

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

Teoretická a experimentální analýza tesařského spoje

Diplomová práce

Autor: Bc. Eliška Točíková

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD.

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Eliška Točíková

Dřevěné konstrukce a stavby na bázi dřeva

Název práce

Teoretická a experimentální analýza tesařského spoje

Název anglicky

Theoretical and Experimental Analysis of the Selected Carpenter Connector

Cíle práce

Porovnání výpočtového modelu s reálným působením spoje.

Metodika

Analýza rybinového spoje bude vypracovaná v rámci dostupných numerických metod. Vybrané typy spojů budou experimentálně ověřené pro účinek tahové a tlakové síly a také na účinek ohybového momentu. V konstrukci krovu bude analyzovaný vliv rybiny jako kloubu, pružného vetknutí a vetknutí pro rozložení vnitřních sil rámu v rovině (vazbě).

Harmonogram:

červenec – říjen 2020: Studium literatury, rešerše, tesařské spoje-zhotovování

listopad 2020 – únor 2021: Statická analýza, modelování, příprava experimentu, zkoušení spoje

březen 2021: Porovnání výsledku – výpočet, modelování, experiment

duben 2021: Odevzdání závěrečné práce

Doporučený rozsah práce

50 stran + přílohy

Klíčová slova

rybinový spoj, tesařský spoj, poddajnost spoje, statická analýza

Doporučené zdroje informací

Kohout, J. – Tobek, A.: Tesařství, Grada, 1996

Meisel, A.: Historische Dachwerke – Beurteilung, realitätsnahe statische Analyse und Instandsetzung, Verlag der TU Graz, 2015

Porteous, J. – Kermani, A.: Structural Timber Design to Eurocode 5, Wiley-Blackwell, 2013

Sandhaas, C. – Munch-Andersen, J. – Dietsch, P.: Design of Connections in Timber Structures, COST, 2018

Schickhofer, G. – Brandner, R.: Modellbildung fuer Produkte und Kontruktionen aus Holz – Bedeutung von Simulation und Experiment, Verlag der TU Graz, 2008

Vinař, J.: Historické krovy, Grada, 2010

Vinař, J.: Historické krovy II, Grada, 2005

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 16. 7. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 18. 10. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 02. 04. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Teoretická a experimentální analýza tesařského spoje" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 2.4.2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu práce panu doc. Ing. Jaroslavu Sandanusovi, PhD. za rady, připomínky a trpělivost, které mě vedly při vypracování diplomové práce.

Teoretická a experimentální analýza tesařského spoje

Souhrn

Práce zkoumá vliv modelování rybinově plátovaných spojů jako kloubů nebo vetknutí pro rozložení vnitřních sil v prvcích krovu, řeší porovnání různých modelů podpor krovu a zabývá se statickým posudkem vybraných prvků a spojů v konstrukci historického krovu. V úvodní části práce je vytvořen přehled tradičních krovových konstrukcí do cca poloviny 19. století, jejich prvků a spojů. Úvod je zakončen výčtem druhů rybinových přeplátování užívaných v historických krovech. Následuje tvorba devíti modelů krovu s různě modelovanými spoji a podporami, výpočet zatížení konstrukce a určení kombinací těchto zatížení v různých mezních stavech únosnosti a použitelnosti pro výpočet vnitřních sil a deformací v numerickém programu Scia Engineer. Výsledky z výpočtového programu jsou porovnány v obrázcích a tabulkách a slouží k vyhodnocení vhodného modelu spojů a podpor, který je následně využit ke statickému posouzení navržených prvků a spojů krovu. Součástí statického posudku je návrh průřezů nevyhovujících prvků krovu. Od experimentální analýzy rybinových spojů bylo upuštěno, v textu jsou ale zmíněné práce jiných autorů, kteří se danou problematikou zabývali.

Klíčová slova: tesařský spoj, rybinový spoj, tuhost spoje, statická analýza, historický krov

Theoretical and Experimental Analysis of the Selected Carpentier Connector

Summary

The thesis examines the effect of modeling dovetailed joints as free to rotate joints or rigid joints for the distribution of internal forces in the truss elements, addresses the comparison of different models of truss supports and deals with a structural analysis of selected elements and joints in the construction of a historic truss. In the introductory part of the work, an overview of traditional truss constructions up to the middle of the 19th century, their elements and connections is created. The introduction ends with a list of types of dovetail joints used in historic trusses. This is followed by the creation of nine truss models with differently modeled connections and supports, the calculation of structural loads and the determination of combinations of these loads in various limit states of bearing capacity and usability for the calculation of internal forces and deformations in the numerical program Scia Engineer. The results from the computer software are compared in figures and tables and serve to evaluate a suitable model of connections and supports, which is subsequently used for static assessment of the designed elements and connections of the truss. Part of the static assessment is the design of cross-sections of non-compliant elements of the truss. The experimental analysis of dovetail joints was omitted, but the text mentions the works of other authors who dealt with the given issue.

Keywords: carpentry joint, dovetail joint, stiffness of a joint, structural analysis, historical roof truss

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 10 |
| 1.1 | Motivace..... | 10 |
| 1.2 | Historický vývoj dřevěných konstrukcí a tesařských spojů | 10 |
| 1.3 | Hrad Krásna Hôrka..... | 14 |
| 2 | Cíle práce | 17 |
| 3 | Přehled tradičních krovových konstrukcí | 18 |
| 3.1 | Historické krovy | 18 |
| 3.1.1 | Rozdělení střech dle tvaru..... | 19 |
| 3.1.2 | Vývoj krovů v Evropě..... | 20 |
| 3.1.3 | Typologie krovů | 24 |
| 3.1.4 | Konstrukční prvky klasických krovů a jejich spojování | 41 |
| 4 | Rybinové přeplátování v historických krovech..... | 49 |
| 4.1.1 | Vývoj plátových spojů..... | 49 |
| 4.1.2 | Druhy příčného rybinového přeplátování | 49 |
| 5 | Metodika | 53 |
| 6 | Popis konstrukčního provedení a zatížení krovu..... | 55 |
| 6.1 | Geometrie krovu | 55 |
| 6.1.1 | Řez | 57 |
| 6.1.2 | Půdorys..... | 58 |
| 6.2 | Modely konstrukce..... | 59 |
| 6.3 | Zatížení | 63 |
| 6.3.1 | Zatěžovací stavy..... | 63 |
| 6.3.2 | Kombinace | 69 |
| 7 | Porovnání modelů spojů a podpor | 72 |
| 7.1 | Porovnání reakcí a vnitřních sil..... | 72 |
| 7.1.1 | Jalová vazba | 72 |
| 7.1.2 | Plná vazba..... | 80 |
| 7.1.3 | Výměny..... | 84 |
| 7.2 | Porovnání deformací modelů | 90 |
| 7.2.1 | Přemístění uzlů | 90 |
| 7.2.2 | Deformace konstrukce | 93 |
| 7.3 | Vyhodnocení vhodného modelu podpor | 98 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.4 | Posouzení kloubového modelu | 104 |
| 7.4.1 | Materiálové charakteristiky a součinitele | 104 |
| 7.4.2 | Posudek vybraných prvků..... | 104 |
| 7.4.3 | Posudek rybinového přeplátování jako kloubového spoje | 110 |
| 7.5 | Porovnání výsledků posudků průřezů v modelech krovu s kloubovými a tuhými spoji..... | 114 |
| 8 | Závěr | 116 |
| 9 | Zdroje/seznam použité literatury..... | 118 |

1 Úvod

1.1 Motivace

Historické krovy jsou vrcholem tesařského umění v Evropě, kde se nacházejí dřevěné konstrukce zastřešení staré stovky let. Z celosvětového hlediska jsou špičkou dřevěného stavitelství celodřevěné chrámy v Asii, nejstarší stojí zachován již 1300 let. Smyslem zkoumání těchto konstrukcí je nejen zachování jejich kulturní, estetické a funkční hodnoty, ale také hlubší pochopení statického působení a trvanlivosti staveb ze dřeva. Po celém světě nacházíme důkazy nenahraditelných výhod dřeva a jiných rostlinných stavebních materiálů, přesto je možnostem jejich masivního využití v kontextu klimatické a materiálové krize věnována stále malá pozornost, obzvlášť v České a Slovenské republice, kde je použití těchto materiálů v novostavbách a rekonstrukcích zastoupeno velmi málo oproti materiálům jako jsou ocel, pálené cihly nebo beton. Přitom dřevo v těchto zemích skýtá obrovské možnosti řešení krize bydlení, omezování dopadů stavebnictví na životní prostředí a zvyšování ekonomického potenciálu. V době zpracování této práce je roční přírůstek dřeva v České republice větší než množství dřeva, které se vytěží. Toto vytěžené dřevo putuje v surové podobě do zahraničí, kde zpracováním nabírá na hodnotě, kterou pak zpětně občané naší země musí platit za hotové výrobky a zároveň přicházejí o pracovní příležitosti se zpracováním dřeva spojené. Dopravou se také zvyšuje uhlíková stopa materiálu, jehož obrovskou výhodou je lokální dostupnost prakticky v celé Evropě, takže se vytváří ekologický paradox.

Dřevěné krovy mají významnou statickou a estetickou funkci. Šikmé střechy poskytují výbornou ochranu stavby proti dešti a sněhu oproti dnes stále více užívaným plochým střechám, u kterých se v praxi často vyskytují poruchy. Přitom nepřeborné množství řešení skládání prutových prvků do krovových konstrukcí umožňuje maximální využití podkrovního prostoru. Z tohoto hlediska má smysl zkoumat staré krovy i pro návrh střech novostaveb rodinných (i bytových) domů, kde jsou často užívané sbíjené vazníky, které možnost využití podkroví neposkytují. Otevřené konstrukce krovů s tesařskými spoji potom přinášejí do stavby obrovskou estetickou hodnotu, nemluvě o příznivých účincích dřeva na lidskou psychiku. Nesmíme zapomenout také na historickou a kulturní funkci starých krovů, a tedy na potřebu tyto krovy zachovávat a opravovat a umožnit tak i budoucím historikům zkoumat naši minulost, protože stavby, které tvoří fyzickou strukturu civilizace, jsou důležitou součástí pochopení naší společnosti.

Studium historických dřevěných krovů je skvělým zdrojem k pochopení působení dřevěných prutových konstrukcí, jejichž využití nemusí zdaleka končit u střech. Takové konstrukce jsou staticky velmi únosné, lehké a při dodržení principů udržitelného lesního hospodářství nepřekonatelně ekologické.

1.2 Historický vývoj dřevěných konstrukcí a tesařských spojů

Účelem následujícího textu je uvést problematiku statického výpočtu tesařského spoje v historickém krovu do kontextu vývoje dřevěných konstrukcí. Snahou je načrtnout v historii zpracování dřeva linku vedoucí od nejstarších dřevěných konstrukcí po složité krovy středověkých staveb. Text je zde uveden především pro zajímavost a představuje základní průřez historií zpracování dřeva, na který bude plynule navazovat hlavní podstata této práce.

Konstrukce

Dřevo (a jiné prutovité nebo stébelnaté rostlinné produkty) patří spolu s kamenem, hlinou a kůží k nejstarším stavebním materiálům. Představy o bydlení pravěkých lidí v jeskyních vyvracejí archeologické nálezy, které v současnosti datují nejstarší dochované známky dřevěných obydlí do

doby 8 – 10 000 let př. n. l. (mladší doba kamenná, neolit)^[1], což koresponduje s obdobím, kdy se z pěstního klínu a ruční škrabky vyvinula kamenná sekera^[2]. Časopis Dřevo&Stavby dokonce uvádí, že nejstarší prokazatelné archeologické stopy dřevěných obydlí vedou až do starší a střední doby kamenné.^[3]

Prvními stavbami s nosnou konstrukcí ze dřeva byly v historii lidstva přibýtky lovců a rybářů. S vynálezem zemědělství (asi 9 500 let př. n. l.) a přechodem na usedlý způsob života začaly vznikat trvalejší stavby obydlí s delší životností, uspořádané do vyšších organizačních celků. První domy měly nosnou konstrukci ze dřeva, kůly byly zapuštěny do podloží, podlahu tvořil dřevěný rošt podle povahy podloží ukládaný na terén nebo kotvený nad zemí do nosných kůlů stavby. Stěny byly vyplétány proutím a vymazány hlínou. Proutěné stěny časem vystřídaly masivní povaly, které byly prvopočátkem srubových konstrukcí používaných dodnes.

Jednou z nejznámějších typických konstrukcí neolitu je neolitický dlouhý dům, což bylo úzké obydlí ze dřeva postavené prvními evropskými farmáři v období 6 000 – 5 000 př. n. l. a mělo životnost cca 20 let. Neolitičtí rolníci sice nedovedli ani spojit tesařsky tři trámy v jednom bodě a činily jim potíže příčná vazba krovu a zavětrování, ale i tak dokázali z těchto domů postavit celé vesnice. Krov takového domu pravděpodobně tvořily krokve podpírané vaznicemi, které byly podpírány sloupy (označované jako kůly) a sloupy s rozsochami (viz obrázky).



Obr. č. 1 Rekonstrukce neolitického dlouhého domu. Zdroj: levý obr.: Wikipedia, user Wolfgang Sauber – vlastní dílo; pravý obr.: Matthias W. Pacher, Wolfgang F.A. Lobisser

Velmi přínosným obdobím pro rozvoj dřevostaveb bylo antické Řecko a Řím. V Číně a Japonsku se dochovaly rozsáhlé mnohapodlažní komplexy zejména sakrálních staveb ze dřeva starých téměř jeden a půl tisíce let.



Obr. č. 2 Budhistický chrám Hōryū-ji v Japonsku založený v roce 607 n.l. a naposledy rekonstruovaný po požáru v roce 670 n.l. Zdroj: Wikipedia, user 663highland - vlastní dílo

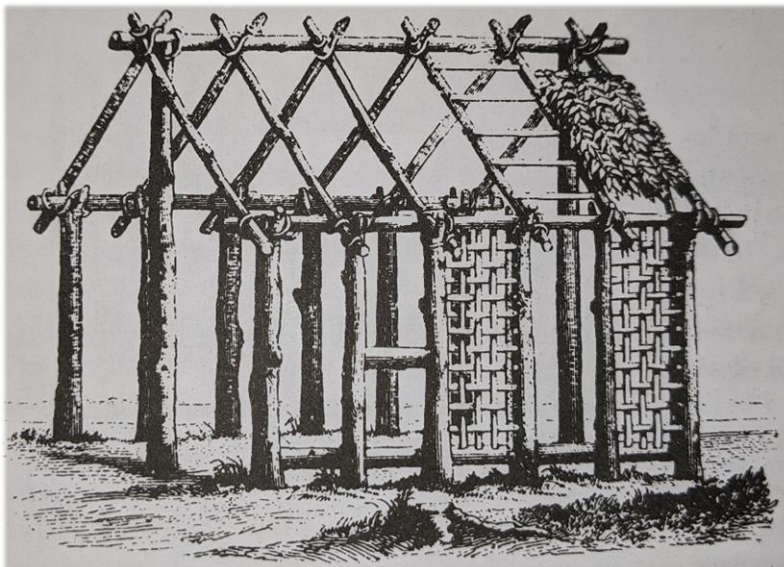
Počínaje 7. stoletím se v Evropě rozvíjela znalost těžkých skeletových a hrázděných staveb. Do pokladnice vědění v oblasti dřevostaveb přispěli svým umem rovněž američtí osadníci. V českých zemích bylo převládajícím řešením v období středověku pro obytné domy roubení, němečtí osadníci přicházející do české kotliny v průběhu 13. století obohatili tuzemské znalosti o technologii hrázděné stavby.^[3]

Krovy zaznamenaly zajímavý vývoj od původní krokevní soustavy a soustavy vaznic, položených na rozsochách tesaných sloupů, později původní hambalkové soustavy s výměnami a námětky v místě okapu přes kombinované soustavy gotických krovů, vaznicovou soustavu až po současné úsporné krovy příhradové nebo hambalkové.^[1]

Do současnosti došlo k vývoji nepřeborného množství dalších konstrukčních technologií. Tradiční roubené a srubové konstrukce jsou oblíbené dodnes, dochází ale ke zvyšování požadavků na tepelné vlastnosti obálky budovy a tedy i k vývoji zateplených roubených konstrukcí, protože tradiční konstrukce požadavky nesplňují. V USA jsou velmi oblíbené sloupkové soustavy. Jako další systémy lze zmínit skeletové soustavy, panelový konstrukční systém, hrázděné konstrukce a stěnové soustavy. Velký rozmach zažívají stavby s nosnou konstrukcí z CLT panelů, které jsou vhodné k výstavbě vysokopodlažních budov.

Spoje

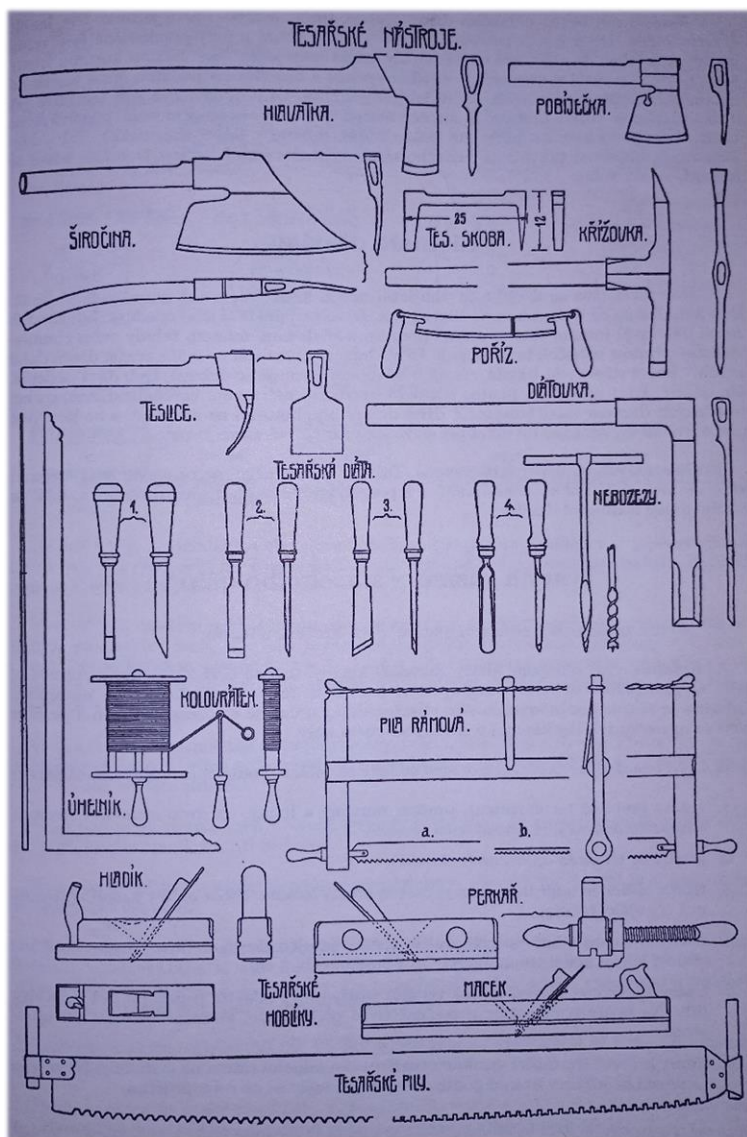
Vývoj dřevěných konstrukcí a staveb na bázi dřeva úzce souvisel s klimatickými podmínkami a s vývojem dřevěných spojů, který zase bezprostředně závisel na úrovni dostupných tesařských nástrojů a pomůcek v době jejich vzniku. V nejranějších obdobích sloužily jako nástroje kamenný nůž a sekera. Pro spojení dřev se využívalo především přirozených tvarů, jako jsou rozsochy, vidlice větví a výstupky suků, a spojovaná dřeva byla svazována nebo zajišťována provazy z rostlinných vláken a koženými řemeny.^[2] Za nejstarší spoj se kromě roubení považuje kůlová vidlice, která je od roku 3 500 př. n. l. doložena na četných sídlišťích střední Evropy.^[2] Pro docílení pevného dosednutí, řemeslníci vidlice opracovávali pomocí kamenných seker a siročinek, které pak ještě více používali při výrobě dalších raných spojů, například k opracování čepů nebo k výrobě zahrdení, které vývojově následovalo.



