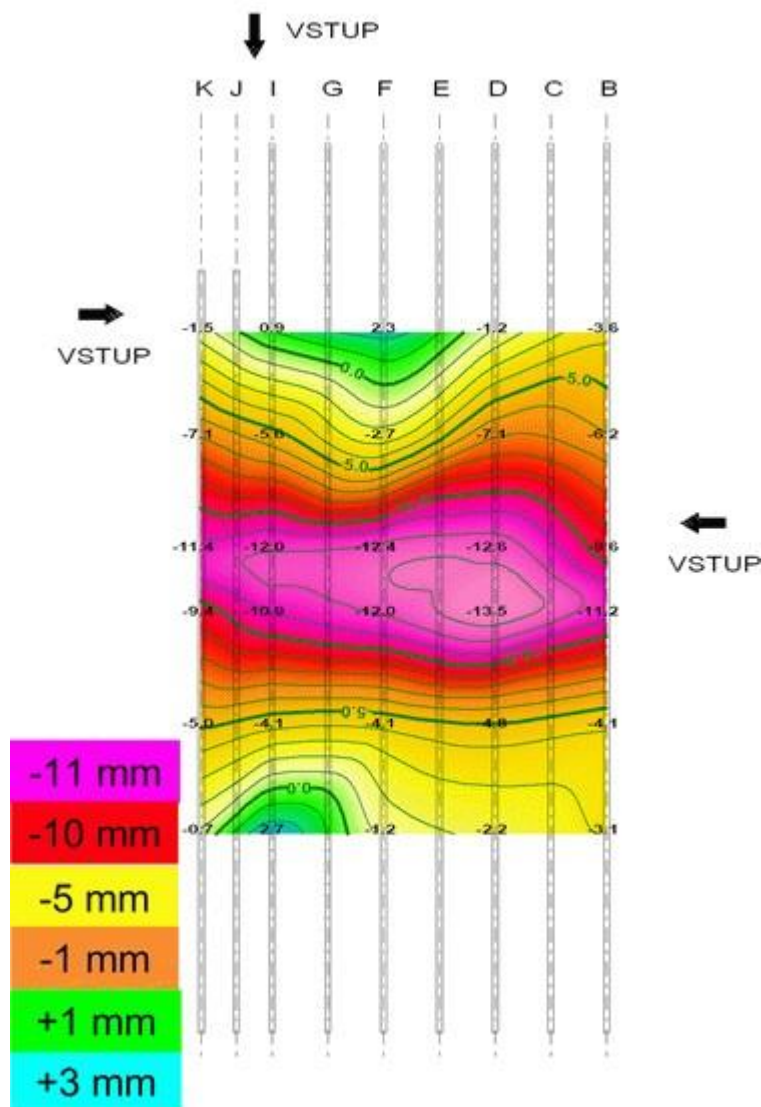
⇒ **střešní konstrukce vyhovuje na průhyb.**

Zhodnocení studie

Z výsledků pro mezní stav únosnosti je zřejmé, že pro návrh dřevěné střešní konstrukce se jeví na straně bezpečné model M1 od kombinace zatížení K3. Vzhledem ke kloubově připojeným prutům zde vznikají pouze normálové síly, na které je provedeno posouzení jednotlivých průřezů. Modely M2 a M3 vykazují přibližně podobné výsledky a s kombinací normálové síly a ohybového momentu hodnota napětí nepřekročí hodnotu napětí od normálové síly u modelu M1.

Pro mezní stav použitelnosti vzniká největší průhyb ve vrcholu od kombinace K6 u modelu M1. Průhyb ve čtvrtině vazníku a také celkově maximální průhyb vykazuje kombinace K8. Ve čtvrtině vazníku je nejvyšší posuv u modelu M3, ale maximální průhyb vzniká u modelu M1.

Vzhledem k tomu, že pravidelně probíhá měření a sledování této dřevěné střešní konstrukce (obr. 5.14) lze provést přibližné porovnání výsledků měření s výsledky získané pomocí modelů v programovém systému ANSYS. Měření se provádí pomocí soustavy měřických značek osazených na dolních pásech vazníků. Celá konstrukce je tvořena devíti oblouky a měřické značky jsou osazené na pěti z nich. Soustavu měřících bodů tvoří celkem 36 měřických značek [1], [2], [3], [6], [7], [29].



Obr. 5.14 Izočáry a hypsometrie (měření výškových rozdílů) svislých deformací [29]

Z obr. 5.14 je patrné, že svislá deformace ve vrcholu vazníku vychází přibližně 13 mm. Největší hodnota průhybu ve vrcholu vazníku získaná od kombinace K6 činí 16,58 mm. Z výsledků měření není však zřejmé, za jakých podmínek bylo měření prováděno, proto můžeme říci, že se porovnávané hodnoty výrazně neliší. Hodnota průhybu pro kombinaci zatěžovacích stavů od vlastní tíhy ZS1 a od stálého zatížení ZS2 by vycházela 7,6 mm.