Obr. č. 3 Svazování patřilo k nejstarším spojům dřev. Zdroj: [2]

V době bronzové byla zcela rozvinuta spojovací technika pomocí čepů včetně různých obměn. Také další druhy spojů, například plátování, byly vyvinuty již záhy.^[2] Na počátku doby bronzové (3 000 let př. n. l. na Předním východě, 2 300 – 800 let př. n. l. ve střední Evropě) učinil velký skok dopředu vývoj nástrojů. V této době vznikly první nedokonalé pily bez šranku s bronzovými listy napnutými v dřevěném oblouku, jejich nálezy lze doložit od roku 1 500 př. n. l. v Egyptě. Rozvod pilových zubů (šrank; plát s pilovými zuby netvoří jednu rovinu, ale zuby jsou z této roviny střídavě mírně vyhnuté – slouží k „vytahování“ pilin z řezu ven a pila se tak v řezu nezasekává) železných pil byl vynalezen teprve v římském období (500 let př. n. l.).^[2]

Ve 13. století se s technickým vývojem rámových pil poháněných vodou nebo větrem mimořádně zvýšila přesnost rozměrů a množství zpracovaného řeziva, na opracování spojů měly tyto pily však jen nepatrný význam. Až v 15. století pokročil vývoj nástrojů díky přechodu od železa k oceli tak, že se dosavadní známé archaické spoje dřev, jako byly čepy, pláty, kampy, zahrdlení, zuby a zapuštění rychle rozvinuly ve složitý systém důmyslných spojů s velmi bohatými variacemi. Spoje se opracovávaly speciálními tesařskými sekerami (například sekera křížovka, ale typů bylo mnoho pro specifické úlohy) a dláty, k řezání dřeva sloužily široké a tvrdé pilové listy. S tímto vývojem souvisel přechod od plátových spojů k čepovým.^[2]



Obr. č. 4 Tesařské nástroje. Zdroj: [23, str. 13]

Koncem 18. století (období průmyslové revoluce) vznikaly první pily, které zpracovávaly kulatinu na deskové řezivo, jako jsou prkna či fošny. Pro spojování prken a fošen do dřevěných konstrukcí se začínaly používat hřebíky, svorníky a různé typy hmoždíků.^[4] Od té doby začaly čím dál větší podíl ve spojování dřevěných konstrukcí zaujímat kovové spojovací prostředky (svorníky, vruty, styčnickové desky, gangnail technologie, úhelníky, kotevní prvky, apod.), které dnes ve stavebních konstrukcích výrazně převažují nad tradičními tesařskými spoji.

Tesařské spoje jsou dnes ve stavebnictví používané v dřevostavbách srubových a sloupkových kostrových, některé spoje jsou v omezené míře používány v konstrukcích střech (moderní krovy).^[4]

Výhodou spojení kovovými prostředky je menší pracnost a snadná aplikovatelnost, normativní opora ve výpočtech a zachování tloušťky průřezu, který bývá v tesařských spojkách výrazně oslaben. Na rozdíl od tesařských spojů jsou ale kovové prostředky náchylnější na kolaps při požáru, mohou tvořit tepelný most, podléhají korozi a jiným objemovým změnám než dřevo, zároveň často nespĺňují estetické požadavky jako tradiční spoje.

Současnou situaci sporadického využívání tesařských spojů ve stavebnictví může změnit rozvoj počítačově řízených obráběcích strojů (CNC stroje). Automatizované obrábění snižuje náklady na výrobu tesařských konstrukcí, ale zároveň upozaduje tradiční řemeslnou zručnost, protože část úlohy tesařů přebírají projektanti a programátoři CNC linek. Důležité je proto optimální spojení tradičních znalostí s vývojem moderních technologií.

V minulosti vycházel návrh tradičních dřevěných detailů ze zkušenosti a jednoduchých empirických vzorců, které dnes nepostačují a je nutné prokázat únosnost všech spojů statickým výpočtem. Normy jsou stále v tomto ohledu zaostalé, ale pozornost Evropské unie této problematice slibuje do budoucna v normativním systému lepší návrhovou oporu.^[5]

1.3 Hrad Krásna Hôrka

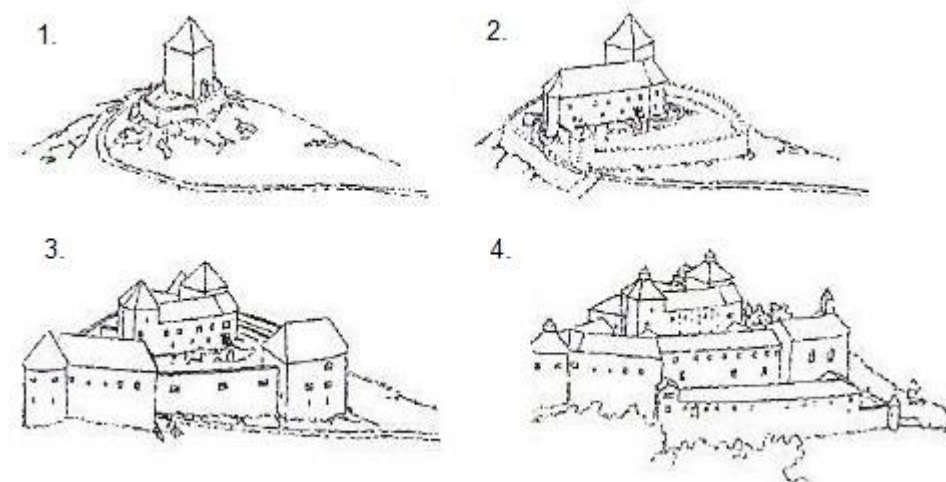
Krov, ve kterém bude zkoumán vliv modelu spoje na rozložení vnitřních sil v modelu konstrukce, zastřešuje část hradu Krásna Hôrka. V úvodu by tedy bylo vhodné zmínit základní informace o této památce.



Obr. č. 5 Umístění hradu v rámci Slovenska. Zdroj: Wikipedia, user Ikonact - vlastní dílo

Hrad pochází ze 14. století a vznikl na ochranu středověké cesty, která vedla přes důlní oblasti Slovenského rudohoří. Hrad se nachází na osamělém kopci nad obcí Krásnohorské Podhradie nedaleko Rožňavy a pravděpodobně stojí na místě staršího hradiště. Svou současnou podobu stavba nabírala postupem času, původně se jednalo pouze o opevněnou gotickou věž, ale v 1. pol. 16. stol. na místě započaly rozsáhlé stavební práce za účelem vybudování opevnění proti možným tureckým nájezdům.

V pozdějším období hrad Krásna Hôrka ztratil svůj strategický význam a další stavby, o které byl v 17. století obohacený, se nesly v duchu pozdně renesančních sídel. K poslední historické úpravě došlo v 2. pol. 17. stol., kdy byla jedna z bašt přestavěna na katolickou kapli, která architektonicky stojí na pomezí baroka a klasicismu. Na začátku 19. století již stará pevnost přestala svým majitelům poskytovat dostatečné pohodlí, proto byl hrad opuštěn a o pár let později vyhořel. Na hradě byly provedeny nejnútnejší opravy (odtud zřejmě pochází poslední verze střechy hradu s šindelovou krytinou), ale až do počátku 20. století, kdy přišel impuls k jeho obnově, byl v podstatě v ruinách. Během této renovace vznikla nová rodinná hrobka v přízemních prostorech středního hradu. Ještě před obnovou vzniklo z popudu posledních majitelů na hradě v 19. století rodové muzeum. Od roku 1945 je hrad majetkem státu a k posledním památkovým obnovám došlo v 60. letech 20. stol. Poté už nedošlo k dalším změnám až do roku 2012, kdy na hradě vznikl požár z nedbalosti. Od zapálené trávy se vznítil křovinatý porost na hradních svazích, odkud se požár rozšířil na střechy, které byly kompletně zničené. Shořely šindelové střechy, expozice v horním gotickém paláci a zvonice a v kongregační síni se probořil strop. Doposud na hradě Krásna Hôrka probíhají rekonstrukční práce obstruované různými překážkami a památka není přístupná veřejnosti.



Obr. č. 6 Vývoj hradu napříč stoletími. Zdroj: <http://www.hradkrasnahorka.sk/>

Historie hradu je bohatá nejen z hlediska jeho stavebních úprav a rozšiřování, ale také ve vztahu k příběhům jeho obyvatel. Nacházel se ve vlastnictví několika šlechticů a pod správou mnoha kapitánů. Sloužil jako obranná tvrz proti tureckým výpadům i jako útočiště šlechtice, který zradil císaře a k tureckým nájezdníkům se přidal. Hrad a dění na něm i okolo něj se staly inspirací pro velkolepý románový příběh o bílé paní. Ta na Krásné Hôrce skutečně je, v kapli je totiž uloženo tělo ženy, které bylo díky náhodnému vystavení vápencové vodě a průvanu v hrobce dokonale mumifikováno. Vzniklo zde první muzeum na území Slovenska a před požárem hrad své muzejní poslání plnil dál. Stálá expozice prezentuje fortifikační stavitelství od 13. do 18. století, základní informace o hradu a jeho majitelích, výkazy o životě v dané lokalitě během existence hradu i dávno předtím, a významnou součástí expozice je původní zařízení ze 17. století v obytných prostorách

stavby nebo zařízení kuchyně. V prostorách hradu se nachází také vzácná sbírka místních středověkých (i ukořistěných orientálních) zbraní a hudební salón s unikátní sbírkou hudebních nástrojů.^[15, 16]



Obr. č. 7 Poslední podoba hradu s šindelovou střechou před vyhořením v r. 2012

2 Cíle práce

Původním cílem práce bylo porovnání výpočtového modelu tesařského spoje v krovu s reálným působením tohoto spoje. V konstrukci krovu měl být analyzován vliv rybiny jako klouby, pružného vetknutí a vetknutí pro rozložení vnitřních sil rámu v rovině. Vybraný spoj měl být experimentálně ověřen pro účinek tahové a tlakové síly a také na účinek ohybového momentu.

Tato problematika byla již podrobně zpracována ve studii „Vliv mechanických vlastností rybinového spoje na celkovou tuhost dřevěných střešních konstrukcí“ vědeckými pracovníky Jiřím Kuneckým, Annou Arciszewska-Kędzior, Václavem Seberou a Hanou Hasníkovou pod záštitou Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky^[26]. Ze závěru této studie vyplývá, že podrobná analýza parametrů jednostranného nekrytého příčného rybinového plátu nemusí být za účelem vyšetřování globálního chování dřevěných konstrukcí vypracována, protože tyto parametry mají velmi malý dopad na statické chování celé konstrukce. Dle studie je vhodné rybinově plátované spoje modelovat jako tuhé klouby, které přenášejí pouze tah a tlak a nepřenášejí žádný moment.

Cíle práce byly tedy pozměněny. Hlavním cílem práce je statická analýza části hambalkového krovu rekonstruované střechy hradu Krásná Hôrka. Budou vytvořeny vhodné modely konstrukce na základě již navrženého konstrukčního provedení krovu a výpočet stálých a klimatických zatížení konstrukce dle charakteru zastřešení a lokality stavby. Důležitou součástí praktické části práce bude určení vhodného modelu podpor krovu a úvaha o pružném modelování podpor. Modely staticky neurčitého krovu spolu s vhodně zvolenými kombinacemi zatížení budou vytvořeny v programu Scia Engineer, který poskytne hodnoty reakcí v podporách, průběhy a hodnoty vnitřních sil, obrázky deformované konstrukce a hodnoty vodorovných a svislých posunů jejích uzlů. Hodnoty vnitřních sil budou použity k ručnímu výpočtu posouzení únosnosti vybraných prvků a spojů konstrukce na mezní stav únosnosti dle Eurokódu. Dále budou porovnány průběhy vnitřních sil na všech prvcích krovu a posuny různých uzlů konstrukce pro model s rybinovými spoji modelovanými jako klouby a pro model s rybinovými spoji modelovanými jako vetknutí pro srovnání těchto extrémních případů, protože výše zmíněná studie uvádí pouze rozdíly v globální deformaci a při stanovování momentové únosnosti se zabývá pouze jednostranným rybinovým přeplátováním. Cílem je ověřit si závěry studie, že modelování rybinových spojů jako tuhých nebo kloubových má velmi malý vliv na globální chování konstrukce pro zhodnocení případů, kdy spoj není řešen jednoduše jako jednostranný nekrytý rybinový plát, ale jeho profilace je složitější, a zjistit, zda má smysl zkoumat potenciál takových spojů pro přenos momentových sil.

V průběhu vypracovávání teoretického úvodu o typologii dřevěných střešních konstrukcí autorka došla k závěru, že téma dřevěných krovů s tesařskými spoji je poměrně opomíjenou látkou na vysokých školách. Z důvodu nedostatku prací s podobným tématem si jako cíl zvolila vypracovat orientační souhrn historie a typologie střešních dřevěných konstrukcí a tesařských spojů prutových prvků na tyto konstrukce užívaných. V práci bude uvedeno rozdělení střech dle tvaru a sklonu, historický vývoj střešních konstrukcí, typologie krovů a popis jejich prvků s primárním zaměřením na jejich statickou úlohu v konstrukci. Teoretická část bude zakončena popisem tesařských spojů užívaných v historických krovech a výčet a popis druhů rybinových přeplátování, jelikož právě plátovaný spoj na rybinu je ústředním tématem této práce.

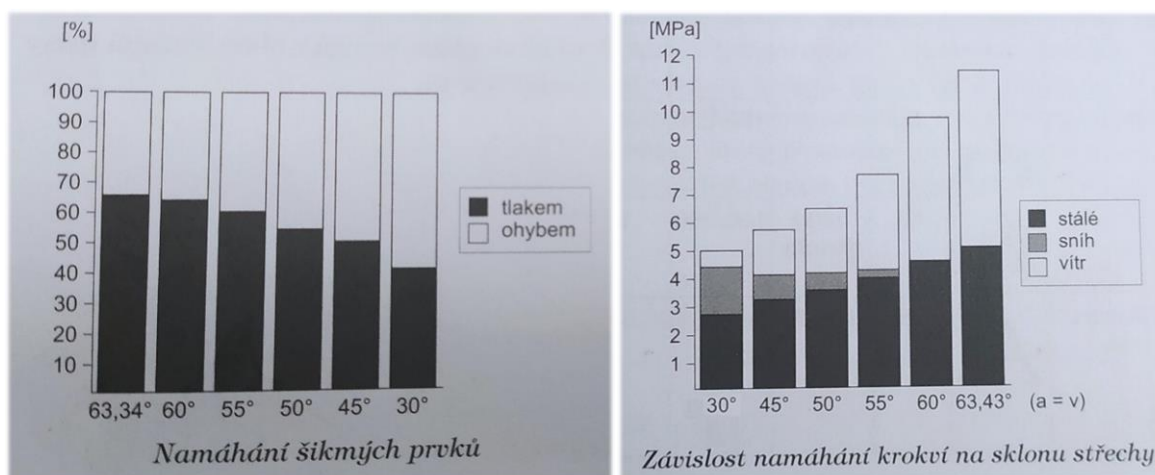
3 Přehled tradičních krovových konstrukcí

3.1 Historické krovy

Krov je nosná konstrukce střechy a určuje její tvar. Účelem krovu je přenášení zatížení od vlastní tíhy, skladby střešního pláště (záklop, laťování, izolační vrstvy, střešní krytina), sněhu, větru a případných dalších užitečných zatížení, do svislých nosných konstrukcí stavby.^[4] Krov nemusí být pouze dřevěný, ale i ocelový, případně z jiných materiálů, takové konstrukce ale nejsou v této práci rozebírány. Pod pojmem historické krovy jsou myšleny dřevěné krovy od nejstarších dob přibližně do poloviny 19. století, kdy vznikla řada nových typů konstrukcí navrhovaných dle zásad moderní statiky.^[6]

V historických krovech se používalo výhradně tesařských spojů, které byly příležitostně pojištěny dřevěnými kolíky nebo železnými skobami (i koženými řemeny). Speciální spojení vyžadovalo pouze připojení věšadel na vazný trám ve věšadlovém krovu, ale i to bylo v archaických krovech řešeno oboustranným rybinovým přeplátováním.

Pro statické působení konstrukce krovu jsou charakteristické šikmé prvky namáhané ohybem a tlakem. Při sklonu 50° - 60° se větší část zatížení přenáší tlakem, kterému při řádově stejných pevnostech v tlaku i ohybu dřevo velmi dobře odolává. Při sklonu šikmého nosníku 30° převažuje zatížení ohybem, které klade větší nároky na dimenze prvku. Ve vývoji krovů lze sledovat tendenci vytvářet takové konstrukce, v nichž jsou dřevěné prvky pokud možno namáhány tlakem.^[6]



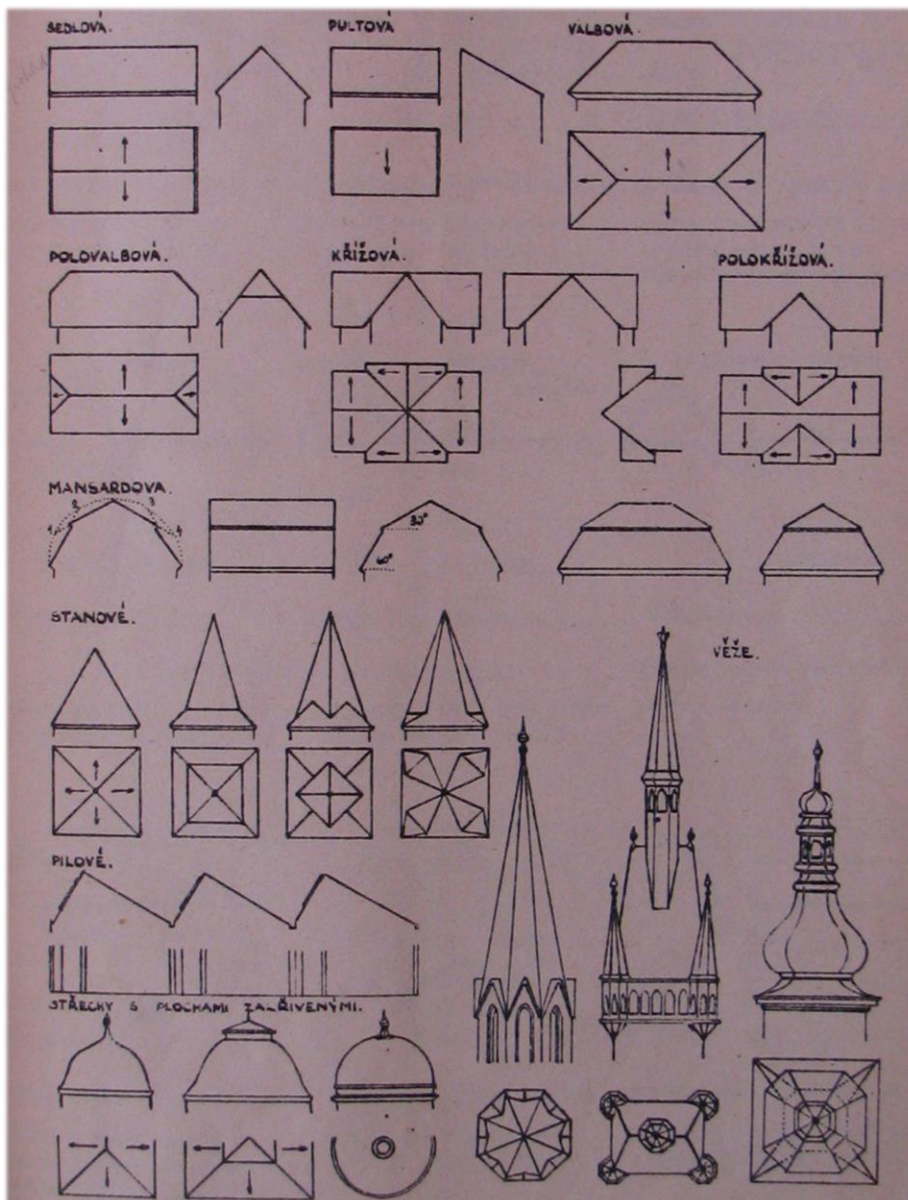
Obr. č. 8 Statické působení šikmých prvků. Zdroj: [6]

V krovu se vyskytují dvě vazby nebo-li profily:^[23]

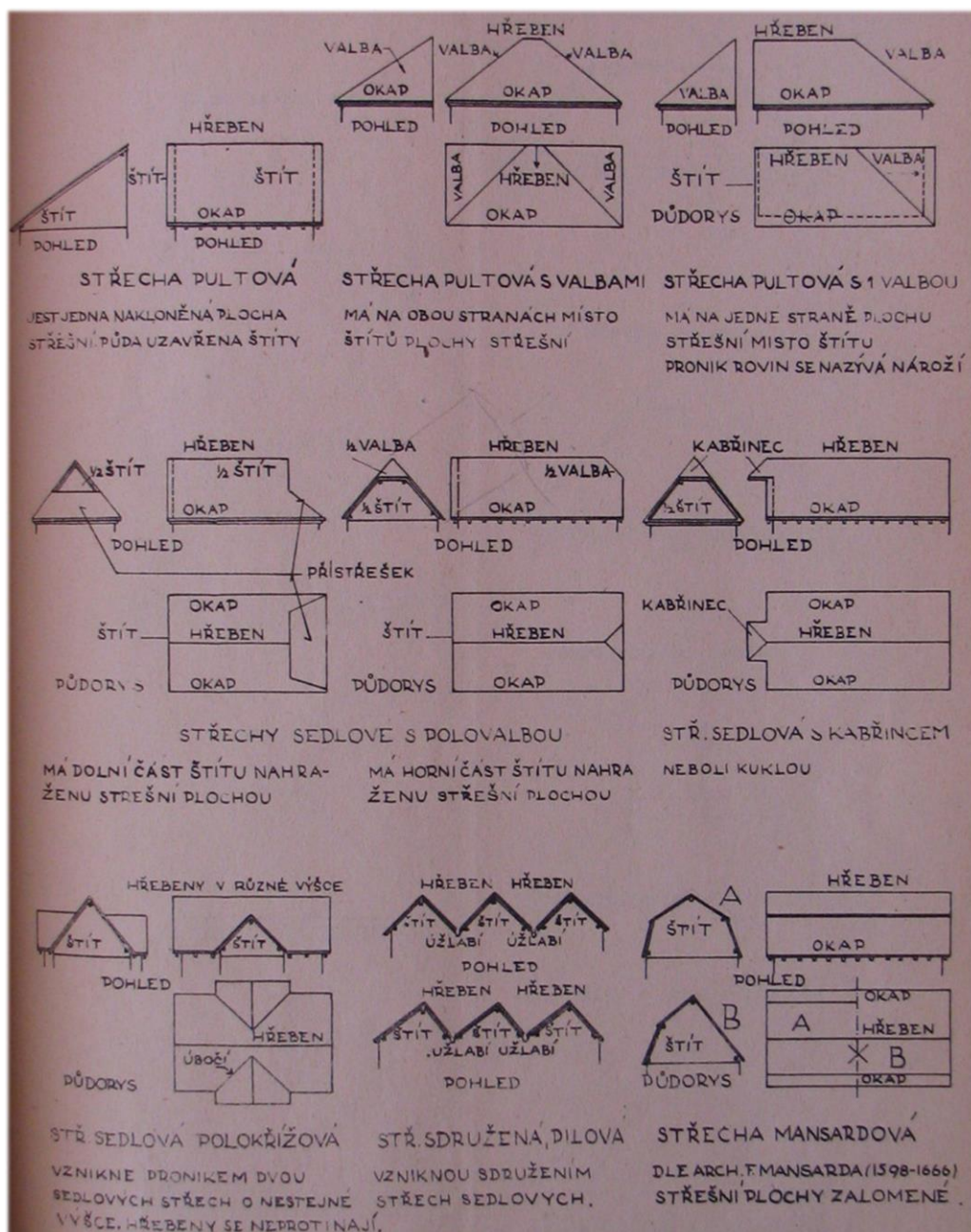
- Plná vazba je ta, ve které se vyskytují nejen části nesené (podporované), jako krokve a vaznice, ale i prvky nesoucí (podporující), jako sloupy, vzpěry, pásy, kleštiny a vazné trámy. Při návrhu plných vazeb pro všechny soustavy krovů platí pravidlo, aby mezi sebou konstrukční trámy tvořily pokud možno samé trojúhelníky, aby konstrukce byla tuhá. Trojúhelníková kostra je tuhá a nepoddajná, zatímco čtverec je možné přetvořit tlakem na kosočtverec. Stejně tak i obdélník nebo kosočtverec netvoří samy o sobě nepřetvárný celek a dají se ztuzit až vložením příček.
- Prázdná vazba (nazývá se také jalová) je ta, kde se nacházejí jen trámy podporované jako krokve, vaznice a někdy také kleštiny nebo hambalky.

3.1.1 Rozdělení střech dle tvaru

Sklon střešních ploch se řídí prostorovým řešením stavby dle účelu a uměleckého záměru a druhem krytiny. Krytiny s drsným povrchem vyžadují větší sklon než krytiny s povrchem hladkým, aby mohla dešťová voda rychle odtékat a střešní plochy byly co nejdříve suché. Tvar střechy je tedy závislý na půdorysu a druhu budovy, na architektonickém řešení stavby a na hladkosti krytiny.^[23] Typ a sklon střechy potom podmiňuje uspořádání její nosné konstrukce. Dle typu střešní plochy v podélném směru se sklonité střechy dělí na sedlovou, mansardovou a pultovou. Dle typu střešní plochy v příčném směru se tvary dělí na střechy se štítem, s polovalbou, valbou, nebo střechy stanové. Speciální typy střech mají věže a centrální stavby. Kromě šikmých střech jsou známé samozřejmě střechy ploché a střechy s malým spádem (méně než 30°).



Obr. č. 9 Rozdělení střech dle tvaru. Zdroj: Doc. Ing. arch. Jiří Jeřábek a kolektiv, *Dřevěné konstrukce* (1955)



Obr. č. 10 Rozdělení střech dle tvaru a sklonu. Zdroj: Doc. Ing. arch. Jiří Jeřábek a kolektiv, *Dřevěné konstrukce* (1955)

3.1.2 Vývoj krovů v Evropě

3.1.2.1 Antika

První zmínky o krovech jsou zaznamenány z období řecké a římské antické architektury (8. stol. př. n. l. – 1. stol. n.l.). Kromě obvyčejného kladení trámů podobného konstrukci stropu, byly jako konstrukce krovu využívány především dva systémy, jednak vzpěradlové, a pak věšadlové vazníkové soustavy. V těchto soustavách byl typický výskyt vlašských krokví, což byly trámy kladené rovnoběžně s okapem. Vzhledem k nízkému sklonu a relativně těžké krytině byly často všechny vazby plné. V římském stavitelství bylo běžné, a to i u drobných staveb, použití kovaných třmenů a táhel. Zřizovaly se i falešné klenby, jejichž technologie byla poté velmi oblíbená v době baroka na velkých klenutých chrámových prostorech. Byly tvořeny soustavou latí kotvených svislicemi do stropních trámů. Latě se poté vyplétaly rákosem a motouzy tak, aby na ně bylo možno nahodit hrubou maltu a vytvořit dojem zděného povrchu. Velmi časté byly pultové střechy. Specifické členitosti budov nebylo mnohdy

možno zastřešit tak jednoduše jako dnes, proto stavitelé museli řešit zastřešení každé části domu zvlášť soustavami pultových a sedlových střech. Pro italské chrámy byla specifická otevřená konstrukce střechy.^[9]



Obr. č. 11 Rekonstrukce Vitruviovy basiliky ve Fano v Itálii (1. stol. př. n. l.), vizualizace. Vazníkový krov s příhradami, které tvoří střední věšadlo a dvě diagonály. Zdroj: <https://www.artribune.com/arti-visive/archeologia-arte-antica/2019/08/vitruvio-leonardo-da-vinci-fano/attachment/ricostruzione-virtuale-della-basilica-romana-di-fano-il-cui-progetto-fu-realizzato-da-vitruvio/>

3.1.2.2 Románský sloh

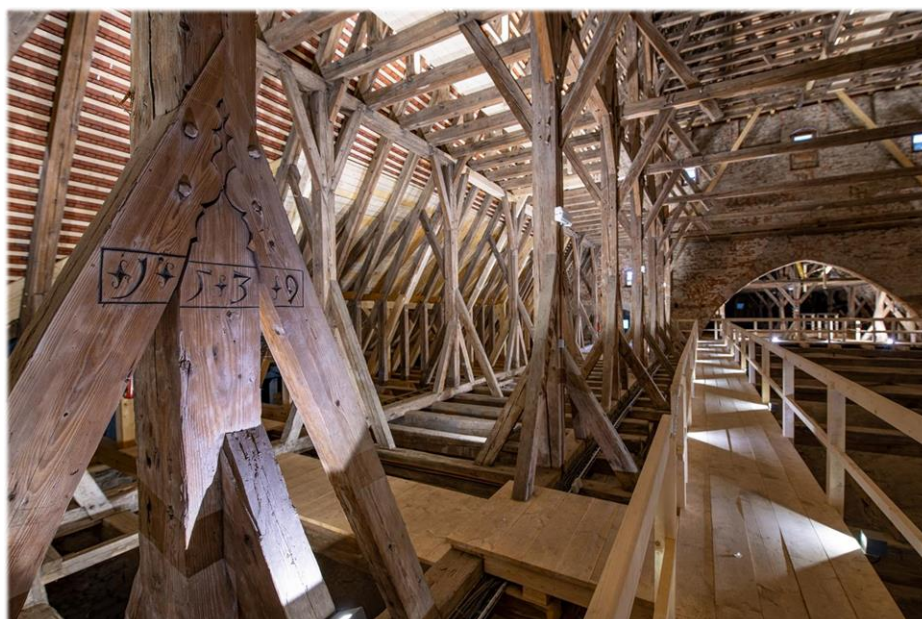
Románský typ zastřešení čerpal z italské vlašské soustavy. Krovy románské byly tedy pravděpodobně podobné vlašským vaznicovým a věšadlovým typům. Pro italské prostředí byl typický nízký sklon a použití kovaných třmenů ke ztužení některých spojů. K nám byla tato architektura importována právě ze středomořských oblastí, ale nezvládla okamžitě reflektovat zdejší klimatické podmínky, proto bylo nutné v pozdějších dobách upravit sklon střechy tak, aby krov lépe odolával sněhu a větru. O krovech z dob románského slohu na našem území není k dispozici mnoho dokladů, snad jen to, že měly relativně nízký sklon oproti následujícímu slohu gotickému. Tento fakt lze vyčíst z dochovaných stavebních změn historických štítů. Tyto štíty byly následně upravovány zvyšováním sklonu, a právě stopy po původním sklonu se v mnoha štítech dochovaly.^[9]



Obr. č. 12 Basilika San Miniato al Monte ve Florencii (1. pol. 11. stol.). Vazníkový krov příhradový. Zdroj: Wikipedia, user Kucharek – vlastní dílo (2006)

3.1.2.3 Gotika

Nejstarší dochované krovy v Čechách pochází zhruba od 1. poloviny 14. století. Tyto nejstarší krovy byly postaveny na principu hambalkové soustavy, případně i za použití výztuhy ondřejským křížem, který se velmi intenzivně používal až do nástupu barokního slohu. Dalším typem konstrukce gotického slohu je krov tzv. klasového typu. Klasové krovy byly v oblibě především v pozdní gotice (15. a 16. stol.). V 15. a 16. století gotický sloh preferoval vysoké stavby s hodně strmými střechami, proto se hojně začalo užívat vzpěr. Nejnáročnější střešní konstrukce se většinou nacházely na katedrálních a kostelních stavbách, kde bylo nutné se vypořádat s vysokým hřebenem a velkým rozponem. Byly stavěny tedy především krovy se sedlovou střechou s různými variantami konstrukce. V pozdní gotice byly velmi oblíbené a běžné stanové střechy, na jejichž principu byly stavěné i krovy věžové.^[9]



Obr. č. 13 Kostel sv. Jakuba Většího v Jihlavě (1. pol. 13. stol.). Krokevní krov se čtyřmi hambalky, krátkými svislými vzpěrami krokví ve třech úrovních a dlouhými podkrokevními vzpěrami, podélně vázaný visutou hřebenovou rámovou stolicí, vysokou dvojitou rámovou stojatou stolicí v první a druhé úrovni, a dvojitými rámovými stojatými stolicemi v první a třetí úrovni^[22].
Zdroj: <https://www.jihlava.cz/tram-s-letopoctem-stavby-historickeho-krovu/q-42019>

3.1.2.4 Renesance

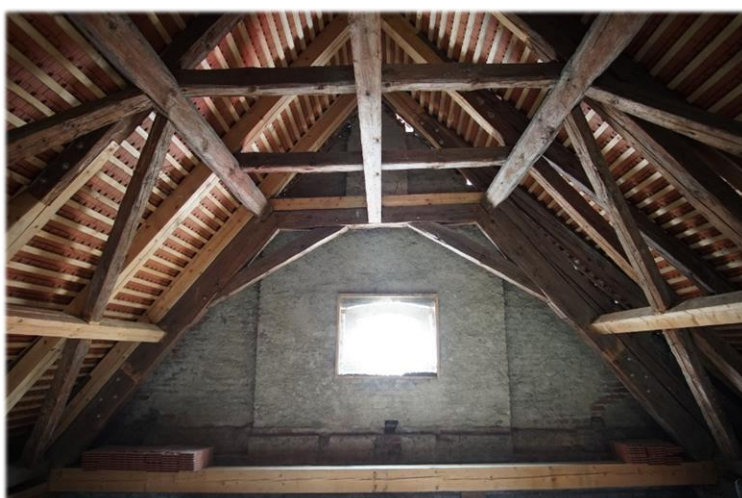
Časově se jednalo o období mezi lety 1550 – 1601, tedy relativně krátké období oproti předchozímu slohu gotickému. V této době se hojně stavěly paláce a obytné budovy a vznikala snaha o využití podkrovních prostor, ať už jako skladu nebo příbytku pro služebnictvo. Z toho důvodu byly ve městech a na nových stavbách čím dál častěji využívány krovy typu ležaté a stojaté stolice, na venkově přetrvávala tradice hambalkových krovů a ondřejských křížů. S užíváním podkrovních prostor souvisí také zhotovování vikýřů ve střešní rovině a využití stolic pro konstrukci stěn a hambalků pro konstrukci podhledu. V renesanci se dále začalo uplatňovat používání jalových vazeb, ve kterých vazný trám nahradila krátkata, což mělo pozitivní následek v podobě úspory materiálu. V renesanci a nadcházejícím baroku se již začalo užívat ve velké míře železných spojovacích prvků a začalo být mnohem oblíbenější užití spojení na dlab a čep. Dalším v renesanci oblíbeným prvkem na stavbách byly korunní římsy při ukončení střech a atikové římsy. Jednou z nejsložitějších konstrukcí, které se v této době objevily, byl krov skružový a další báňovité konstrukce střech. Na čistě renesančních stavbách, například u paláců a zámků s arkádovým nádvořím, se hojně užívalo kovaných táhel. Oproti nízkým italským krovům se krovy na našem území lišily hlavně složitostí vyplývající z většího sklonu střechy, který zase vyplýval z méně příznivých klimatických podmínek.^[9]



Obr. č. 14 Krov západního křídla zámku v Náměšti nad Oslavou. Krokevní krov se dvěma hambalky podélně vázaný vysokou ležatou stolicí se zakřivenými sloupky a vysokou dvojitou stojatou stolicí upravenou pro podkrovní místnosti^[22]. Zdroj: Mirek Navrátil - administrátor facebookové skupiny „Staré krový“.

3.1.2.5 Baroko

Inovativní konstrukce byly většinou řešeny a objevovány na nových velkých stavbách. V baroku to nebylo jiné, avšak některé již pár desítek let či staletí prověřené konstrukce se začaly dostávat i do běžného užití na menších stavbách. Specifikou barokních krovů byla snaha zakrýt velké halové prostory, které svým klenutím zasahovaly vysoko do podkroví, proto zde nebylo možné položit příčné vazné trámy. Tyto vazné trámy byly stále častěji nahrazovány dlouhými železnými táhly, umístěnými nad či pod klenutím. Podpůrnou funkci zajišťovaly ležaté stolice. Ačkoliv byly půdorysy barokních chrámů velmi složitě tvarované, jejich zastřešení nemuselo hledat mnoho nových řešení. Užívalo se klasických sedlových tvarů na sebe navazujících a stále častěji se objevující kupole se mnohdy zastřešovaly prejazovou krytinou či měděným plechem. Díky oblibě využívání podkroví vznikla mansardová konstrukce střechy. Střecha tohoto typu je variantou mezi střechou sedlovou a střechou stanovou. Její konstrukce spočívá na dvou samostatných konstrukcích krovu. Tento typ střechy bylo možné uplatnit na veškerých půdorysech, proto se užíval na palácích, městských i vesnických domech nebo věžích. Hlavním spojem se v období baroka stal dlab a čep, který tak nahradil původní rybinový boční plát. Na složitých a velkých krovech byly užívané stále ve větší míře kované železné prvky.^[9]



Obr. č. 15 Vyspělá ležatá stolice barokního krovu kaple svaté Anny v areálu špitálu v Náměšti nad Oslavou. Zdroj: Mirek Navrátil - administrátor facebookové skupiny „Staré krový“.

3.1.2.6 Klasicismus a počátek moderní doby

Na počátku moderní doby došlo k postupnému zjednodušování, úspoře materiálu a prefabrikaci kovaných spojovacích dílů. Klasicismus s sebou přinesl užití především stojaté stolice a skružových krovů. Používalo se již výhradně čepovaných spojů a stále častěji byly i menší klenby a stropy kotveny k věnci nebo vaznému trámu železnými táhly. Postupně začalo přibývat spojů z mechanizovaných pil (tzv. katrů). Systém výměn a krátčat byl užíván i na hambalkových vazbách. Na venkově byl díky úspoře materiálu využíván Ránekův krov, novinka 19. století od tesařského mistra Michaela Ráneka.

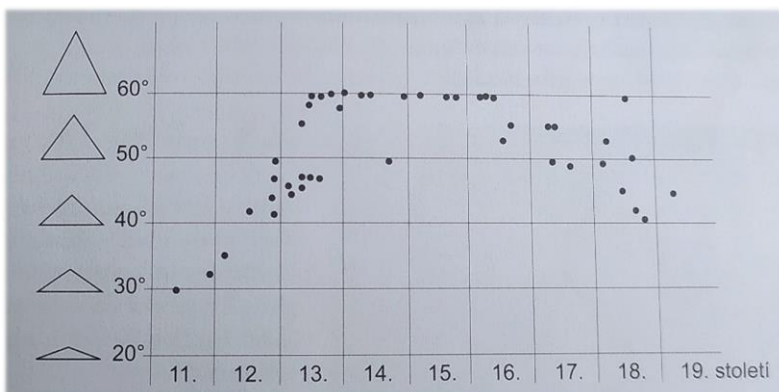


Obr. č. 16 Rozměrný Ránekův krov v již zbouraném objektu v Novém Jimramově. Zdroj: Mirek Navrátil – administrátor facebookové skupiny „Staré krovy“.

Další inovátorskou konstrukcí z 19. století bylo užití čistě vaznicových krovů. Z klasických vaznicových krovů se postupně vyvinul nový druh vazníku, tzv. příhradový vazník. Tento vazník byl tvořen užšími profily než klasický vazník. Byl sestaven z více segmentů, které jsou propojeny kovovými stahovacími prvky a vyztuženy například malými ondřejskými kříži. Takový vazník mohl překonat i velké rozpory krovů, protože ho šlo dobře nastavovat a propojovat. Od konce 19. století se v rámci užitných půdních prostor navyšovala pozednice nesoucí půdní nadezdívka, pod kterou se zazdily vazné trámy. Krokve byly zajištěné kleštinou a vazné trámy byly propojeny s věncem pomocí pásového železa. Vaznicové krovky nově dovolovaly předsadit konce podélných vaznic před štít domu. Díky tomu byl dům lépe chráněn před deštěm a celkově se změnilo vzezření domu. Podobně je tomu tak s krokve, které byly často kladeny s velkým přesahem za pozednici. Takto vzniklé profily byly často místem zdobení a různých profilací a měly i praktické využití zastřešení pochozí části podél budovy.^[9]

3.1.3 Typologie krovů

Krovové konstrukce prodělaly hodně velký a dlouhodobý historický vývoj, a to zejména po stránce konstrukční. Z tohoto důvodu a z důvodu existence nepřeberného množství unikátních řešení je systematické dělení krovových soustav problematické. Proto se v odborné literatuře také často liší. Krovové soustavy je možno rozdělit například podle tvaru střechy, podle typu konstrukce, případně také podle období provádění.^[8] Tato kapitola bude zaměřena na hlavní typy krovů, které spojují určité technologické znaky, zejména tedy tvar střechy a způsob uspořádání konstrukčních prvků. Text se bude zabývat pouze historickými krovky sedlových střech do cca 1. pol. 19. století. Nebudou zde uvedeny konstrukce historických střech pultových, věžové konstrukce, konstrukce novějších vaznicových krovů z konce 19. a počátku 20. století ani konstrukce pozdějších moderních krovů.