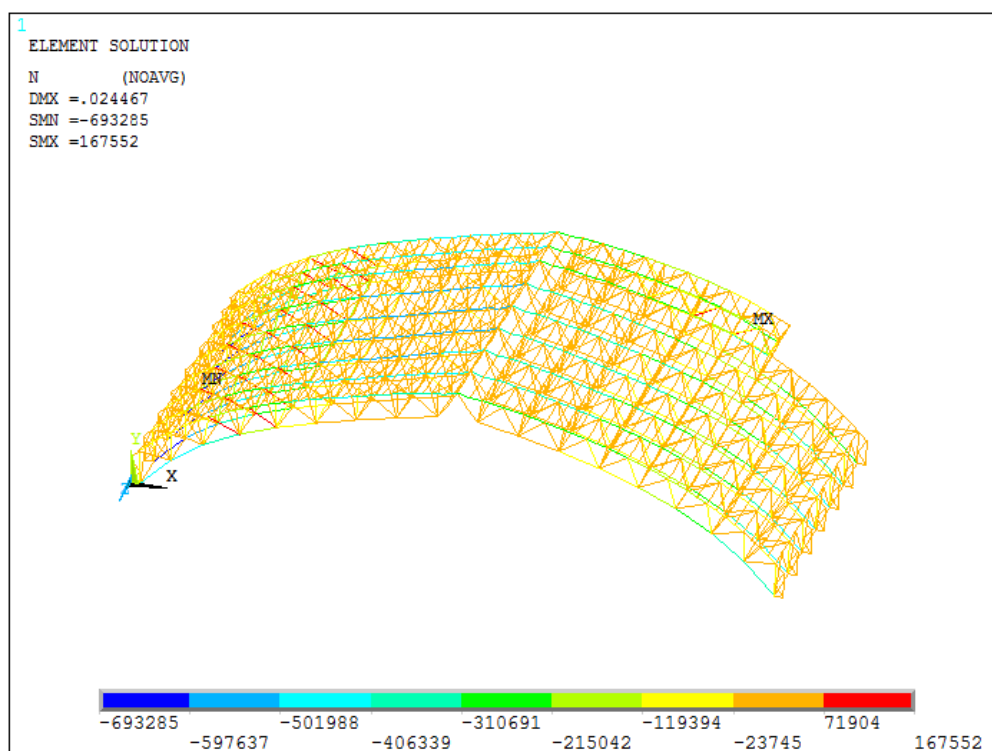
5.3. Vyhodnocení výsledků 3D modelu

Prostorový model byl zhotoven na kombinaci zatížení K3, která byla nejnepříznivější u rovinných modelů. V patách vazníku bylo zabráněno posuvům ve směru os x a y . Ve vrcholu vazníku byly uvolněny rotace kolem os z . Výsledky získané výpočtem v programu ANSYS v tab. 5.3.

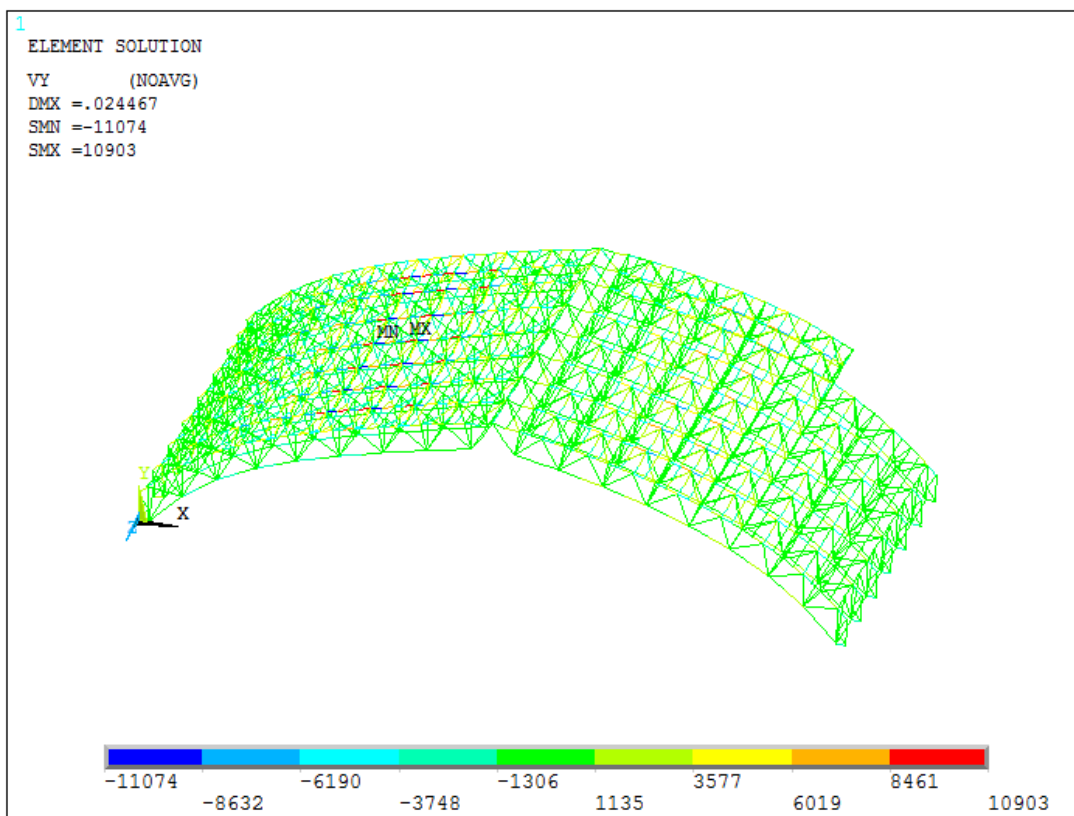
Tab. 5.3 Vybrané výsledky studie – MSÚ (kombinace K3)

Průřez	Prostorový model						
	Prut	N [N]	V_y [N]	V_z [N]	M_x [Nm]	M_y [Nm]	M_z [Nm]
horní pás	č. 12	-563 560	-10 124	-9 986	-268	2 446	-5 810
dolní pás	č. 26	-693 285	-958	66	-27	-172	-1 807
diagonála	č. 38	-146 210	605	964	-73	-1 786	977
	č. 39	109 390	-209	-291	-205	65	-173
nadpodp. svislice	č. 31	-55 429	283	-173	-44	175	264
svislice	č. 34	-1 865	334	132	13	-74	325
	č. 52	33 776	-25	1 497	47	-1 790	-92
pata vazníku	č. 27	1 334	2 508	135	103	86	584