Obr. č. 17 Proměny sklonů střech. Zdroj: [6]

3.1.3.1 Ploché střechy a střechy s malým spádem

Prvky: trámy, záklop nebo jiná konstrukce, násyp nebo mazanina, podlaha terasy.

Ploché střechy beze spádu jsou běžné v suchých oblastech, kde tvoří zároveň střešní terasu. Dřevěné zastřešení ploché střechy se příliš neliší od konstrukce stropu a nosnou konstrukci tvoří pouze trámy uložené na spodní stavbu kryté rákosem a hliněnou mazaninou. Tyto trámy jsou dimenzovány na užité zatížení pochůzných střech.



Obr. č. 18 Rekonstrukce nazaretských domů tradičním způsobem. Mazání rákosového záklopu hlinou (vlevo) a pohled na strop/terasu z interiéru (vpravo). Stropní trámy z kuláčů nesou desku z hliněné mazaniny na pletenině z proutí. Zdroj: <https://www.nazarethvillage.com/about/research-and-archaeology/the-houses/roofs/>

Stejnou konstrukci jako strop mají někdy i ploché střechy s malým spádem (méně než 30°). Obvyklý je trámový strop (méně často povalový) s nosníky (krokve) většinou kladenými ve směru sklonu, ale i vodorovně. U větších rozpětí jsou příčné krokve podpírány průvlaky (vaznicemi), podélné krokve jsou podpírány šikmými nosníky. Tyto krovy jsou konstruované podobně jako stropy a krokve podepřené vaznicemi nebo konstrukcí spodní stavby tvoří vazbu (položena, zavěšená střecha). Krokve mají dimenze menší než střechy beze spádu, protože se nepočítá s užitným zatížením pochůzných střech. Se zvětšujícím se sklonem roste zatížení vlastní vahou střechy – do sklonu střechy $\alpha = 20^\circ$ nemá rozdíl v zatížení vodorovného a šikmého nosníku větší význam, při sklonu $\alpha = 25^\circ$ je zatížení šikmého nosníku o 10 % větší než zatížení nosníku vodorovného ($1/\cos \alpha = 1,1$), při sklonu střechy 40° je již $1/\cos \alpha = 1,3$. U šikmých nosníků vzniká při vodorovném zatížení nebo při povolení podpor vodorovná síla v uložení, která je většinou zachycena kotvením do zdiva, které musí být dostatečně dimenzované. Konstrukce střech s malým spádem je možné zařadit i mezi prosté krokové soustavy, případně krokové soustavy s vaznicemi. Rozhodujícím kritériem bude sklon střechy a její funkce.

Střechy se spádem menším než 10° mohou být považovány za ploché střechy, konstrukce s větším sklonem a krytinou uloženou na latích lze považovat za krovy krokevní soustavy.^[6]



Obr. č. 19 Opatství Santo Stefano di Parrano v Itálii (11. stol.). Podélné vodorovné trámy (vlašské krokve) uloženy na mohutných nosnících (v podstatě prostá krokevní vazba) sedlového tvaru nesou svislé latě s krytinou. Zdroj: <https://www.iluoghidelsilenzio.it/abbazia-di-santo-stefano-di-parrano-nocera-umbra/>

3.1.3.2 Vazníkové krovy (krovy s podélnými, vlašskými krokve)

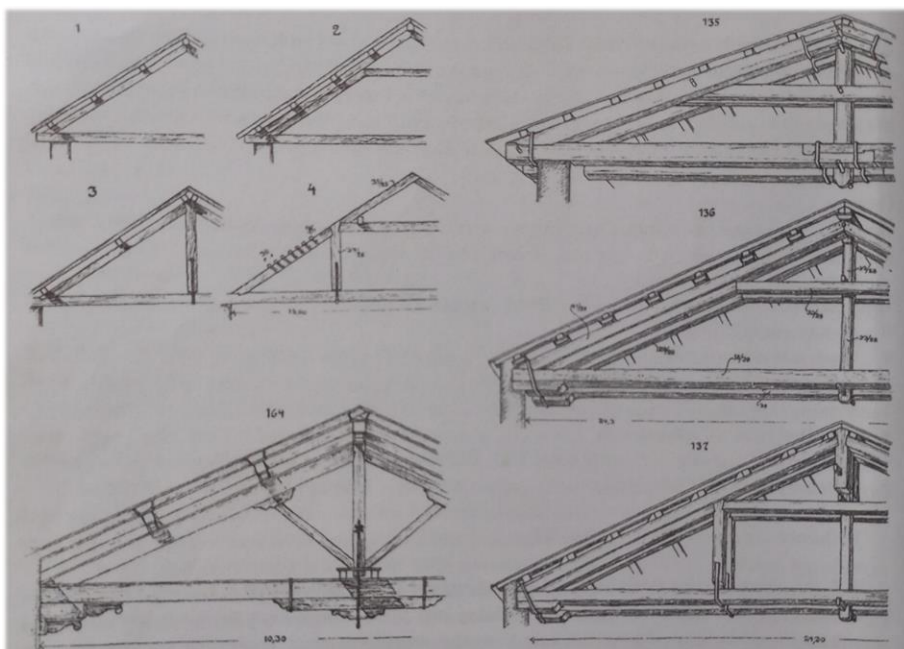
Prvky: horní pás = krokev (tlačný), spodní pás = vazný trám (tažený), svislice, diagonály, sloupky, táhla, vzpěry, rozpěry, věšadlo.

U vazníkových soustav je třeba rozlišovat krovy historické a krovy novodobé, které jsou tvořeny převážně tenkostěnnými sbíjenými příhradovými vazníky. Tato kapitola se zabývá historickými konstrukcemi masivních vazníkových krovů.

Pro vazníkové krovy je charakteristický vazník – příčná nosná konstrukce postavená tak, aby bylo minimalizováno namáhání jejích prvků ohybem a převažovalo namáhání tahem nebo tlakem. Vazník má proti masivnímu nosníku výrazně větší účinnou výšku a tím mnohem vyšší únosnost. Vazníky jsou vhodné i pro zastřešení větších rozponů. Střešní plášť nesou vlašské krokve rovnoběžné s okapem, na kterých jsou upevněné svislé latě.

U jednoduchých typů vazníků je rozhodující namáhání krokví, případně i vazného trámu ohybem. Namáhání krokví se zmenšovalo vzpěrami, případně vzpěradlem, namáhání vazného trámu se zmenšovalo pomocí věšadla. U vazníků se vzpěradlem působí v uložení vzpěry nebo krokve do vazného trámu velká vodorovná síla, kterou není běžný spoj schopný přenést, proto se zpravidla zesiluje železnými třmeny.

Složitější typy vazníkových krovů se blíží novodobým příhradovým vazníkům. Hlavní výhodou příhradové konstrukce je namáhání prutů výhradně tahem a tlakem, čímž je možné minimalizovat jejich dimenze. Pruty musí být uspořádány tak, aby tvořily trojúhelníkové příhrady, jejich osy se musí protínat v jednom bodě a zatížení musí být do konstrukce vnášeno ve styčnicích, ve kterých je nutné spolehlivě zajistit přenos sil. Spoje příhradových vazníků přenášejí větší síly než konstrukce krovů s větším sklonem, proto jim byla věnována velká pozornost, dokládají to detaily styčniců s podložkami z tvrdého dřeva v tlačných spojích, se závlačkami a táhly ve spojích tažených. Už ve starověku se u vazníkových krovů užívaly kovové třmeny a táhla. Unikátní konstrukcí byl bronzový vazník Pantheonu.^[6]



Obr. č. 20 Typy vazníkových krovů: prostý vazník (1), vzpěradlový vazník (2), vazník s věšadlem (3), vzpěradlový vazník s věšadlem (4, 136, 137), věšadlový vazník (135), příhradový vazník (164). Zdroj: [6]

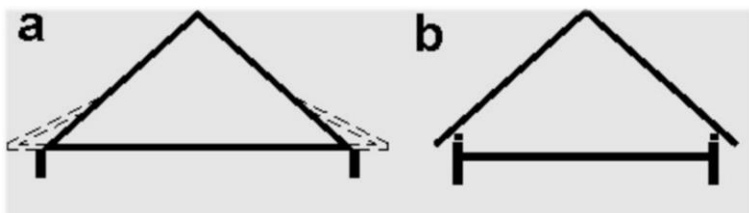
3.1.3.3 Krokevní soustava

Charakteristickým nosným prvkem krokevní soustavy je krokev (většinou pár kroví), šikmý nosník ukládaný ve směru spádu střechy, který je základem všech krovů kromě vazníkových. Pro dimenzování kroví je rozhodující sklon střechy a jejich rozpětí dané způsobem podepření. U větších sklonů (nad 45°) nad ohybem převažuje příznivější tlak.^[6] U sedlových střech se krokeve ve vrcholu navzájem podpírají, takže je krokev kromě vlastní tíhy namáhána ještě reakcí krovky protějščí. U většiny krovů je rozpětí kroví zmenšeno podepřením. Podepření ve vrcholu odlehčuje krokev od reakce krovky párové, krokev podepřená sloupkem, vzpěrou nebo rozepřená hambalkem působí jako spojitý nosník s menším rozpětím. V uložení kroví působí vodorovná síla, která vzrůstá se zmenšujícím se sklonem střechy a která se přenáší do spodní stavby, pokud není zachycena vazným trámem.^[6] Krokeve musí být v rovině střechy řádně prostorově ztuženy (zavětrovány), např. bedněním nebo laťováním nebo kříží.

Krokevní soustava prostá

Prvky: krokeve, vazný trám (ne vždy).

Nosnou konstrukci střešního pláště tvoří pouze dvojice kroví. V dolní části mohou být krokeve připevněny buďto k pozednici, která musí být řádně kotvena ke zdivu, nebo k vazným trámům. Krovky bez vazných trámů někdy výrazně zatěžují spodní stavbu.^[6]

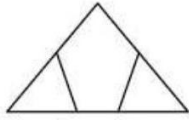


Obr. č. 21 Schémata prosté krokevní soustavy s krovkami kotvenými k vazným trámům (a) a s krovkami kotvenými k pozednicím (b). Zdroj: [8]

Kroková soustava se vzpěrami

Prvky: krokve, vazný trám, vzpěry krokví, patní sloupky.

Vzpěry krokví se vyskytují u všech typů krovů. Archaické krovky se vzpěrami a bez hambalků byly patrně odvozeny ze středomořských vazníkových krovů a mohly předcházet konstrukce hambalkové.^[6]



Obr. č. 22 Schéma krovního krovu se vzpěrami

Kroková soustava podélně podepřená

Prvky: krokve, vaznice, sloupek, pásky, vzpěry, vzpěradlo, podélná vazba.

Jedná se o krokové soustavy s jednou vrcholovou nebo více vaznicemi. Vrcholová vaznice bývá podepřena sloupkem s pásky či vzpěrami, vzpěradlem, u primitivních staveb sloupkem s vidlicí. Kroková soustava podélně podepřená se vyskytuje v archaických konstrukcích a jednoduchých konstrukcích jako jsou stodoly.

U krokových soustav s více vaznicemi nebyly krokve s vaznicemi svázány a konstrukce má charakter položené střechy.^[6]

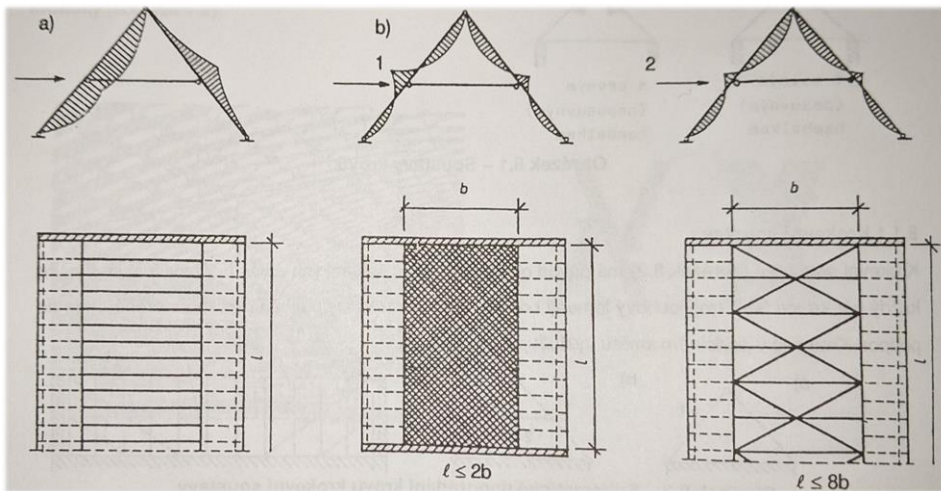


Obr. č. 23 Schéma krovního krovu s vrcholovou vaznicí (vlevo) a s více vaznicemi

3.1.3.4 Hambalková soustava

Spojení krokví hambalky se začalo užívat ve středověku. Hambalek je vodorovný trám spojující krokve, čímž zajišťuje příčné ztužení vazby, zmenšuje rozpětí krokví a u soustav s podepřenými hambalky přenáší zatížení z krokví do vaznic. Podle počtu hambalků se rozlišuje počet pater krovu. Vzájemné spojení vazných trámů, krokví, hambalků, ondřejských křížů, pásek a patních sloupků vytváří příčnou vazbu složenou převážně z malých trojúhelníků, což jí dodává tvarovou určitost a relativně velkou tuhost, její prvky mají malá rozpětí a malé vzpěrné délky, a vazba působí jako rovinná konstrukce. Ve středověkých krovech se hambalek vyskytoval zpravidla u krovů, kde se tvar střechy blížil rovnostrannému trojúhelníku – sklon krokví byl tedy velký (50° - 60°), takže byly namáhány převážně tlakem. Charakteristickým spojem hambalku a krokví je plát na rybinu (viz kap. 5), krokve bývají (ne vždy) začepovány do vazného trámu a vzájemně spojeny plátováním, na ostřích, nebo krytým čepem. U středověkých krovů byly všechny spoje konstruovány tak, aby nebylo třeba použít železo. Proti vysunutí z roviny se v rybinovém spoji hambalku a krokve uplatňoval kolík z tvrdého dřeva, který ale nebyl smykově namáhán – přenos tahu a tlaku zajišťoval čistě tvar rybiny.^[6]

Hambalky je možné konstruovat posuvné nebo pevné. Pevný hambalek vznikne vytvořením tuhého plnostěnného nebo příhradového nosníku v rovině hambalku, který je podpírán například štítovými stěnami. Tato úprava se pozitivně promítne do průběhu ohybových momentů na krokvích.^[25]

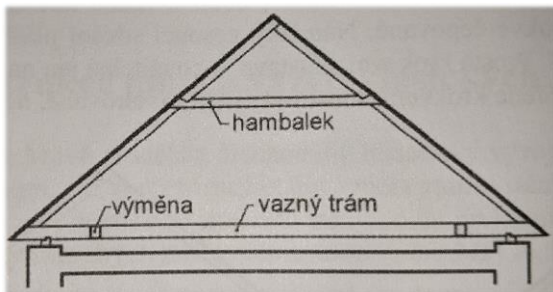


Obr. č. 24 Průběh ohybových momentů na krokvích v případě a) posuvného, b) neposuvného hambalku; 1 - tuhá deska, 2 - zavětrování. Zdroj: [25]

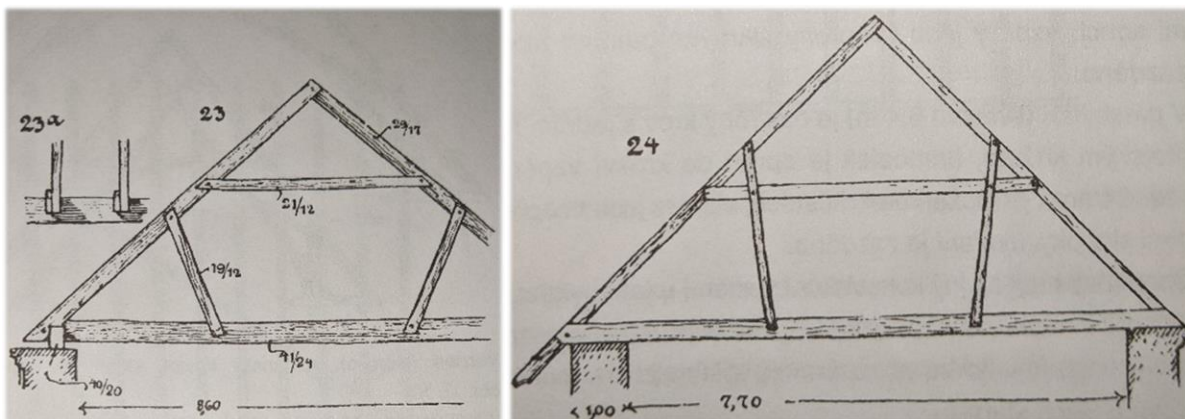
Hambalková soustava prostá

Prvky: krokve, hambalky, vazný trám, krátčata, ondřejské kříže, vzpěry krokví, sloupky, patní sloupky, osový sloupek, táhlo věšadla, pásky, pozednice, námětky.

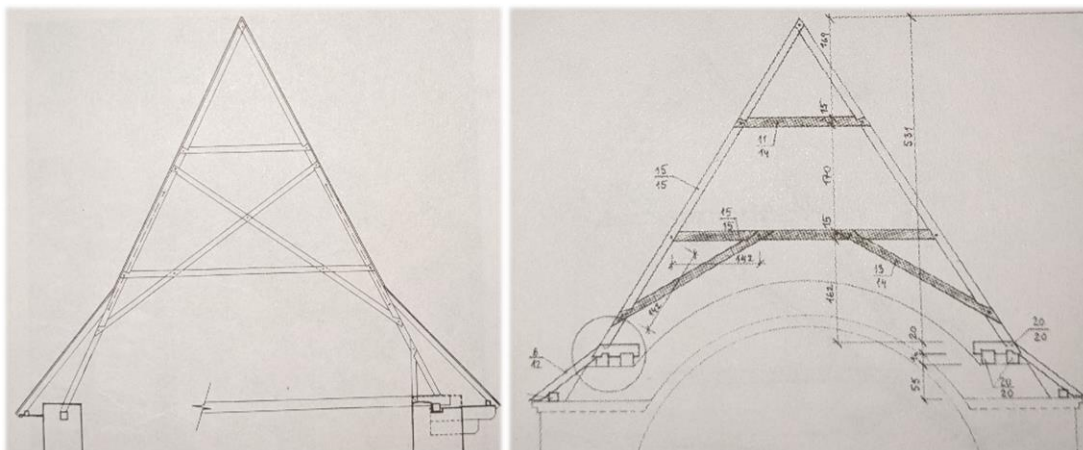
Prosté hambalkové krovy jsou charakteristické pro období středověku, u jednoduchých staveb se však vyskytují v průběhu celé historie. V kategorii prosté hambalkové soustavy se nachází velká škála konstrukčních řešení s různými přídatnými prvky vyčtenými na začátku této podkapitoly. Jednoduché krovy na menší rozpětí často nemají vazné trámy. U krovů bez vazných trámů byla jejich stabilita v uložení zajišťována krátčaty a patními sloupky, starší krovy byly kotveny zadržím v uložení.^[6]



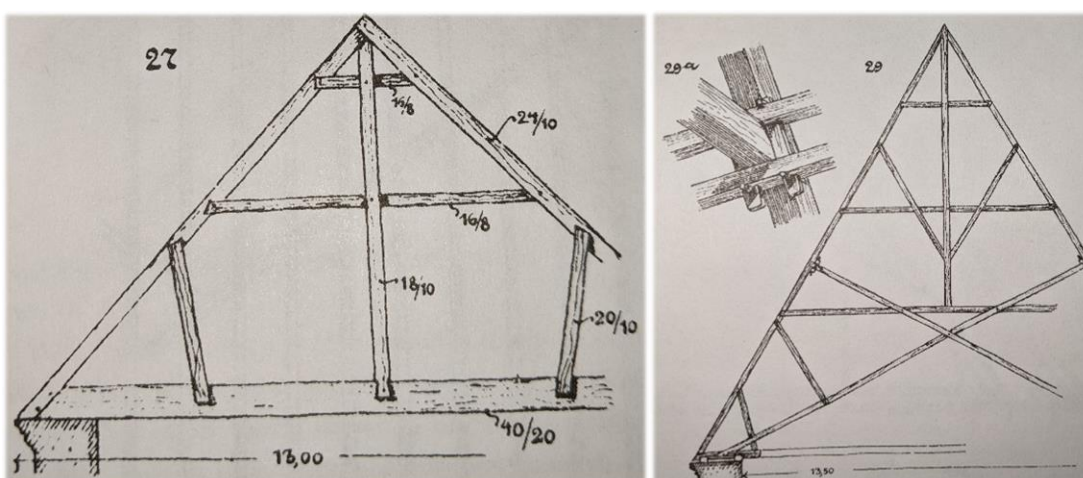
Obr. č. 25 Prostý hambalkový krov s vaznými trámy, krátčaty a výměnami. Zdroj: [4]



Obr. č. 26 Hambalkové krovy se vzpěrami. Zdroj: [6]



Obr. č. 27 Hambalkový krov s ondřejským křížem (vlevo) a krov s pásky. Zdroj: [6]



Obr. č. 28 Hambalkový krov s věšadlem a vzpěrami krokví (vlevo) a kombinovaný krov se třemi hambalky, ondřejským křížem, vzpěrami krokví a věšadlem (vpravo). Zdroj: [6]

Hambalková soustava podepřená

Prvky: krokve, hambalky, vazný trám, ondřejské kříže, vzpěry krokví (diagonály), vzpěry hambalků, patní sloupky, sloupky, sloupky věšadla (věšáky), pásky, vzpěry sloupků, vaznice, podélné trámy (průvlaky), pozednice, námětky, podélné ztužení (diagonály, ondřejské kříže).

Pozdější gotické krovy byly podepřeny vaznicemi na sloupcích, svázanými podélným ztužením do tuhé konstrukce – podélné stolice, která přenáší zatížení střešním pláštěm do vazných trámů a do zdiva. Podélná stolice podpírá zpravidla hambalky, někdy i ve vrcholu krokve. Také vaznicové krovy mají hambalky podepřené vaznicemi, běžně u ležatých stolic, výjimečně u stolic stojatých, kde vaznice podpírají spíše krokve a hambalek má pouze ztužující funkci.

U krovů s podélnými stolicemi se rozlišuje funkce jalových a plných vazeb. Střešní plášť nesou krokve jalové vazby a zatížení je z nich přenášeno prostřednictvím podélné konstrukce do plné vazby, která zatížení od několika jalových vazeb přenáší na zdivo. Stejný princip se uplatňuje u vaznicových krovů se stojatou stolicí, proto by lze krovy s podepřenými hambalky považovat i za krovy vaznicové. Jan Vinař je do hambalkových krovů zařazuje vzhledem ke genetickým souvislostem.^[6] Zároveň jsou hambalky u pozdějších krovů se stojatou stolicí podpírány vaznicemi spíše výjimečně, i proto Jan Vinař stolice v podélném směru podpírající hambalky označuje odlišným pojmem „podélná stolice“.

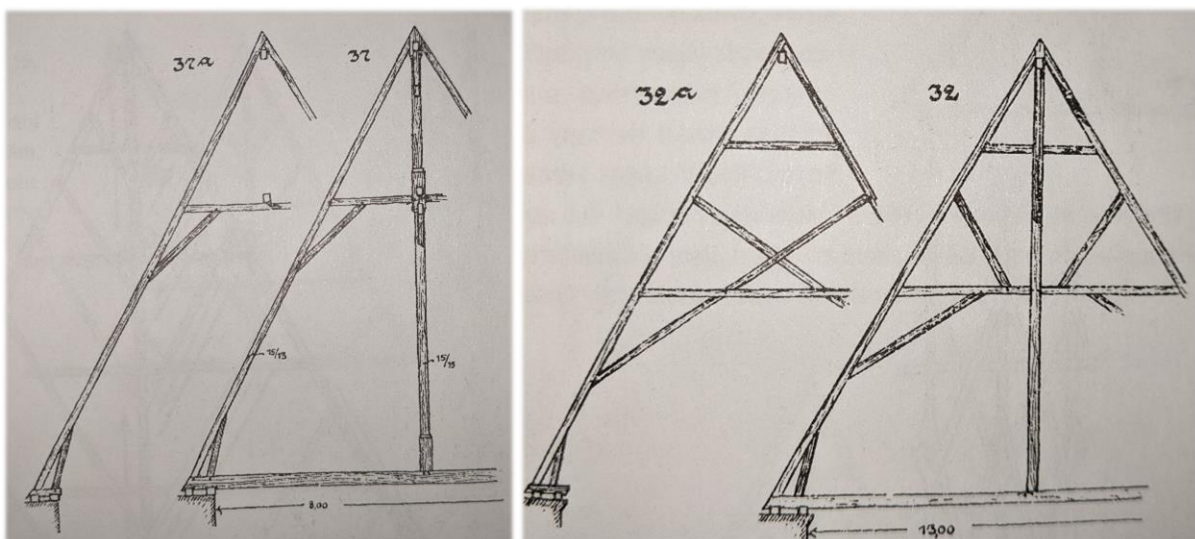
Plná vazba bývá posílena vzpěrami, které přenášejí zatížení od podélných stolic blíže k uložení vazných trámů. Vzpěry působí buď jednotlivě nebo tvoří konstrukci vzpěradla.

Rozpětí vazných trámů zmenšují věšadla (často kombinována se vzpěradly). Někdy se pak u věšadlových krovů rozlišuje kromě jalové a plné také věšadlová vazba. U krovů menších rozpětí podepřených pouze v podélné ose má střední sloupek funkci věšáku, jehož zatížení přebírají krokve plné vazby, často ve vrcholu do sloupku zapuštěné. Přenos zatížení z věšáku do krokví zajišťuje dvojice vzpěrných diagonál ve tvaru V, které zkracují vzpěrnou délku krokví a zmenšují jejich rozpětí při namáhání ohybem. Podobnou konstrukci má střední věšadlo u krovů s více stolicemi. Krovy se vzpěrami krokví sbíhajícími se na střední sloupek bývají označovány jako „klasové“. Krovy velkých kostelů mají více pater hambalků a několik řad podélných stolic.

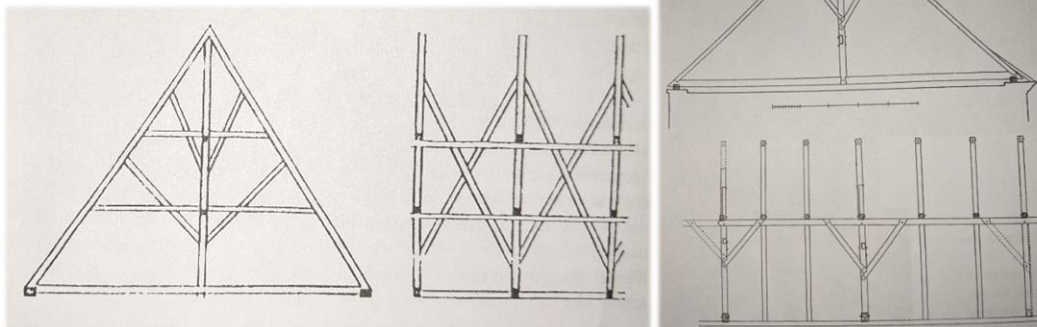
Podélnou stolicí tvoří zpravidla vaznice, sloupky, podélný práh uložený na vazných trámech, případně průvlak pod vaznými trámy, ondřejské kříže, diagonály nebo pásy. Stejně jako u vazeb příčných se u podélné stolice uplatňují tyto principy:

- zajištění tuhosti pomocí složení vazby převážně z trojúhelníků
- převažující namáhání tlakem a tahem
- malé rozdíly v dimenzích jednotlivých prvků
- uplatnění rybinových spojů

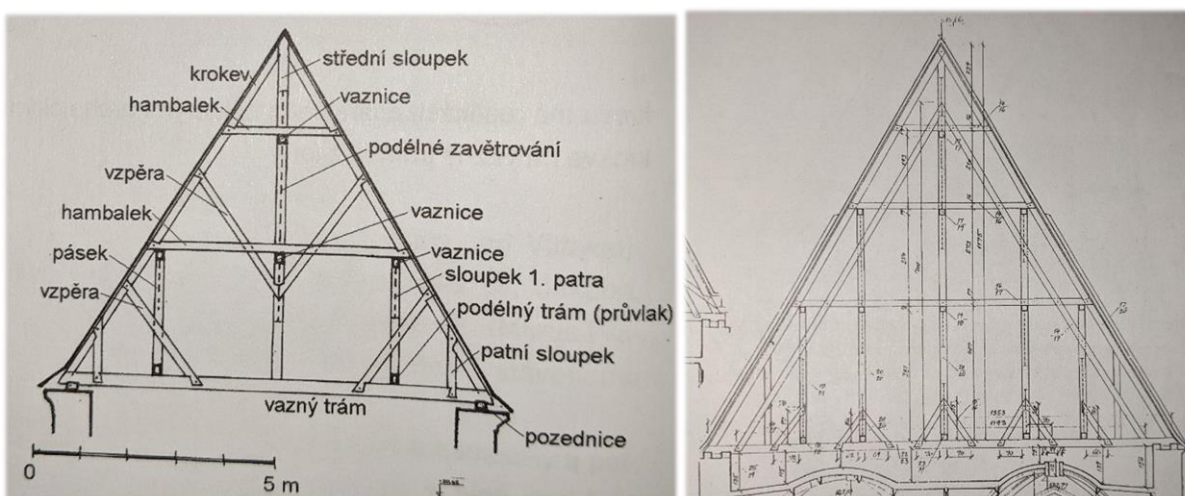
Rozpětí vaznic v podélné stolici zkracují šikmé prvky, které působí jako vzpěry nebo táhla a přenášejí zatížení vaznic do sloupků plných vazeb. Někdy při přenosu zatížení spolupůsobí celá podélná stolice jako vysoký příhradový vazník. V některých pozdějších krovech se ale podélná vazba omezuje pouze na vaznici s pásy, chybí zavětrování a vazba ztrácí charakter podélné stolice. Podélné stolice a podepření vazeb se významně podílely na zvyšování tuhosti vysokých krovů velkých kostelů zatížených větrem. Konstrukce podepřených hambalkových krovů působí prostorově, je tuhá a snese tak značné poškození, aniž by došlo k deformaci nebo kolapsu. Není tak kladený velký nárok na profily prvků ani charakter spojů, není třeba užívat kovových spojovacích prostředků. Nejdůležitější podmínkou správné funkce tohoto typu krovů bylo namáhání prvků normálovými silami, což bylo dobře zajištěno strmým sklonem střechy. Nevýhodou bylo vysoké zatížení větrem a nutnost použití velkého množství dřeva, což vedlo k velmi těžkým konstrukcím střech, jejichž zatížení přebírá spodní stavba. [6]



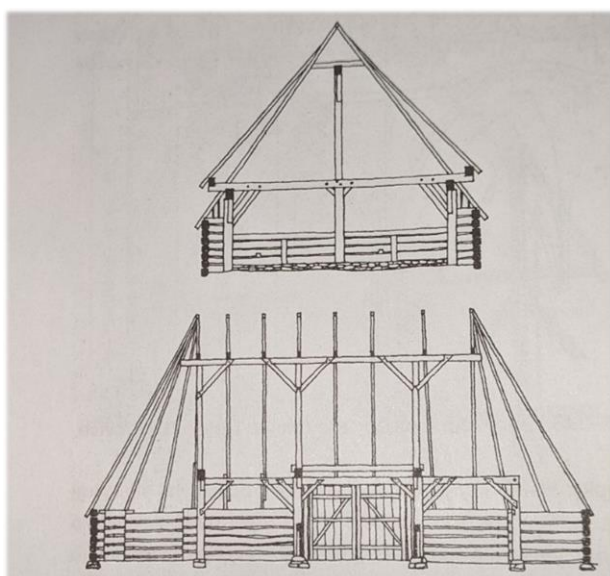
Obr. č. 29 Hambalkové soustavy s vrcholovou vaznicí vynášenou věšadlem a věšadlem vynášeným krokviemi. Zdroj: [6]



Obr. č. 30 Hambalkové krovy podepřené pouze v ose. Vlevo krov se dvěma hambalky, které jsou podepřeny vaznicemi uloženými na střední sloupek vynášený dvojicí vzpěr krokví. Vpravo krov s jedním hambalkem podepřeným vaznicí na sloupku, sloupek je vyvššen na krokve šikmými vzpěrami. Zdroj: [6]



Obr. č. 31 Hambalkové krovy podepřené několika podélnými stolicemi. Vlevo krov s vysokou střední podélnou stolicí s věšadlem zavěšeným na krokve a dvěma postranními podélnými stolicemi v 1. patře. Vpravo krov s pěti podélnými stolicemi s věšadlem vynesným ve vrcholu krokve a vzepřeným do vazného trámu vzpěrami souběžnými s krokve. Zdroj: [6]



Obr. č. 32 Podepřený hambalkový krov bez věšadla. Polygonální stodola s konstrukcí nesenou vaznicemi na sloupech, roubením a kobylou, která podpírá hambalky spojující krokve. Zdroj: [6]

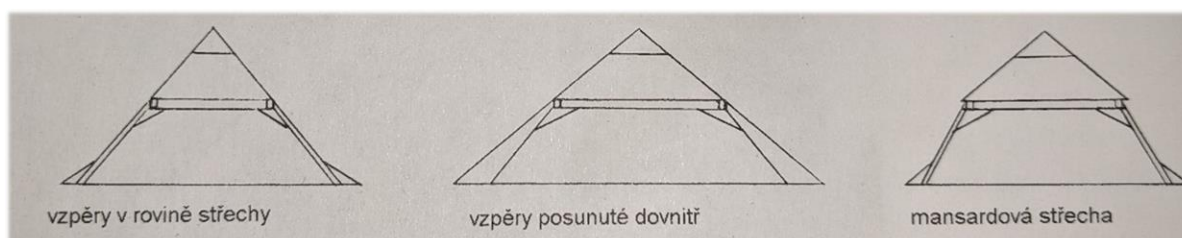
3.1.3.5 Vaznicová soustava

U vaznicových krovů jsou výrazně odlišeny plné a jalové vazby – přenos zatížení z jalových vazeb do vazeb plných zajišťují vaznice, které působí jako spojitě nosníky podpírané plnými vazbami. Pomocí vhodné vaznicové soustavy je možné zastřešit každý půdorys bez ohledu na sklon střechy. Spotřeba dřeva je menší než u krovů hambalkových, ale profily a spoje musí být diferencované, u některých prvků jsou nutné velké průřezy. Podle vaznic se rozlišuje počet pater krovu. Vaznicové soustavy se v základu třídí podle způsobu uložení vaznic na ležaté a stojaté stolice, mohou se ovšem vyskytovat i jejich kombinace. Celkově variabilita řešení při tomto typu krovů je prakticky neomezená, ačkoliv je všechny samozřejmě spojují určité znaky popsané v této kapitole.^[6]

Ležatá stolice

Prvky: krokve, hambalky, vaznice (vrcholové, střední, mezilehlé, spodní), vzpěry (šikmé sloupky), rozpěry, pásky stolice, vodorovné pásky, vazný trám, krátkata, výměna krátkat, pozednice, námětky, podélné ztužení v rovině vzpěr (diagonály, ondřejské kříže).

Ležaté stolice jsou vzpěradla, která podpírají nejvíc zatížené vaznice krovu (obvykle střední vaznice) a která působí jako relativně tuhý rám. Tento rám přebírá zatížení od vaznic a horních částí krovu, zachycuje vodorovnou sílu a převádí svislé zatížení do uložení vazného trámu. Ležatá stolice je namáhána tlakem i ohybem, její spolehlivá funkce je zajištěna masivními profily, ztužením rohů a dokonalým řešením spojů. Při menších sklonech střech se vzpěra posunuje dovnitř krovu pro zajištění příznivějšího namáhání tlakem. Rozpor mezi potřebným sklonem vzpěry a dobovou tendencí pro snížení hřebene střechy vyřešila mansardová soustava. Využití ležatých stolic umožnilo oproti předchozím hambalkovým soustavám snížit výšku střechy a vylehčit konstrukci krovu.^[6]



Obr. č. 33 Sklony vzpěr ležatých stolic. Zdroj: [6]

Vývoj ležaté stolice trval několik století. Nejprve se zdvojená krokev v plné vazbě proměnila v silnější profil vzpěry, vložením pásků se ztužil styk mezi vzpěrou a rozpěrou. U starších typů byly všechny prvky krovu provázány a tvořily prostorovou konstrukci, u typů novějších (klasických) tvoří prostorovou konstrukci ležaté stolice a vaznice s podélným zavětrováním, krokve a hambalky jsou na ně položeny.

Prvky krovů s ležatými stolicemi mají podle své funkce rozlišeny profily:

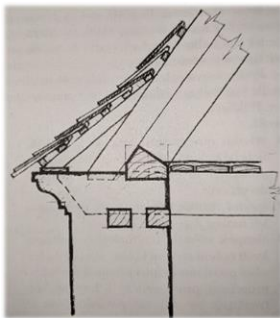
- střední vaznice je obdélníková, kosouhlá, lichoběžníková podle způsobu podepření hambalků a převodu zatížení do vzpěry,
- spodní vaznice je obdélníková nebo pětiboká,
- sloupek věšadla je čtyřboký, ve valbách kvůli opření vzpěr a krokví víceboký,
- profil vzpěry stolice je proměnný – rozšiřuje se pod začepováním pásků, aby spoj neoslabil průřez v místě největšího silového toku od zatížení vaznicí.^[6]

Krokve, hambalky, zavětrování, vazné trámy, mezilehlé vaznice a konstrukce horních pater mají profily srovnatelné s krovky jiných soustav. Vzpěry, rozpěry, pásky ležatých stolic, spodní (pětiboké) vaznice i střední vaznice mívají u ležatých stolic výrazně masivnější profily.

Jako materiál se používalo hlavně měkké dřevo, dřevo tvrdé se používalo na kolíky, sloupky věšadel, dynamicky namáhané zvonové stolice a výjimečně na celé krovy významných budov, případně tam, kde bylo dostupnější než dřevo jehličnanů.

Podle způsobu namáhání jsou u ležatých stolic výrazně rozličné i spoje různých prvků. Různé druhy čepování, kámpování, plátování, spoje jsou optimalizované dle spolupůsobení konkrétních prvků, krokve jsou spojené na ostřih. Hambalek již není tak často ke krokví plátován na rybinu, ale spíše do krokví čepován.

Pro správnou funkci ležaté stolice je nejdůležitější spolehlivé převedení sil ze vzpěradla do uložení krovu a zachycení vodorovných sil od svislého zatížení vazným trámem. K tomu slouží speciálně profilovaná pětiboká vaznice, do které je čepovaná šikmá vzpěra a opírá se o ni celým profilem. Přenos vodorovné síly z vaznice do vazného trámu potom zajišťuje křížový kámp mezi těmito prvky.



Obr. č. 34 Uložení ležaté stolice na pětibokou spodní vaznici. Zdroj: [6]

Jednotlivé krovy se liší podle polohy nebo způsobu uložení některých prvků:

- střední vaznice je natočená svisle nebo rovnoběžně s rovinou vzpěr,
- krokve jsou uloženy prostřednictvím hambalků, nebo osedlány na vaznice,
- vzpěry jsou uloženy do pětiboké vaznice, nebo přímo do vazných trámů,
- v uložení krovu se liší počet pozednic a to, zda jsou zhlaví zazděná, nebo ne,
- krátkata jsou buď uložena do výměn, nebo nejsou vůbec spojená (bez výměny).