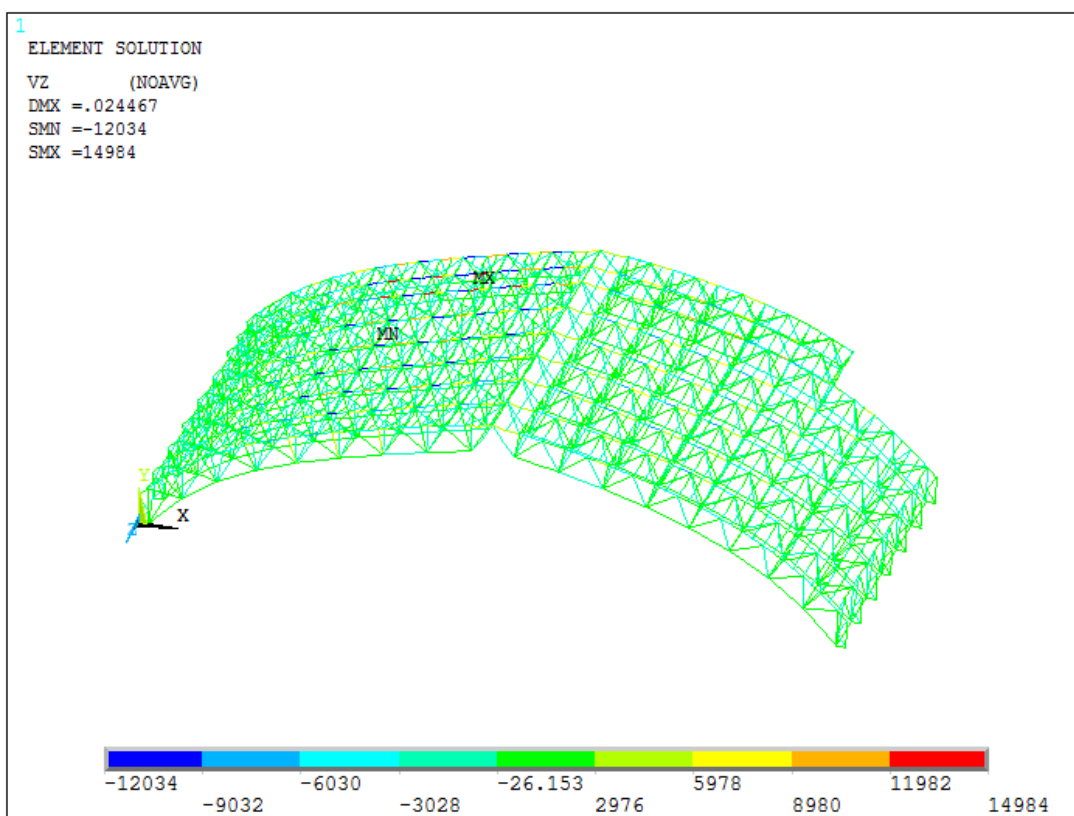
Na obr. 5.15 až obr. 5.20 jsou znázorněny výsledky normálových sil, posouvajících sil ve směru os y a z a ohybových momentů ve směru os x , y a z .



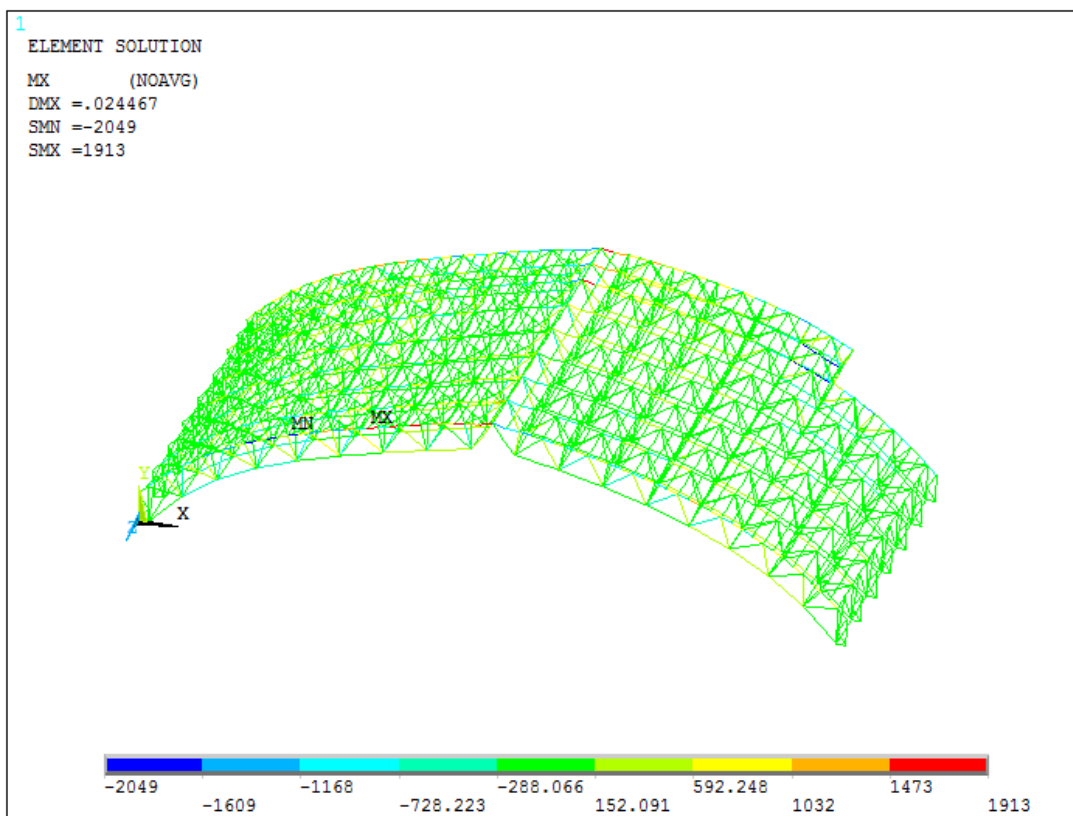
Obr. 5.15 Normálové síly 3D modelu s tuze připojenými pruty (K3)