Některé rozdíly v detailech krovů jsou charakteristické pro určitý region nebo okruhy tesařů.

Dimenze prvků se až na výjimky (mimořádně velké krovy nebo krovy významných staveb) liší velmi málo, ale výrazně se odlišuje konstrukce krovů pro lehkou a těžkou krytinu. Krovy se šindelovou nebo břidlicovou krytinou bývají oproti krovům s krytinou pálenou vylehčené, mají větší vzdálenosti krokví (až 1,5 m oproti 0,9 – 1,2 m) i plných vazeb, vzpěry jsou i při menším sklonu rovnoběžné s rovinou střechy, podélné ztužení je jednodušší.^[6]

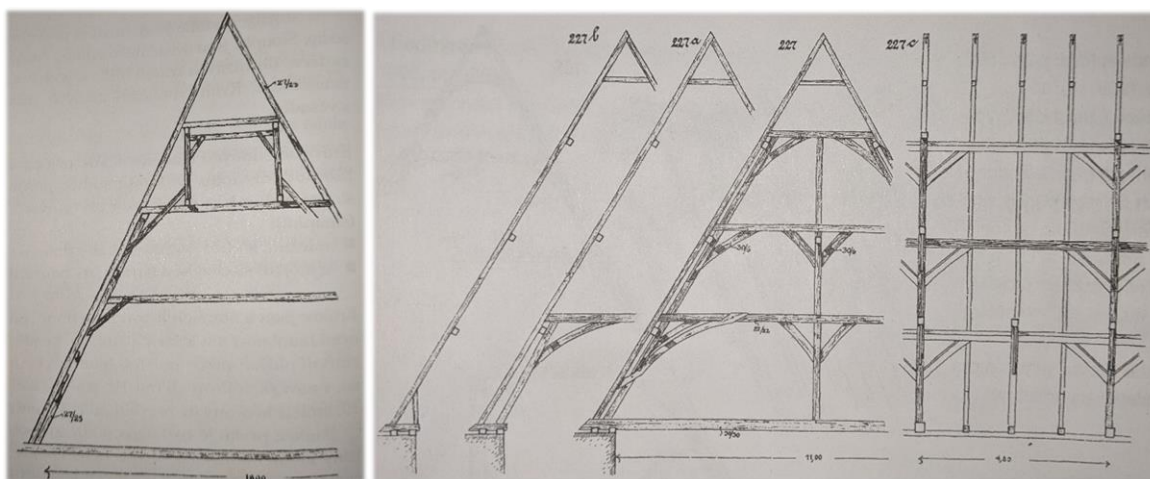
Podélné ztužení krovu zajišťují střední vaznice nesené ležatou stolicí, mezilehlé vaznice a ondřejské kříže nebo diagonály v rovině vzpěr. Mezilehlé vaznice nepřenášejí svislé zatížení, ale ztužují podélně a zkracují vzpěrné délky šikmých sloupků a prvků zavětrování příčně k jejich menšímu rozměru. Významnou funkcí podélného ztužení je podepření vaznic.

V horních patrech krovu nad ležatou stolicí se užívaly různé druhy konstrukcí – hambalková prostá, s podepřeným hambalkem, stojatá stolice, různé typy vzpěr. V nárožích valbových střech byly zpravidla diagonálně osazené poloviční ležaté stolice konstruované stejně jako stolice příčných vazeb. Rozpěry polovičních stolic se opírají o rozpěry poslední příčné stolice, případně o sloupek věšadla umístěný ve vrcholu valby. V připojení další sedlové střechy na valbu vznikají úžlabí, ve kterých byly osazovány diagonální poloviční ležaté stolice stejné konstrukce. Ve valbách a zejména v nárožích a

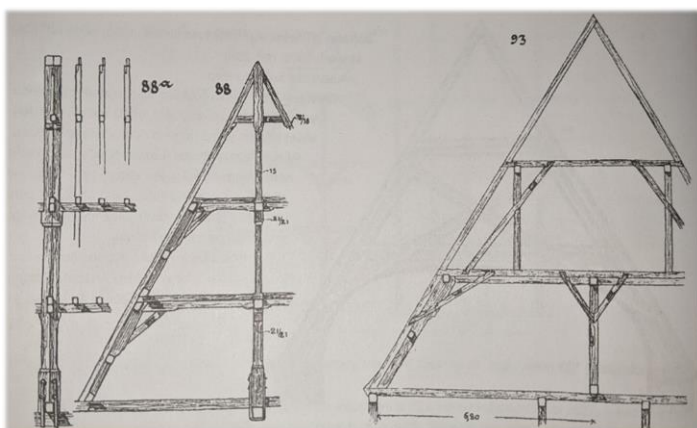
úžlabích složitějších krovů se vyskytuje řada konstrukčních chyb, které vedou k deformaci způsobující porušení krytiny. To vede k zatékání do krovu a výskytu hniloby, která vyvolá další porušení v citlivém místě. Konstrukce se proto doplňovaly (někdy dodatečně) o další prvky a ztužení.

U krovů na velká rozpětí se užívala věšadla, dvoupatrové ležaté stolice, zdvojené pásky a ondřejské kříže, zhlaví plných vazeb bylo ztužené ocelovými pásky, vzdálenosti vazeb byly menší a prvky masivnější. Krovky s ležatými stolicemi bývaly spojovány s konstrukcí stropu. Výrazně se začalo užívat železa k zesílení spojů, zejména u závlačí a závěsů věšadel, vyvěšení vazných a stropních trámů na průvlak. Zhlaví krovů se kotví nebo ztužují pásovým železem s hřebí. Běžná jsou dřevěná táhla se železnými závlačemi nebo železná táhla, která jsou kotvena do obvodových zdí, kleneb i krovu a ztužují celou stavbu. Táhla mají často kloubové spoje (oka), aby nedocházelo k jejich namáhání ohybem. Užívají se kramle spojující lípané nebo čepované prvky. Běžné je i použití kovaných skob, hřebíků a velkých hřebů s kulatou hlavou. Součástí tesařských spojů jsou stále kolíky z tvrdého dřeva.^[6]

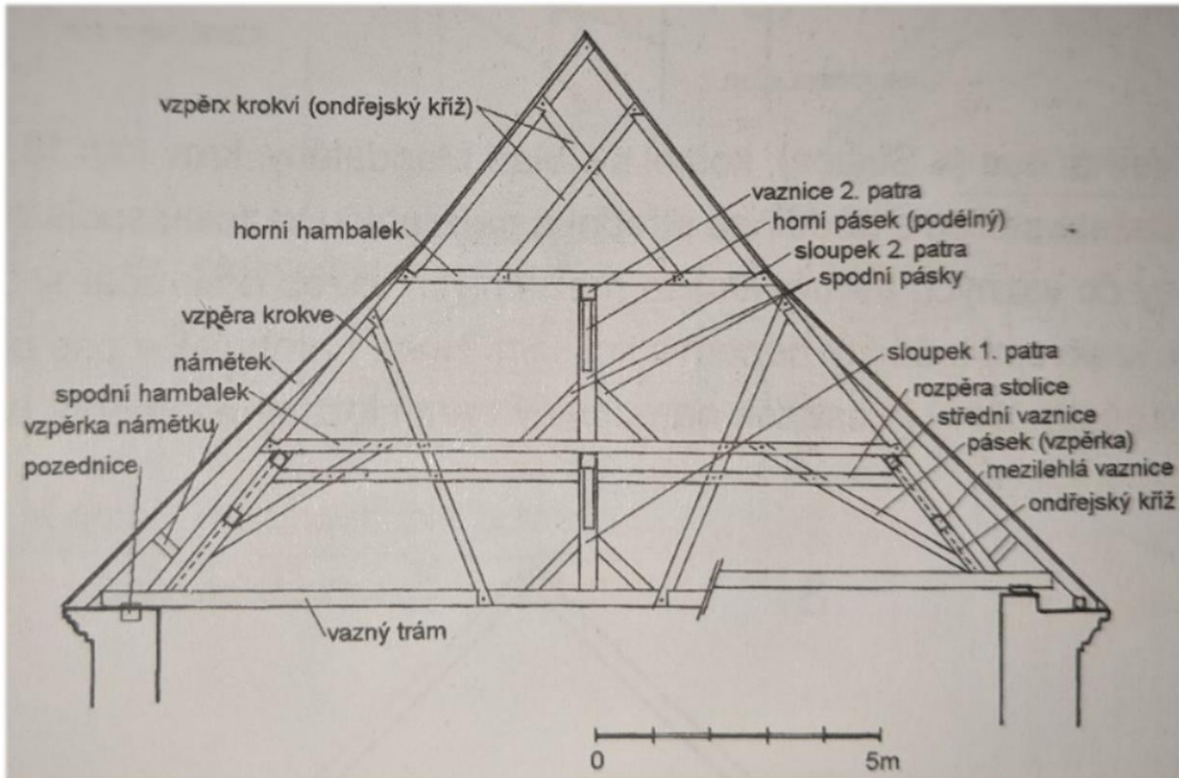
Redukcí ležaté stolice vznikaly zjednodušené konstrukce, nejvýznamnější z nich je soustava Ránková, která nemá hambalky a prahy (spodní vaznice), její tuhost je výrazně nižší.^[6]



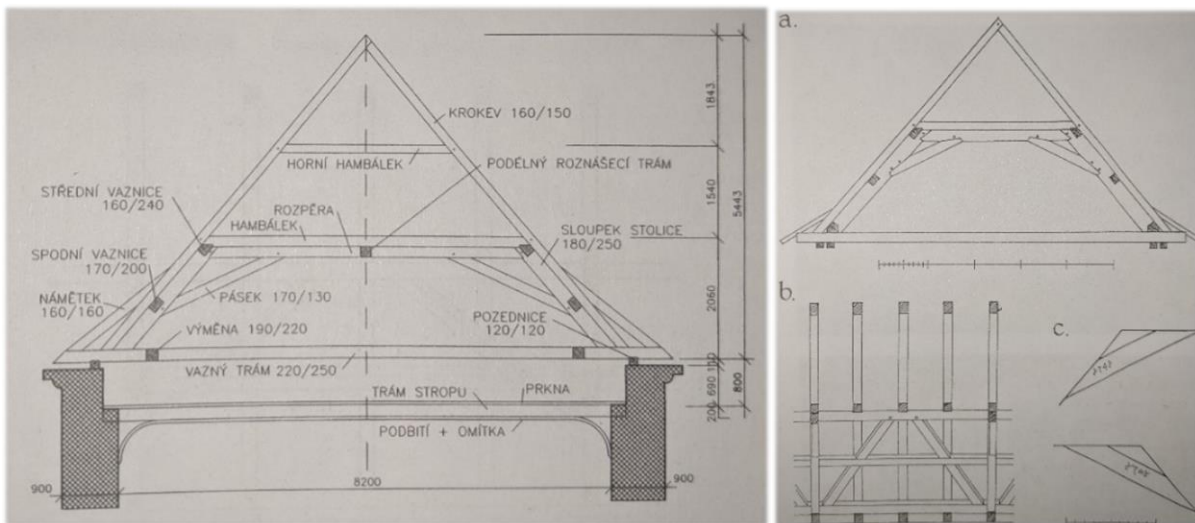
Obr. č. 35 Krovky, které jsou dokladem vývoje ležaté stolice. Vlevo krov se třemi hambalky, krokve jsou zesíleny vzpěrami nesoucími vaznice, chybí rozpěry, rohy jsou ztuženy pásky, pásek v 2. patře zasahuje do 3. patra, kde hambalek podpírá stojatá stolice. Vpravo krov, kde jsou rozlišeny vazby jalové (227b), vazby se středním sloupkem a třípatrovou ležatou stolicí (chybí rozpěry; 227) a vazby s jednodušší stolicí v 1. patře (227a) v rytmu: plná, b, a, b, plná; vaznice jsou umístěny mezi vzpěry a krokve. V obou krovech jsou vzpěry čepované do vazného trámu. Zdroj: [6]



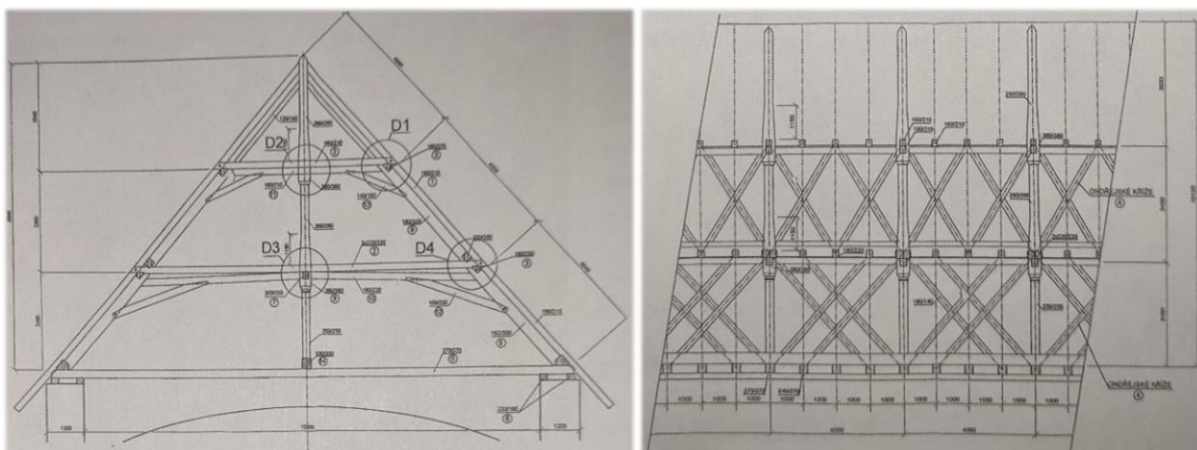
Obr. č. 36 Ležaté stolice staršího typu. Vlevo dvoupatrová ležatá stolice s věšadlem, vzpěry i rozpěry rozšířeny ve styku s pásky, vzpěry čepované do spodní vaznice. Vpravo ležatá stolice s dlouhými pásky spojujícími krokve, vzpěradlo a hambalky, podepřená osovým sloupkem, v patře stojatá stolice se vzpěrami, vzpěry čepované do vazného trámu. Zdroj: [6]



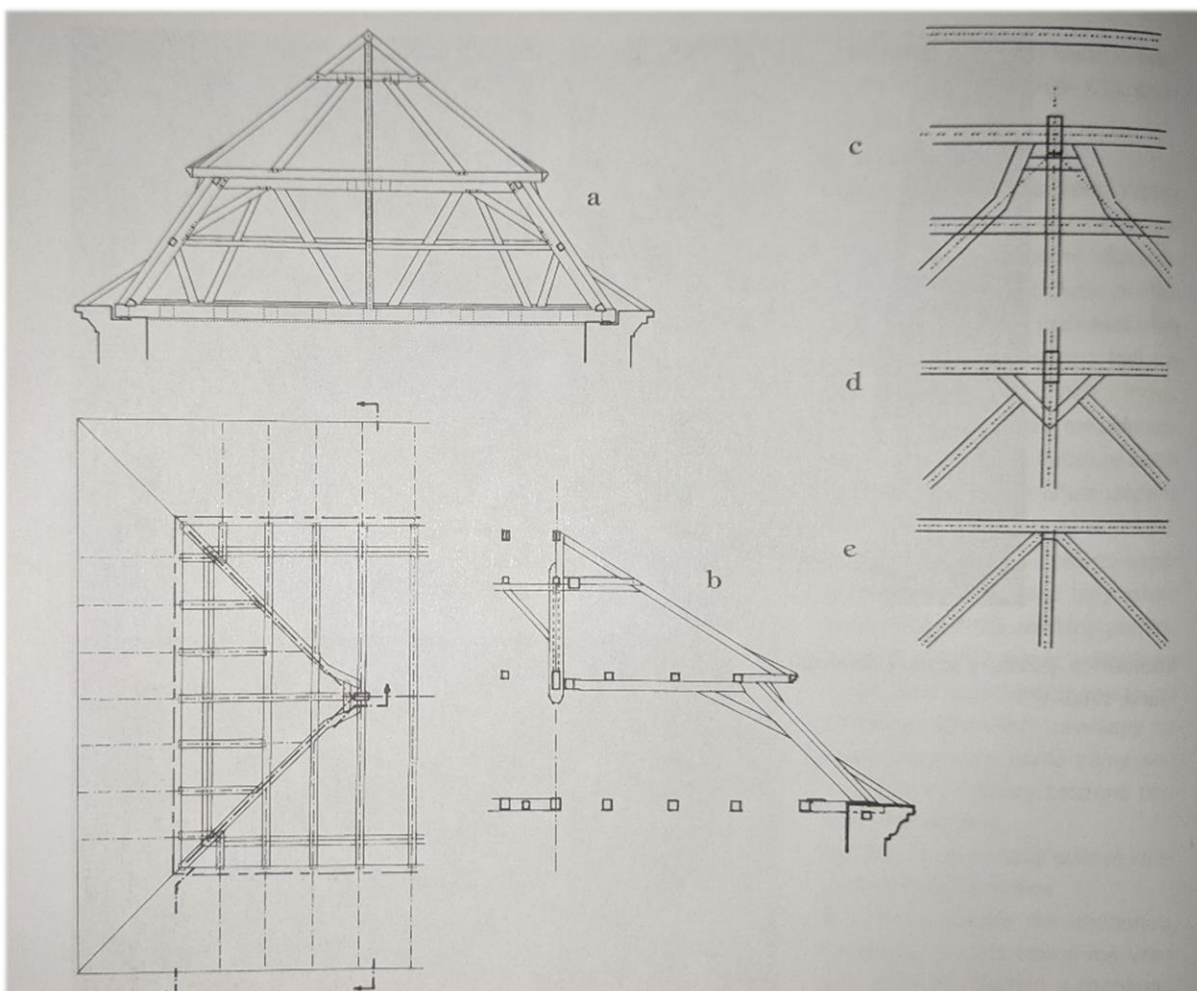
Obr. č. 37 Krov se dvěma hambalky je příkladem rané ležaté stolice. Charakteristickým znakem jsou dlouhé pásky spojující vzpěru, rozpěru a hambalek, pláty na rybinu a podepření hambalků vaznicemi. Konstrukce věšadel je nedomyšlená, únosnost tažených spojů není dostatečná a sloupky podpírající hambalky zatěžují nepříznivě vazné trámy. Zdroj: [6]



Obr. č. 38 Příklady klasických ležatých stolic. Vlevo krov s pětibokou střední a obdélnou mezilehlou vaznicí, pásky působí pouze ve vzpěradle, vzpěry jsou čepovány do vazných trámů, hambalky jsou do krokve čepovány, pod hambalky je podélný trám uložený do rozpěr plných vazeb. Vpravo ležatá stolice se vzpěrami opřenými do pětiboké spodní vaznice, v rovině vzpěr jsou diagonály opřené o střední a spodní vaznici, přeplátované s vaznicí mezilehlou. Zdroj: [6]



Obr. č. 39 Ležatá stolice s věšadlem. Rozpěra spodní stolice je ze dvou částí stykovaných na sloupeku věšadla. Vzpěry jsou průběžné přes patra a osazené na pětibokém prahu (spodní vaznici). Hambalky obou pater jsou vynášeny pětibokými vaznicemi. Mezi vaznicemi jsou vzeprény onďrejské kříže a tvoří společně příhradový vazník. Sloupek věšadla je vynášen ve vrcholu krokve a v posledním patře vzpěrami opřenými do hambalku. Věšadlo vynáší průvlak, na který jsou zavěšeny vazné trámy. Podélný trám podpírající spodní hambalky, horní rozpěra a horní hambalek jsou uloženy přímo do sloupku. Zdroj: [6]



Obr. č. 40 Mansardový krov s ležatou stolicí. Spodní hambalky leží na lichoběžníkových středních vaznicích a spodních krokvic, o jejich přesah se opírají horní krokve. V nárožích jsou diagonální poloviční ležaté stolice, jejich rozpěry se opírají do rozpěry věšadlové vazby mimo sloupek věšadla – jsou půdorysně vyhnuty (provedeny z křivého dřeva). Zdroj: [6]

Vaznicové krovy se šikmými nebo svislými sloupky (stojatá stolice), které přenášejí zatížení do vazných trámů nebo vnitřních zdí, vznikly z potřeby snížení sklonu střechy pod 40 °. Stojatá stolice byly užívány již dříve u krovů s podepřenými hambalky, které jsou kvůli časovému vývoji popsány ve vlastní kapitole v rámci popisu hambalkových krovů, ale na základě jejich statického působení je možné je zařadit také do vaznicových krovů. Stojatá stolice se v průběhu celé historie vyskytují u pultových střech, v horních patrech ležatých stolic, existují i stojatá stolice středověké.