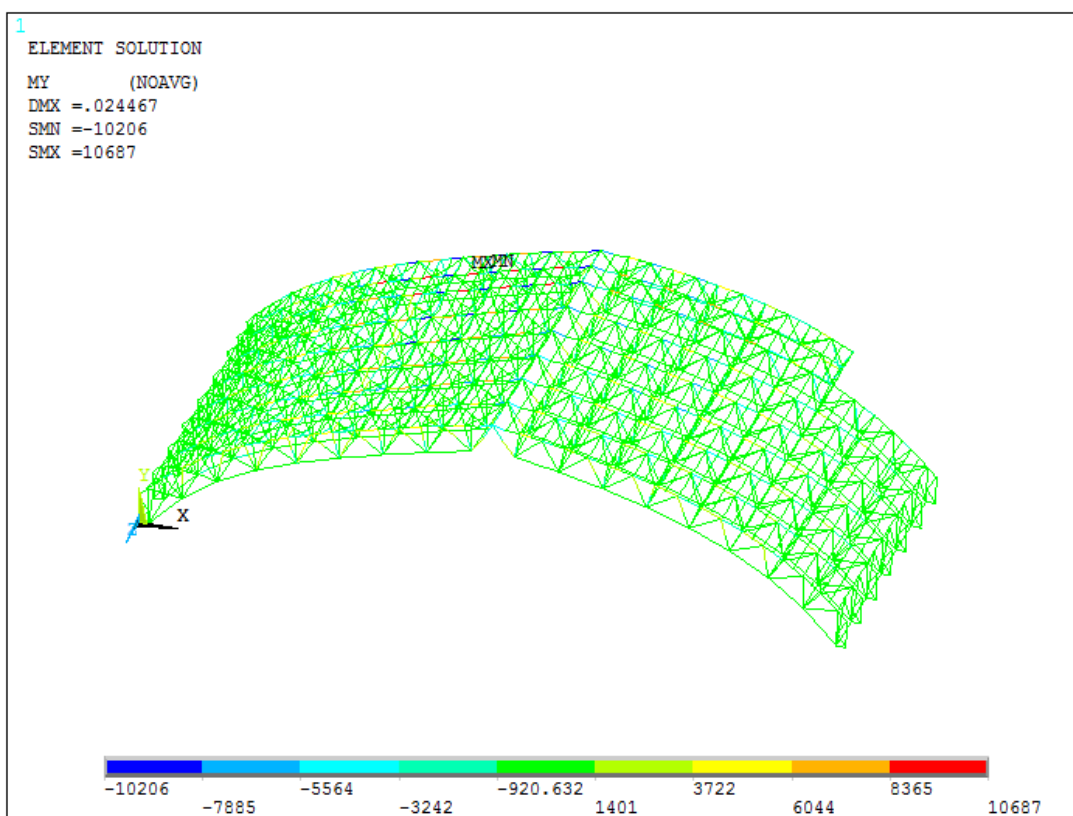
Obr. 5.16 Posouvající síly ve směru osy y 3D modelu s tuze připojenými pruty (K3)



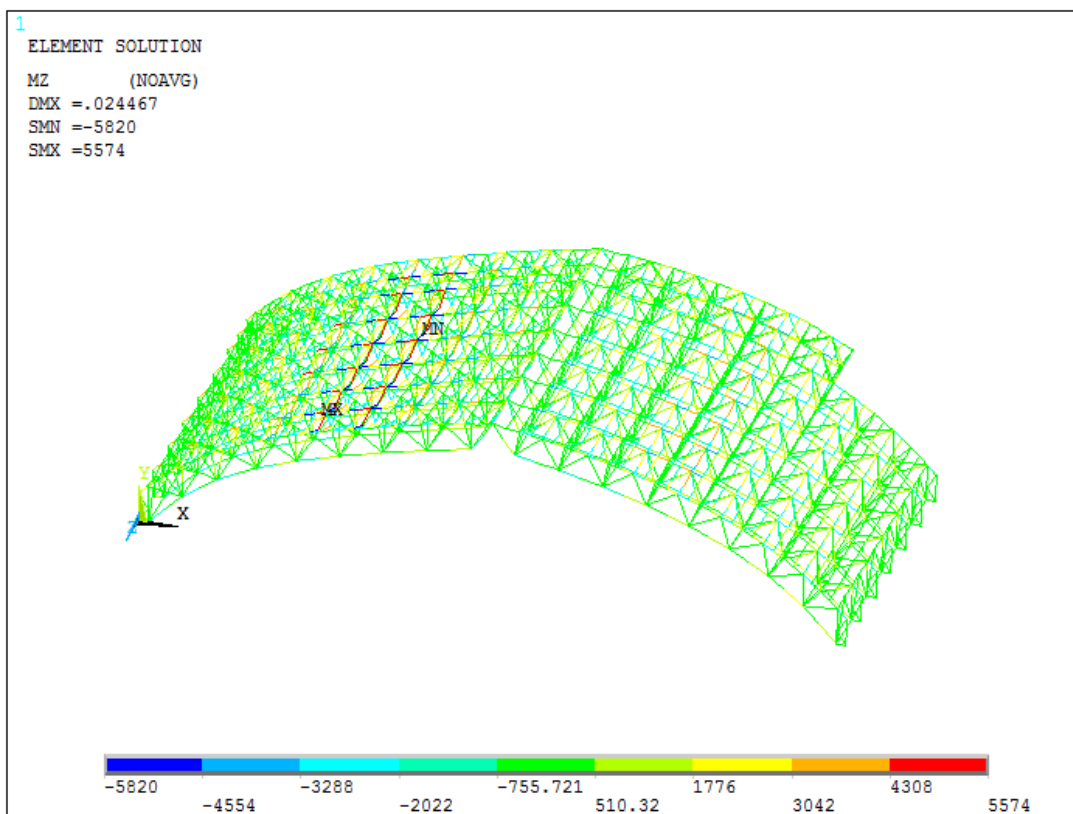
Obr. 5.17 Posouvající síly ve směru osy z 3D modelu s tuze připojenými pruty (K3)



Obr. 5.18 Kroutící moment M_x 3D modelu s tuze připojenými pruty (K3)



Obr. 5.19 Ohybový moment M_y 3D modelu s tuze připojenými pruty (K3)

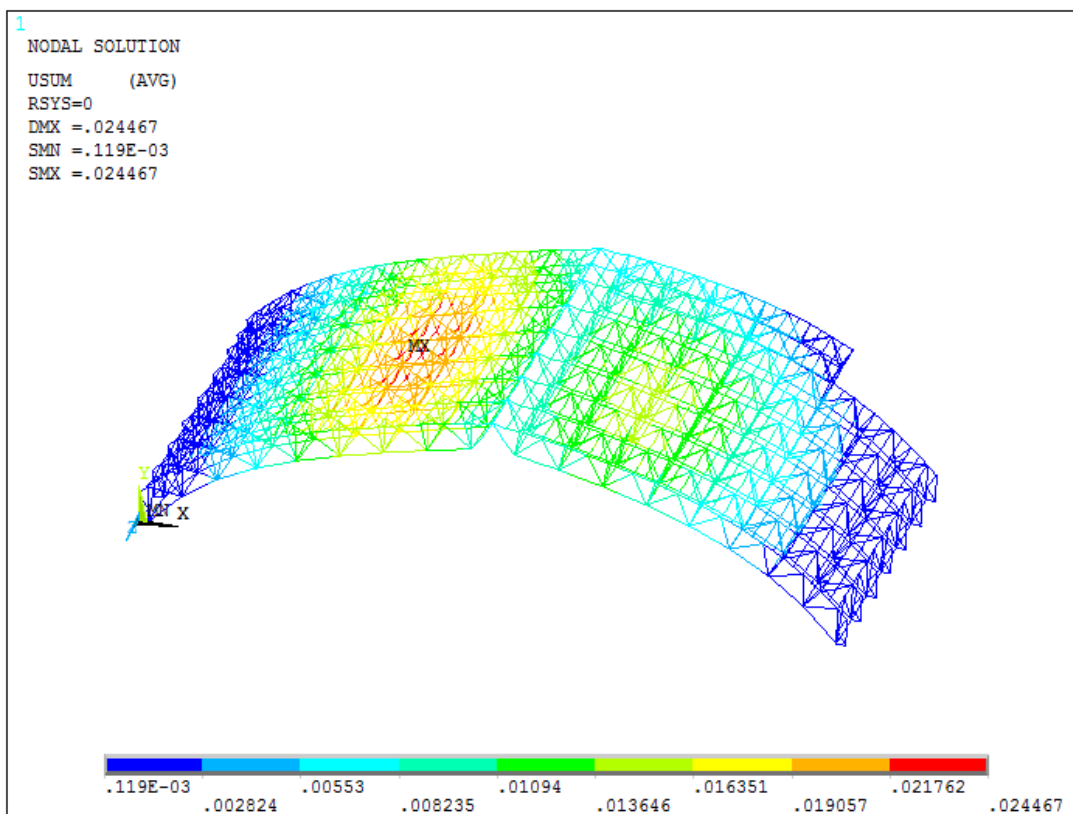


Obr. 5.20 Ohybový moment M_z 3D modelu s tuze připojenými pruty (K3)

Výsledky porovnávaných veličin získané z prostorového modelu se při porovnání s 2D model (tab. 5.1) liší. Zatímco hodnota normálové síly dolního pásu u 2D modelu M2 vyšla $-626\,290$ N, u 3D modelu činí normálová síla $-693\,285$ N. Tlaková síla horního pásu rovinného modelu je srovnatelná s hodnotou $-544\,320$ N a prostorového modelu $-563\,560$ N. Hodnoty normálových sil v diagonálách vycházejí podobné. U svislice (prut č. 34) vycházel u 2D modelu tlak (-362 N) zatímco u 3D modelu $-1\,865$ N). V tab. 5.4 srovnání výsledků 3D a 2d modelu.

Tab. 5.4 Porovnání výsledků 3D a 2D modelu (K3)

Průřez	Prostorový model (3D)				Rovinný model M2 (2D)		
	Prut	N [N]	V_y [N]	M_z [Nm]	N [N]	V_y [N]	M_z [Nm]
horní pás	č. 12	-563 560	-10 124	-5 810	-544 320	9 028	2 458
dolní pás	č. 26	-693 285	-958	-1 807	-626 290	-27	-1 316
diagonála	č. 38	-146 210	605	979	-144 930	540	889
	č. 39	109 540	-209	-173	109 840	-138	-198
nadpodp. svislice	č. 31	-55 429	283	264	-43 972	644	-457
svislice	č. 34	-1 865	334	325	-362	326	326
	č. 52	33 776	-25	-92	24 414	113	-66
pata vazníku	č. 27	1 334	2 508	584	2 206	2 673	346



Obr. 5.21 Svislé deformace vazníku s tuze připojenými pruty (K8)