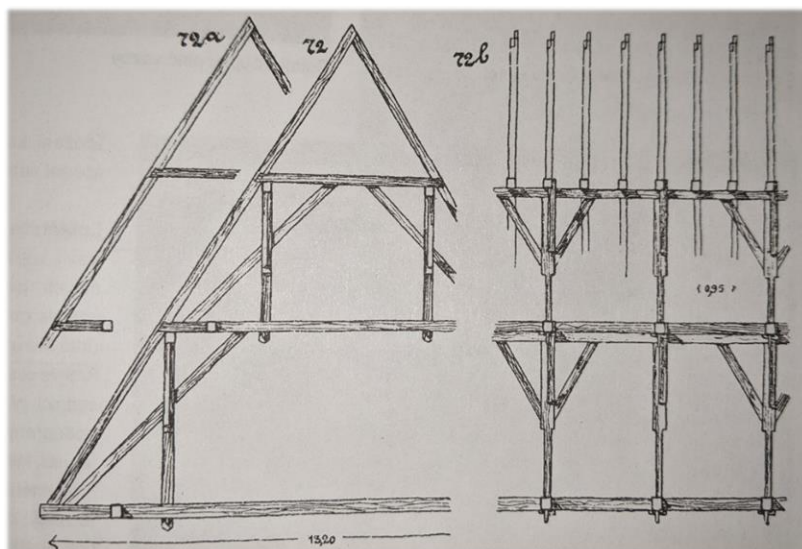
Vaznice jsou v plných vazbách podepřeny svislými nebo šikmými sloupky s pásky, případně sedly. Sloupky mohou být doplněny šikmými vzpěrami, které přenášejí zatížení blíže k podporám, aby se snížilo ohybové namáhání vazných trámů. K odlehčení vazných trámů se do plných vazeb často vkládají vzpěradla nebo věšadla.

Rozdíl mezi ležatou a stojatou stolicí je ten, že ležatá stolice působí jako vzpěradlový rám a šikmé vzpěry (sloupky) jsou namáhány tlakem a ohybem, zatímco prvky stojaté stolice působí jako samostatné prvky a sloupky jsou namáhané pouze tlakem.

Krokve jsou u starších krovů podepřeny prostřednictvím hambalků, u pozdějších jsou osedlány přímo na vaznici. Příčné ztužení plných vazeb zajišťují hranolové hambalky ke krokví čepované nebo plátované na rybinu, později hambalky nahrazují kleštiny z fošen se svorníkovými spoji. Běžně se ve spojích užívá železo – svorníky kleštín, závlače věšadel, pásové železo pro kotvení, různé třmeny.

Postupně se přestává užívat čepování krokví do vazných trámů a krátčat a začíná převládat uložení krokví na pozednici nebo spodní vaznici uloženou na vazné trámy.

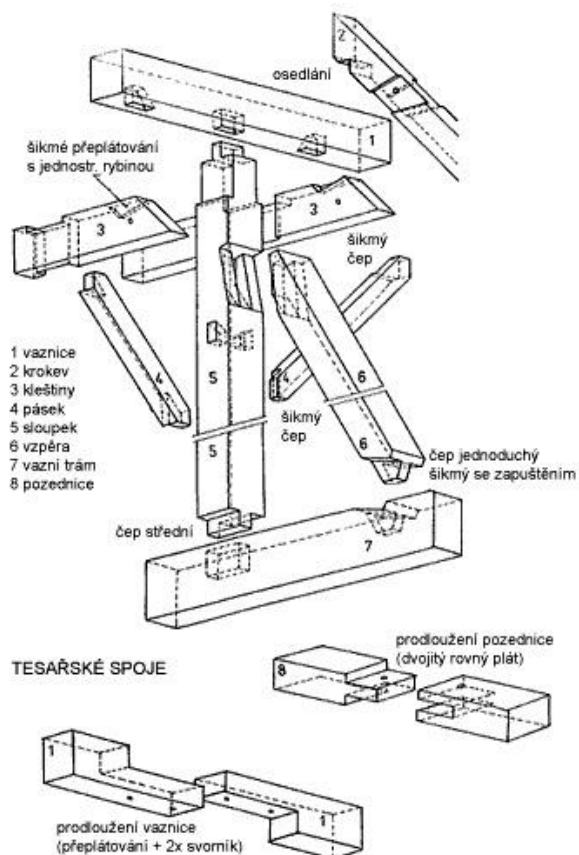
Stojatá stolice umožňuje zastřešení každého půdorysu bez ohledu na sklon střechy, tvary a spoje prvků jsou podstatně jednodušší než u ležaté stolice. Krovy jsou maximálně vylehčené a nepůsobí prostorově. Podélná i příčná tuhost je nižší, konstrukce nemá velké rezervy a při narušení nějakého prvku může dojít k celkovému kolapsu. Funkce prvků je rozlišena podle namáhání: krokve a vaznice jsou ohýbány jako prosté nebo spojitě nosníky, sloupky a prvky vzpěradel jsou tlačené, táhla věšadel a kleštiny jsou tažené. Prvky byly dimenzovány podle empirických vzorců, později i výpočtem podle zásad moderní statiky. Každý prvek je posuzován jako samostatně působící.^[6]



Obr. č. 43 Příklad starší stojaté stolice. Krov se dvěma hambalky podepřenými krajními sloupky s vaznicemi opatřenými pásky. Sloupky jsou přeplátovány se vzpěrami, které přenášejí zatížení blízko uložení vazného trámu. Sloupky jsou v tlačené části široké, v tažené části jsou zúžené, na spodním konci mají dlouhý střední čep, který prochází vazným trámem a je opatřený závlačí. Krokve jalových vazeb jsou čepovány do krátčat uložených do výměň, zkráceny a do výměň uloženy jsou i hambalky 1. patra. Zdroj: [6]

3.1.4 Konstrukční prvky klasických krovů a jejich spojování

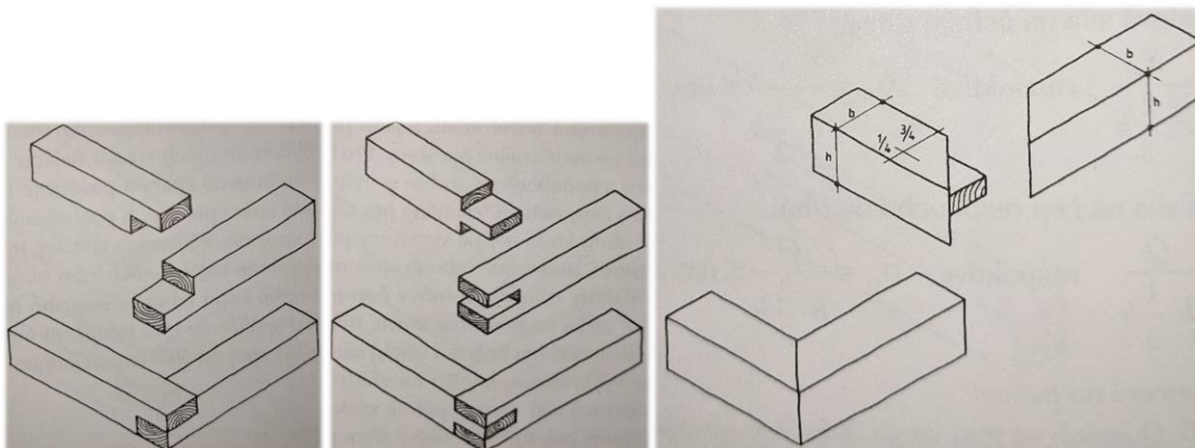
Náročnost řešení krovu je velmi variabilní od primitivní krokrové soustavy po složité prostorové prutové soustavy provázané ve více směrech. Některé prvky se vyskytují pouze u speciálních typů krovů. Individuálně se v již realizovaných krovech mohou nacházet unikátní řešení, která nelze zobecnit. Následující seznam tedy nemusí být kompletní, ale i tak se snaží co nejvíce pokrýt pestrou škálu konstrukčních prvků. Výčet slouží pro hlubší pochopení statického uspořádání krovu a uplatnění rybinového přeplátování, především jednostranného, v historických krovech.^[4; 7; 8; 10]



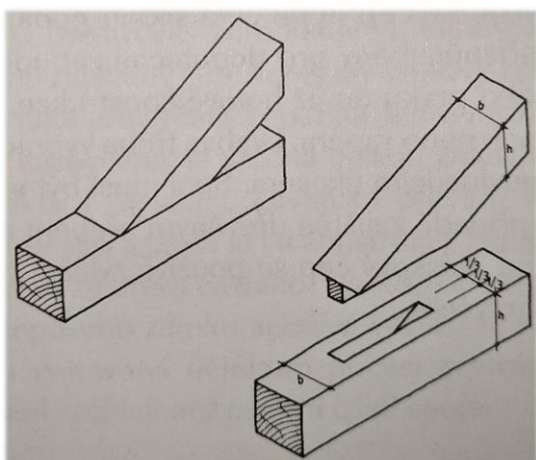
Obr. č. 47 Příkladů prvků krovu a jejich tesařského spojení. Zdroj: https://www.fa.cvut.cz/studium/predmety/pozemni-stavitelstvi-ii/prednasky/ps2_2122_-6.pr---krovove-konstrukce.pdf

3.1.4.1 Krokve

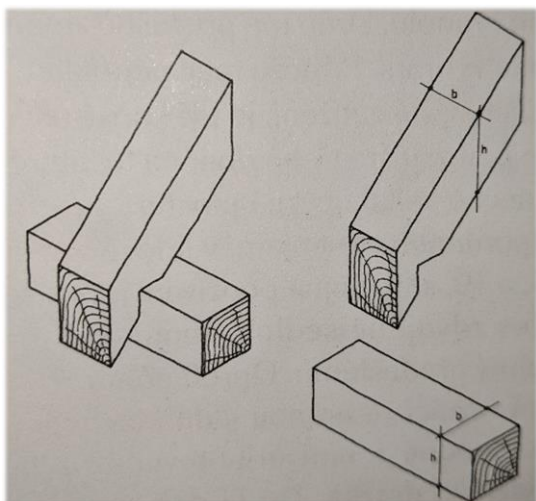
Krokve jsou obvykle šikmé prvky krovu, které přenášejí zatížení od střešního pláště, sněhu a větru do spodních částí krovu. Pouze krokve vlašské se ukládají vodorovně. Krokve jsou namáhány tlakem a ohybem, rozhodující namáhání záleží na sklonu střechy. V případě, že jsou krokve kotveny do vazných trámů, pak jsou v plných vazbách čepovány do konců vazných trámů, v prázdných (jalových) vazbách do krátkat. U vaznicových krovů bývají krokve na vaznice osedlány, případně jsou na ně uloženy prostřednictvím hambalků. Vzájemně jsou krokve ve vrcholu spojeny plátováním, na ostřích, nebo krytým čepem. V případě, kdy krove vynášejí ve vrcholu věšadlo, jsou do tohoto věšadla zapuštěné.



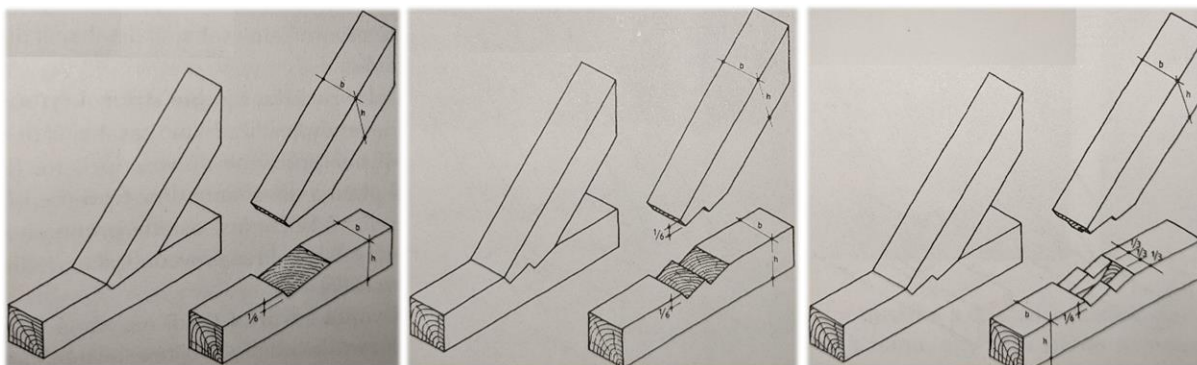
Obr. č. 48 Vzájemné spojování krokvi ve vrcholu. Vlevo rohový plát, uprostřed ostříhový čep, vpravo krytý kosý čep. Zdroj: [2]



Obr. č. 49 Čepování krokvi do vazného trámu šikmým čepem. Užíváno také pro napojení hambalku ke krokvím, pro připojení pásky v rohu ztužovaných prvků, napojení vzpěr ke krokvím, sloupkům a vazným trámům, pro připojení patních sloupků, pro připojení rozpěr k sloupkům stojaté stolice nebo pro spojení vzpěrky s námětkem. Zdroj: [2]



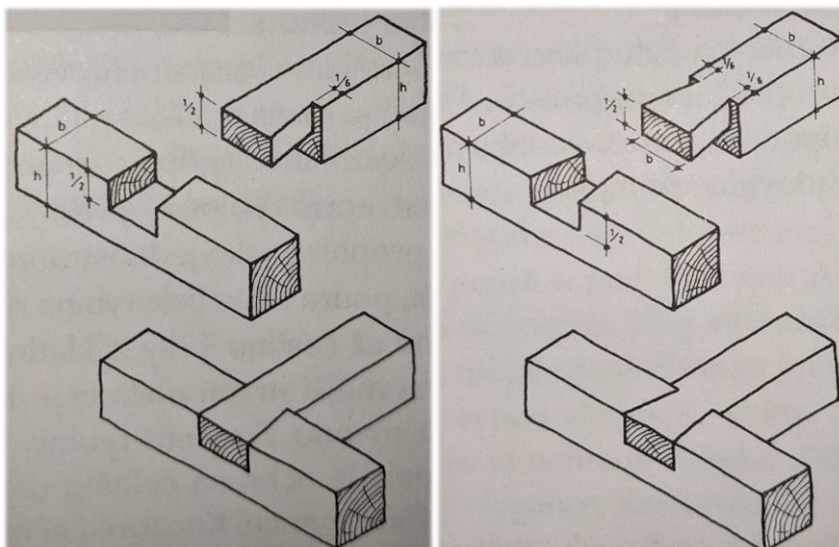
Obr. č. 50 Osedlání krokvi na vaznice nebo pozednice zadrápnutím přes zásek. Zdroj: [2]



Obr. č. 51 Zapuštění krokve do vrcholu věšadla. Vlevo jednoduchá čelní zarážka, uprostřed dvojitá zarážka, vpravo dvojitá čelní zarážka s čepem - dvě z mnoha variant čelní zarážky (zapuštění). Používá se i pro zapuštění krokve do vazného trámu nebo krátké nebo při napojení vzpěr ke sloupkům a vazným trámům. Zapuštění s čepem se používá u připojení rozpěry ke vzpěrám v ležaté stolici. Zdroj: [2]

3.1.4.2 Hambalek

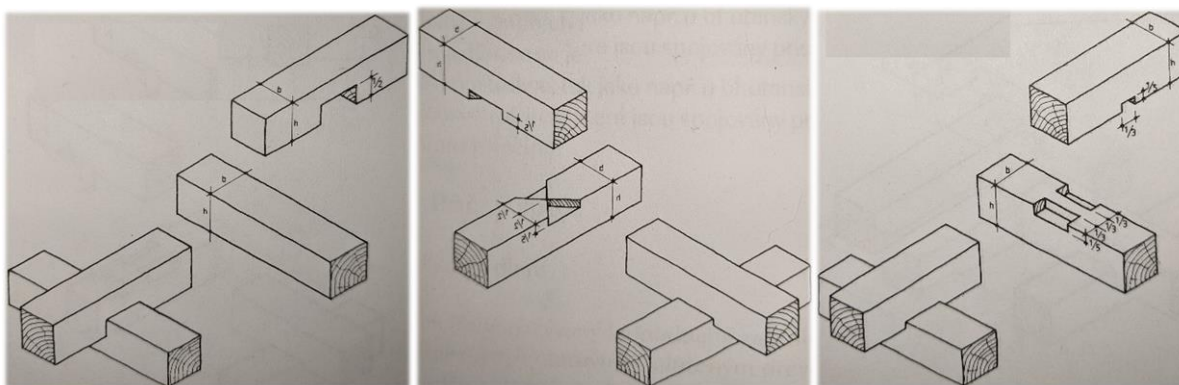
Hambalek je vodorovný trám spojující dvě protilehlé krokve v hambalkové soustavě krovu. Hambalek je charakteristickým prvkem středověkých krovů, pro něj je typický tvar blížící se rovnostrannému trojúhelníku. Hambalek má dvě významné statické funkce - zmenšuje rozpětí krokví a zajišťuje tuhost krovu v příčném směru (přenáší tah i tlak). U hambalkové soustavy s vaznicemi pak hambalky zajišťují také přenos zatížení z krokví do vaznic. Podle počtu hambalků rozlišujeme počet pater krovu. Hambalek je ke krokví připojen jednostranným rybinovým přeplátováním; pokud je podepřen vaznicemi, tak může být do krokví začepován a přenáší pouze tlak. Později byl nahrazen kleštinami.



Obr. č. 52 Vlevo jednostranný rybinový příčný plát (u napojení hambalku na krokev není příčný, ale šikmý). Uplatňuje se i při napojení pásků v rohu ztužovaných prvků, napojení vzpěr na krokve, sloupky a vazné trámy, připojení sloupků a patních sloupků, napojení ondřejských křížů na krokve (šikmá poloha prvků) nebo vaznice. Vpravo oboustranný příčný plát, který se výjimečně může vyskytovat ve výše zmíněných aplikacích, především ale pak u spojení věšadla s vazným trámem. Zdroj [2]

3.1.4.3 Vazný trám

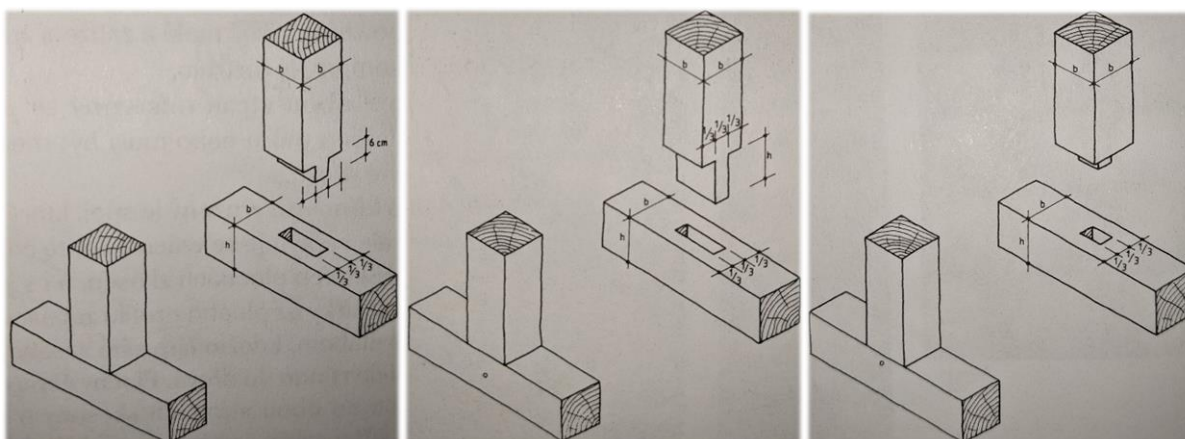
Vazný trám je příčný vodorovný prvek plné vazby krovu, má příčně ztužující funkci, zachycuje vodorovnou sílu a přenáší zatížení na zdivo. Jde o hlavní nosník krovu, na kterém spočívají všechny ostatní prvky, uplatňují se ale i vazby bez vazného trámu. Vazný trám bývá položen nebo kámpován přes pozednice, někdy je uložen přímo na zdivo. Vazný trám může sloužit jako táhlo ztužující stavbu nebo zachycující vodorovnou sílu od klenby. Někdy mají vazné trámy funkci stropních trámů.