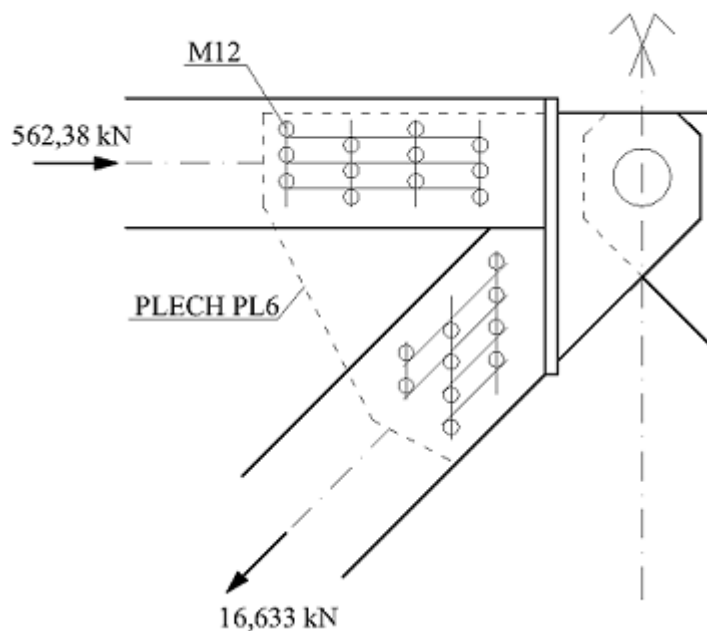
Průhyby vazníku 3D modelu ve čtvrtině rozpětí, ve vrcholu vazníku a maximální průhyb ve srovnání s 2D modelem ukazují přibližně stejné hodnoty. Výjimku tvoří hodnota maximálního průhybu, která činí 24,47 mm, zatímco u 2D modelu vyšel průhyb 18,85 mm. Srovnání hodnot průhybu je v tab. 5.5.

Tab. 5.5 Porovnání výsledků 3D a 2D modelu (K3)

Komb.	Svislý posuv [mm]					
	Prostorový model			Rovinný model M2		
	čtvrtina	vrchol	max.	čtvrtina	vrchol	max.
K8	16,31	7,37	24,47	15,22	6,10	18,85

5.4. Posouzení spoje

Posuzovaný spoj se nachází ve vrcholu vazníku. Je navržen z kolíků M12 a ze styčnickového plechu tl. 6 mm z každé strany. Schéma spoje je na obr. 5.15.



Obr. 5.15 Schéma spoje vrcholového kloubu

Pevnost dřeva v otláčení

$$f_{n,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} = 0,082 \cdot 410 \cdot 12^{-0,3} = 15,95 \text{ MPa}$$

Moment únosnosti kolíku

$$M_{y,k} = 0,3 f_u d^{2,6} = 0,3 \cdot 235 \cdot 10^3 \cdot 0,012^{2,6} = 0,715 \text{ kNm}$$

Minimální charakteristická únosnost dvou stříhů jednoho kolíku

$$F_{v,Rk1} = f_{n,k} t_1 d = 15,95 \cdot 10^3 \cdot 0,16 \cdot 0,012 = 30,624 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rk2} = 0,5 f_{n,k} t_2 d = 0,5 \cdot 15,95 \cdot 10^3 \cdot 0,16 \cdot 0,012 = 15,312 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{v,Rk3} &= 1,05 \frac{f_{n,k} t_1 d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \beta (1 + \beta) + \frac{4 \beta (2 + \beta) M_{y,k}}{f_{n,k} d t_1^2}} - 1 \right] = \\ &= 1,05 \frac{15,95 \cdot 0,16 \cdot 12}{2 + 1} \cdot \left[\sqrt{2 (1 + 1) + \frac{4 (2 + 1) \cdot 0,715}{15,95 \cdot 12 \cdot 0,16^2}} - 1 \right] = \\ &= \mathbf{14,99 \text{ kN}} \end{aligned}$$

$$F_{V,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2 M_{y,k} f_{n,k} d} = 1,15 \sqrt{\frac{2}{2}} \sqrt{2 \cdot 0,715 \cdot 15,95 \cdot 12} =$$

$$= 19,03 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost na jeden kolík

$$F_{V,Rd} = k_{\text{mod}} \frac{F_{V,Rk3}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{14,99}{1,3} = 10,38 \text{ kN}$$

Nutný počet kolíků

$$n > \frac{N_{\text{tlak}}/2}{F_{V,Rd}} = \frac{562,38/2}{10,38} = 27,09$$

Potřebný počet samotných kolíků bez styčnickového plechu

$$n = 28$$

Ve spoji se nachází 12 kolíků a styčnickový plech tl. 6 mm z obou stran.
Návrhová síla pro 12 kolíků je

$$F_{12k} = 12 F_{V,Rd} = 12 \cdot 10,38 = 124,56 \text{ kN.}$$

Zbytek návrhové síly přenášené styčnickovým plechem

$$F_s = \frac{N_{\text{tlak}}}{2} - F_{12k} = \frac{562,38}{2} - 124,56 = 156,63 \text{ kN}$$

Posouzení styčnickového plechu

$$A_{\text{sp}} = 0,145 \cdot 0,006 + 0,0365 \cdot 0,006 = 0,001089 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{sp,net}} = A_{\text{sp}} - 3 \pi r^2 = 0,001089 - 3 \pi \cdot 0,006^2 = 0,00075 \text{ m}^2$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{\text{sp,net}} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,00075 \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 176,18 \text{ kN}$$

$$N_{E,d} = 156,63 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{E,d}}{N_{c,Rd}} < 1,0$$

$$\frac{156,63}{176,18} = 0,89 < 1,0$$

⇒ **styčnickový plech tl. 6 mm vyhovuje na tlak.**

6. Závěr

Statické řešení dřevěné střešní konstrukce provedené výpočetním systémem ANSYS ukázalo dobrou shodu s původním řešením [14]. Konstrukce realizovaná v roce 2001 vyhověla na posouzení mezního stavu únosnosti i mezního stavu použitelnosti.

V této práci byly uvažovány tři rovinné numerické modely (2D) vazníku s různým připojením prutů do uzlů a jeden prostorový model (3D). Rovinné modely se lišily tak, že model M1 uvažoval klasický příhradový nosník, tj. všechny pruty kloubově připojené do styčnicků. Model M2 představoval klasický rám s tuze připojenými pruty do uzlů. Model M3 tvoří “polorám” s průběžnými pásy a kloubově připojenými svislicemi a diagonálami. Prostorový model byl uvažován s tuhými uzly.

Z 2D modelů se jevil jako méně příznivý model M1. U tohoto modelu bylo provedeno posouzení šesti různých průřezů, neboť se to nejvíce přibližovalo původnímu návrhu [14]. Přitom všechny posudky podle ČSN EN 1995-1-1 [18] vyhověly. Na rozdíl od modelu M1 se nejhospodárnější jeví model M2, který vykazuje nejmenší normálové síly a při kombinaci s ohybovým momentem velikost normálového napětí nepřekročí odpovídající hodnotu napětí zjištěnou u modelu M1. Model M3 vykazuje podobné výsledky jako model M2, ale výsledná hodnota napětí je o něco vyšší.

Posouzení vazníku na mezní stav použitelnosti vyhovuje ve všech třech modelech. Limitní hodnota průhybu požadovaná normou je mnohem větší než největší hodnota získaná z nejnepříznivější kombinace K8 ve čtvrtině rozpětí vazníku u modelu M1.

Protože byly získány výsledky z měření [29] dřevěné střešní konstrukce z října 2012, je možné provést srovnání s numerickými modely. Není však zřejmé, za jakých podmínek a v jakém období bylo toto měření provedeno. Přesto porovnání výsledného maximálního průhybu ve vrcholu vazníku, získaného z měření, a maximálního průhybu od kombinace K6 (s plným sněhem) se příliš neliší. Pro kvalifikované porovnání by bylo potřeba zjistit podmínky měření a přizpůsobit daný model těmto podmínkám.

Dále v práci je uvedeno posouzení vybraného spoje ve vrcholu obloukového vazníku a posouzení uložení ocelové paty vazníku. Spoj ve vrcholu vazníku je tvořen kolíky a styčnickovým plechem a dle očekávání vyhověl [14].

Pro další pokračování v této práci by bylo vhodné se zabývat spoji a detaily posuzované konstrukce. Při modelování konstrukce pomocí objemových konečných prvků by bylo možné detailně vystihnout ortotropní vlastnosti dřeva a porovnat s klasickým řešením s využitím izotropního materiálu.

7. Použitá literatura:

- [1] BUREŠ, J., SLÁMA, J. Měření deformací ocelových střešních vazníků výrobní haly výhybkárny Prostějov., příspěvek na konferenci *38. Geodetické informační dny*, ISBN 80-86433-13-7, Econ, Brno, 2002
- [2] BUREŠ, J., STRAKA, B. Geodetické metody při měření přetvoření dřevěných konstrukcí velkých rozpětí, příspěvek na konferenci *Experiment 04*, ISBN 80-7204-354-4, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2004
- [3] DANĚK, M. Využití trigonometrického měření pro určení skutečného tvaru, posunů a deformací speciální konstrukce. Diplomová práce, VUT v Brně, 63 stran, 2002
- [4] GANDELOVÁ, L. Nauka o dřevě lesnické a dřevařské fakulty MZLU v Brně. Kapitola 1
- [5] JIRÁSEK, M., ZEMAN, J. *Přetváření a porušování materiálů. Dotvarování, lom, plasticita a poškození*. Skripta. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03310-4
- [6] KALINA, M., BUREŠ, J. Dlhodobé sledovanie drevenejej strešnej koňstrukcie športovej haly. *13. odborná konference doktorského studia*. Vysoké učení technické v Brně, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, Česká republika, ISBN 978-80-214-4232-0, 2011
- [7] KALINA M. Geodetické měření posunů a deformací dřevěné střešní konstrukce velkého rozpětí. Diplomová práce. VUT v Brně, 2010
- [8] KOŽELOUH, B. *Dřevěné konstrukce podle eurokódu 5, Step 1, Navrhování a konstrukční materiály. 1995*.
- [9] KUKLÍK, P. *Dřevěné konstrukce*, skripta. ČVUT v Praze, fakulta stavební, Praha 2005, ISBN 80-01-03310-4
- [10] KUKLÍK, P. *Navrhování dřevěných konstrukcí*. Technická knižice autorizovaného inženýra a technika, Praha 1997, ISBN 80-86047-19-9
- [11] POŽGAJ, A. a kolektiv. *Štuktúra a vlastnosti dreva*, 1997
- [12] STRAKA, B., SÝKORA, K. *Dřevěné konstrukce, modul BO03 – M01 Mechanické vlastnosti dřeva*. Studijní opory pro studijní program s kombinovanou formou studia. Fakulta stavební VUT Brno.
- [13] STRAKA, B., SÝKORA, K. *Dřevěné konstrukce, modul BO03 – M02 Prvky dřevěných konstrukcí*. Studijní opory pro studijní program s kombinovanou formou studia. Fakulta stavební VUT Brno.
- [14] STRAKA, B. Víceúčelová hala Bílovec. Statický výpočet a výkresová část
- [15] Theory reference. ANSYS 11.0

Normy

- [16] ČSN EN 1990 *Zásady navrhování konstrukcí*. 2003
- [17] ČSN EN 1991-1-3 *Zatížení konstrukcí. Část 1-3: Obecná zatížení – zatížení sněhem*. 2004
- [18] ČSN EN 1991-1-4 *Zatížení konstrukcí. Část 1-4: Obecná zatížení – zatížení větrem*. 2007
- [19] ČSN EN 1995-1-1 *Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2006
- [20] ČSN EN 1993-1-1 *Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2006

Internetové odkazy

- [21] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Todayi18s3200.jpg>
- [22] http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdrevva/2.pdf
- [23] <http://divysveta.webz.cz/asia/budha.htm>
- [24] http://etext.czu.cz/php/skripta/kapitola.php?titul_key=64&idkapitola=140
- [25] <http://evawolna.sweb.cz/prvak-mat3.php>
- [26] http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_vad/obr/trhlina_vysusna_05.jpg
- [27] <http://foto.mapy.cz/231638-Essing-drevena-lavka-pres-Altmuhl-Kanal>
- [28] http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska_drevo.pdf
- [29] <http://stavba.tzb-info.cz/drevene-a-ocelove-konstrukce/9106-zavery-z-mereni-deformaci-vybranych-drevenych-konstrukci-geodetickymi-metodami>
- [30] <http://skolajarov.ic.cz/nauka/vady.pdf>
- [31] <http://tvstav.cz/clanek/1667-bohdanka-nejvyssi-drevena-rozhledna-v-evrope>
- [32] <http://www.drevostavitel.cz/clanek/metropol-parasol>
- [33] <http://www.horskedrahy.eu/hlavni-menu/rekordy/colossos.html>
- [34] <http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/vlastnosti-damasku.php>
- [35] <http://www.peletkybrikety.cz/jch1.als.cz/obrc1-lepene-lamelove-drevo-technicke-udaje-11-11>
- [36] <http://www.yatzer.com/Metropol-Parasol-The-World-s-Largest-Wooden-Structure-J-MAYER-H-Architects>
- [37] <http://www.wintech.cz/cs/wintech-woodwork/katalog/stycnikova-deska-290/stycnikove-desky-7511>

8. Seznam symbolů

A	plocha průřezu	$[m^2]$
A_{net}	oslabená plocha průřezu	$[m^2]$
b	šířka průřezu	$[m]$
C_{dir}	součinitel směru větru	$[-]$
C_e	součinitel expozice	$[-]$
$C_o(z)$	součinitel orografie	$[-]$
C_{pe}	vnější součinitel tlaku	$[-]$
$C_r(z)$	součinitel drsnosti terénu	$[-]$
C_{season}	součinitel ročního období	$[-]$
C_t	tepelný součinitel	$[-]$
D	průměr ocelové kuličky	$[m]$
d	průměr kolíku	$[m]$
E	modul pružnosti v tahu a tlaku	$[Pa]$
$E_{0,05}$	hodnota 5% kvantilu modulu pružnosti	$[Pa]$
F	působící na plochu A	$[N]$
$F_{v,Rd}$	návrhová únosnost kolíku	$[N]$
$f_{c,0,d}$	návrhová pevnost v tlaku	$[Pa]$
$f_{c,0,k}$	charakteristická pevnost v tlaku	$[Pa]$
$f_{n,k}$	charakteristická pevnost v otláčení	$[Pa]$
$f_{t,0,d}$	návrhová pevnost v tahu	$[Pa]$
$f_{t,0,k}$	charakteristická pevnost v tahu	$[Pa]$
f_u	charakteristická pevnost v tahu kolíků	$[Pa]$
G	modul pružnosti ve smyku	$[Pa]$
h	výška průřezu	$[m]$
I	moment setrvačnosti	$[m^4]$
$I_v(z)$	turbulence větru	$[-]$
i	poloměr setrvačnosti	$[m]$
k_c	součinitel vzpěrnosti	$[-]$
k_{mod}	modifikační součinitel	$[-]$
k_r	součinitel terénu	$[-]$
L_{cr}	vzpěrná délka prutu	$[m]$
L_k	délka konstrukce	$[m]$

l	původní délka	[m]
N_{tah}	tahová normálová síla	[N]
N_{tlak}	tlaková normálová síla	[N]
n	počet kolíků	[-]
$q_p(z)$	maximální dynamický tlak	[Nm ⁻²]
S_k	charakteristická hodnota zatížení sněhem	[Nm ⁻²]
s	zatížení sněhem	[Nm ⁻²]
v_b	základní rychlost větru	[ms ⁻¹]
$v_m(z)$	charakteristická střední rychlost větru	[ms ⁻¹]
W_p	energie pružné deformace	[J]
w_e	zatížení větrem	[Nm ⁻²]
z_0	parametr drsnosti terénu	[m]
z_{min}	minimální výška	[m]
β	poměr pevností v otláčení	[-]
γ	zkosení, deformace způsobená smykovým napětím	[-]
γ_M	dílčí součinitel bezpečnosti pro vlastnosti materiálu	[-]
δ	průhyb konstrukce	[m]
Δl	změna délky	[m]
ε	poměrné přetvoření	[-]
λ	štíhlostní poměr	[-]
λ_{rel}	relativní štíhlostní poměr	[-]
μ_i	tvarový součinitel zatížení sněhem	[-]
ν	Poissonův součinitel	[-]
ρ	hustota vzduchu	[kgm ⁻³]
ρ_k	hustota dřeva	[kgm ⁻³]
σ	napětí v tahu	[Pa]
$\sigma_{t,0,d}$	normálové napětí v tahu	[Pa]
$\sigma_{c,0,d}$	normálové napětí v tlaku	[Pa]
$\sigma_{c,crit}$	kritické napětí	[Pa]
σ	normálové napětí	[Pa]
τ	smykové napětí	[Pa]