Obr. č. 53 Kampování vazného trámu přes pozednici. Vlevo kampování jednostranným překlátováním, uprostřed křížový kamp a vlevo dvojitý kamp – dvě z mnoha variant kampování křížem. Kampování se vyskytuje také v uložení krátkáčů na pozednici nebo uložení podélných průvlaků a spodních vaznic přes vazné trámy. Kampování jednostranným překlátováním je užíváno také při zapuštění kleštin do krokví nebo sloupků. Zdroj: [2]

3.1.4.4 Krátčata

Krátče je náhrada vazného trámu v jalových vazbách. Krátký trám je položen nebo kampován na pozednici a uvnitř půdorysu začepován do výměny - trámu kolmého na vazné trámy. Převislý konec krátkčete u okapu nese krokev nebo námětek.



Obr. č. 54 Příčné čepování. Vlevo rovný čep, uprostřed rovný čep průběžný, vpravo čep z obou stran odsazený. Příčné čepování je využíváno také při napojení výměn na vazný trám, připojení sloupků do vazného trámu a do vaznic nebo při připojení vaznic ke sloupku u neprůběžných vaznic. Průběžný čep se vyskytuje v napojení věšadel na vazný trám – čep je delší než dlab a vespod opatřen závlačí. Zdroj: [2]

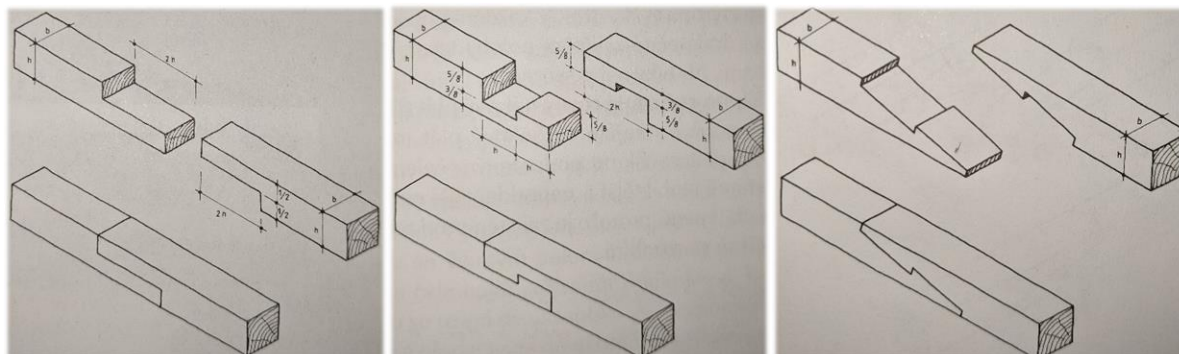
3.1.4.5 Výměna

Výměna je trám kolmý na vazné trámy, mezi které je výměna umístěna a do kterých je začepována podél vnějších zdí. Do výměny jsou začepována krátkčata nesoucí krokev nebo námětek. Ta v důsledku svislého zatížení od krokví konce krátkáčů působí na výměnu svislými silami, které směřují vzhůru.

3.1.4.6 Vaznice

Vaznice jsou vodorovné trámy namáhané ohybem, které přebírají zatížení od krokví a předávají je do sloupků, vzpěr, případně štítových zdí. Vaznice jsou uloženy na plných vazbách. Vaznice může být umístěna buď v hřebeni střechy (hřebenová nebo vrcholová), v jednotlivých patrech vícepatrových krovů (patrová), nebo přibližně ve dvou třetinách výšky krovu (středová). Při okapu může mít krov vaznici okapovou, která nahrazuje pozednici; užívala se hlavně u zemědělských staveb. Na vazné trámy může být také uložena spodní vaznice (práh; nezaměňovat s pozednicí), na kterou jsou osedlány nebo čepovány krokve; pokud není podezděna, pak je namáhána na ohyb a má funkci

vaznice, pokud jsou zhlaví vazných trámů zazděna, má tato vaznice stejnou funkci i polohu jako pozednice. Hřebenové a středové vaznice se kladou na výšku kvůli vyšší náchylnosti na průhyb. Vaznice se nastavují většinou nad podporou ležatým plátem, vyskytuje se i nastavení mezi sloupkem a páskem, případně vaznice není průběžná, ale čepovaná do sloupku.



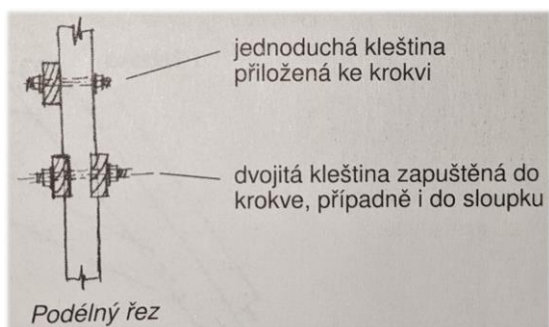
Obr. č. 55 Tři z mnoha variant podélného nastavování vodorovných prvků (především vaznic a pozednic). Vlevo rovný plát (ležatý plát), uprostřed rovný hákový plát, vpravo šikmo podříznutý šikmý hákový plát. Zdroj: [2]

3.1.4.7 Pozednice

Pozednice leží na zdivu, obvykle se kladou naplocho a ukládají se na ně vazné trámy a krátkata, někdy i krokve. Někdy bývají vazné trámy uloženy na dvě pozednice. Velmi často bývají pozednice zazděny. Pozednice jsou namáhány kroucením a musí být řádně kotveny do zdiva, do kterého přenášejí svislou a někdy i vodorovnou sílu. Pozednice se obvykle nastavují ležatým plátem zajištěným kolíky.

3.1.4.8 Kleštiny

Kleštiny jsou vodorovné fošnové prvky zajišťující příčné ztužení plných vazeb. Spolu s dalšími prvky vytvářejí v krovu staticky tvarově tuhé trojúhelníky postranním připojením ke krokví. Kladou se ve dvojicích (i jednotlivě) a zajišťují se v každém spoji jedním svorníkem. Mohou být zapuštěné do krokví, případně do sloupků (krokve nebo sloupky jsou přes kleštiny kempovány). Kleštiny jsou namáhány tahem.



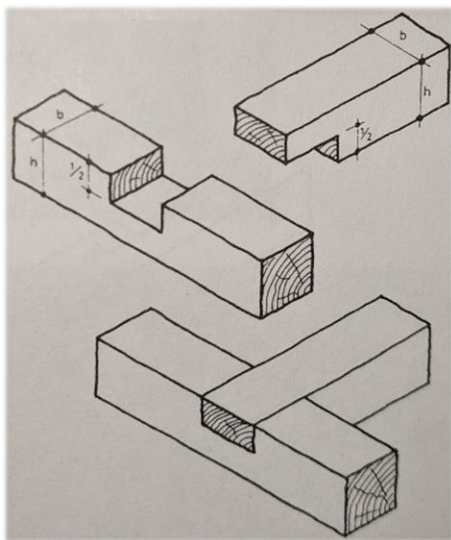
Obr. č. 56 Napojení kleštin ke krokví přiložením nebo zapuštěním s ocelovými svorníky. Zdroj: [10]

3.1.4.9 Sloupky

Obvykle se jedná o svislé nebo šikmé prvky zatížené tlakem nebo tahem (u věšadel), které mívají čtvercový průřez. Svislé sloupky v krovech s podepřenými hambalky přenášejí zatížení z vaznic do vazných trámů, bývají vynášeny vzpěrami a rozpěrami, a jejich spoje jsou většinou čepované, případně plátované na rybinu. Patrové sloupky přenášejí zatížení od vaznic do vazných trámů nebo do hambalků nižších pater; v krovech s ležatými stolicemi přenášejí zatížení od vaznic horních pater do rozpěry ležaté stolic.

3.1.4.10 Pásy (panty, vzpěrky)

Pásek je šikmá ztužující fošna či prkno. V podélné vazbě jsou pásy umístěné pod vaznicemi po obou stranách sloupků, kde jsou do sloupků i vaznic čepovány. Pásy se mohou objevit i v příčných vazbách ve spojení vazného trámu nebo příčného prahu a sloupku, například v krovu „na kobylu“, i u jiných spojení vodorovných a svislých nebo šikmých prvků v příčné vazbě. V takovém případě bývají k oběma prvkům připojeny jednostranným rybinovým přeplátováním nebo přímým plátem.



Obr. č. 57 Rovný příčný plát (kolmé připlátování) - vyskytuje se u připojení pásků méně často než rybinové plátování nebo čepování; prvky jsou oproti ilustračnímu obrázku ve vzájemné šikmé poloze. Zdroj: [2]

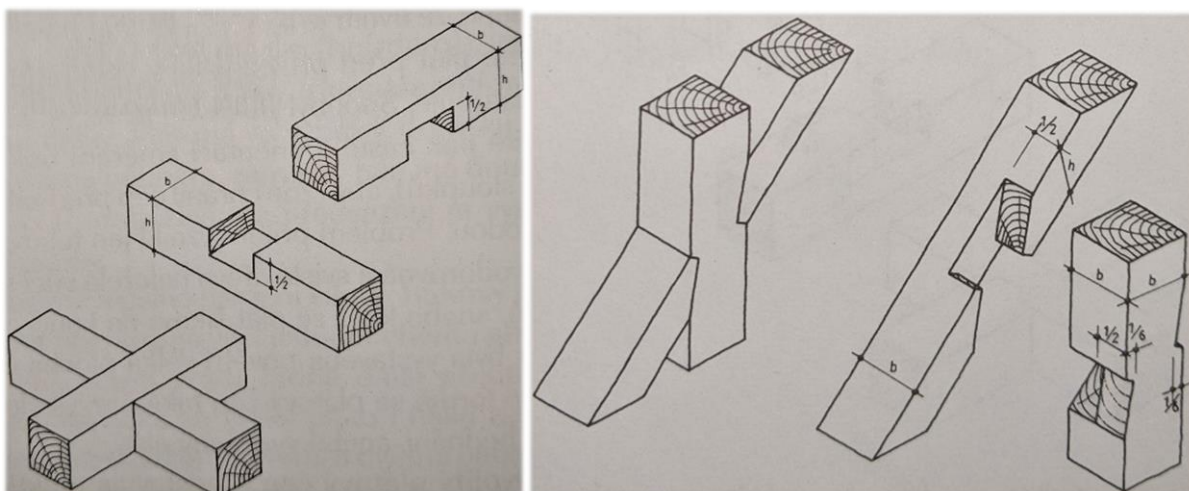
3.1.4.11 Patní sloupek

Patní sloupek je krátká svislá nebo šikmá vzpěra umístěná mezi vodorovné a šikmé prvky, např. vazný trám (nebo krátče) a krokev, vazný trám a vzpěra. K prvkům bývá připojen jednostranným rybinovým přeplátováním a je namáhán tlakem.

3.1.4.12 Vzpěry

Vzpěry spolu s dalšími prvky krovu vytvářejí v plné vazbě staticky tuhé trojúhelníky. Zachycují tlakové síly vznikající v krovu od působení vodorovných sil. Ke sloupkům a vazným trámům jsou připojeny plátováním na rybinu, zapuštěním nebo čepováním. Staticky účinná je jen vzpěra tlačená. U některých druhů krovů přebírají vzpěry funkci sloupků a přenášejí zatížení od vaznic do vazného trámu. Pokud vzpěra kříží sloupek, je s ním plátována.

Vyskytují se vzpěry krovů, sloupků, hambalků a vzpěry ležaté stolice. Vzpěry sloupků odlehčují sloupky a přenášejí jejich zatížení blíže podporám. Často vynášejí sloupky věšadel a bývají někdy opřeny i do hambalků. Vzpěry ležaté stolice patří k nejméně zatíženým prvkům krovů, jsou namáhány tlakem i ohybem a často mají proměnný profil – směrem k rohu stolice se rozšiřují.



Obr. č. 58 Plátování vzpěry přes sloupek, případně hambalek. Vlevo křížový plát (v krovech se obvykle uplatňuje při vzájemně šikmé poloze prvků), vpravo křížový plát s čelní zarážkou - jedna z mnoha variant křížového plátování. Vyskytuje se také při křížení zavětrování (ondřejských křížů a diagonál) s vaznicemi (u podélného zavětrování), sloupky a hambalky (u příčného zavětrování) nebo při vzájemném křížení prutů ondřejských křížů. Zdroj: [6]

3.1.4.13 Věšák (sloupek věšadla, táhlo)

Věšák je svislý prvek věšadlové konstrukce namáhaný tahem, který v krovech větších rozpětí pomáhá odlehčit vazný trám, který nelze opřít o středovou stěnu budovy. Věšadlo je podpůrná konstrukce, kde je vazný trám vynášen pomocí centrálně umístěného sloupku (věšáku) se symetricky umístěnými věšadlovými vzpěrami (jednoduché věšadlo), dvojité věšadlo má věšáky dva, vícenásobné i více. V takových případech jsou vždy mezi dvěma věšáky použity vodorovné rozpěry. Sloupky věšadel jsou vynášeny krokvy nebo vzpěrami zapuštěnými do sloupku. Závěs trámu je proveden spojem na rybinu, čepem se závlačí, železným svorníkem nebo třmenem.

3.1.4.14 Rozpěry

Rozpěra je vodorovný prvek namáhaný tlakem. Rozpěra ležaté stolic tvoří spolu s šikmými vzpěrami a rohovými pásky tuhou konstrukci vzpěradla. U klasických ležatých stolic je rozpěra zapuštěna do vzpěr a čepována na krátký čep zajištěný kolíkem. Rozpěry sloupků jsou čepovány do sloupků stojatých stolic, které jsou vynášeny šikmými vzpěrami. Někdy se u stojatých stolic místo hambalků nebo rozpěr sloupků vyskytují i rozpěry vaznic.

3.1.4.15 Zavětrování

Zavětrování slouží ke ztužení (zpevnění) krovu zejména v podélném směru. Provádí se v plných vazbách krátkými trámkami (pásky) šikmo rozepřenými mezi sloupky a vaznice. U krokevní soustavy se jedná o dřevěný prvek přibitý na spodní stranu krokví šikmo k hraně okapu.

Jako zavětrování v historických krovech se často užívají ondřejské kříže. U příčných vazeb hambalkových krovů spojují krokve, hambalky a sloupky, v podélných stolicích sloupky a podélné trámy. Ve styku na koncích je plát na rybinu, v křížení s prvky jsou plátovány a zajištěny kolíkem. U ležatých stolic se umísťují do roviny vzpěr mezi vaznice, do kterých jsou čepovány. Někdy bývají ondřejské kříže zdvojené, nebo ve dvou patrech nad sebou.

3.1.4.16 Bednění

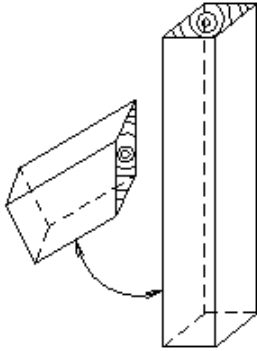
Bednění je vnější pobíjení krokví plošnými prvky jako jsou prkna. Slouží jako podklad pro laťování, na kterém je umístěna krytina, a jako ztužující konstrukce v rovině střechy.

3.1.4.17 *Laťování*

Laťování je konstrukce z drobného řeziva (latí) nesoucí krytinu. Latě jsou obvykle přibité na bednění krokví, v historických krovech jsou obvyklé dřevěné hřebíky.

3.1.4.18 *Námětek (náběh)*

Námětek je prvek, který u krovů krokevní soustavy kryje patní oblast krokví, vytváří lom střechy nad římskou a jeho konce tvoří obvykle okapní hranu střechy. Námětky se obvykle horním koncem lípají na krokev, spodní konec je osazen na vazný trám, krátče, nebo opřen o římsu. Dlouhé námětky bývají podepřeny vzpěrkami, někdy jsou s krokvemi spojeny kleštinami.



Obr. č. 59 Lípnutí námětku na krokev. Zdroj: [8]

3.1.4.19 *Sedla*

Sedla jsou krátké vložky pod tlačnými prvky. Užívají se tam, kde nemůže být pásek (například kvůli podchodné výšce), nebo u vaznic na velké rozpětí ve spojení s pásky. U závěsů věšadel zajišťují roznesení soustředěného zatížení v tlaku při namáhání kolmo na vlákna.

3.1.4.20 *Bačkora*

Bačkora je krátký dřevěný prvek v ležaté stolici bez vazného trámu, která se užívá pouze u staveb, kde je alespoň jedna vnitřní nosná zeď. Bačkora musí být řádně ukotvena do stropní konstrukce nad vnitřní zdí, aby nedošlo k jejímu posunutí. Přes bačkoru je přenášeno zatížení od vzpěr do nosné zdi.

3.1.4.21 *Podvlak*

Jedná se o podélný průvlak osazený pod konstrukcí nebo pod stropem.

3.1.4.22 *Příčle*

Příčle je příčný spojovací prvek konstrukce.

3.1.4.23 *Ližina*

Ližiny jsou základové prahy konstrukce.

4 Rybinové přeplátování v historických krovech

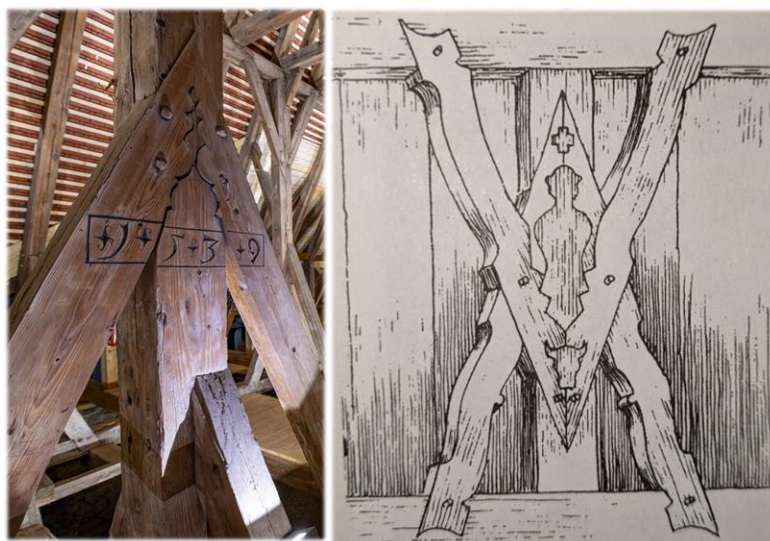
Tato kapitola je již úzce zaměřena na vývoj plátových spojů a přehled druhů příčného rybinového přeplátování.

4.1.1 Vývoj plátových spojů

Pláty podobně jako čepy slouží k podélnému, rohovému, příčnému, křížovému a šikmému spojování, při kterém obě spojovaná dřeva s protilehlým zářezem leží vazně přes sebe, příčně, nebo se křížují. Pláty a přeplátování prošly jednoduchým přímočarým vývojem. Svůj původ mají u spojů křížících se kulatin, u kterých bývaly dosedací plochy rovně opracovány tak, aby se dosáhlo přesného přiložení. Přilípnutí lze považovat za předchůdce přeplátování. Hranoly byly zprvu jen nepatrně seříznuty, takže křížící se dřeva ještě nemohla na sobě spočívat vazně. Pak byla dřeva prořezávána až na polovinu své síly a takto vytvořené plátové zářezy byly do sebe propojeny. U těchto vývojově završených přeplátování leží dřeva vazně. V dalším vývoji se pláty vyráběly ve tvaru rybiny nebo se tvarovaly jiným způsobem, aby se rozšířily funkce plátového spojení, jako je zajištění proti zdvihu nebo podchycení tahových sil. Plátové spoje byly podobně jako spoje čepové známy již v době okolo roku 3000 př. n. l a jsou spolu s nimi dodnes používány. V jejich společném vývoji a ve způsobu jejich užití však lze pozorovat změny: asi do 15. století se používaly u příčných a křížících se spojů převážně spoje plátové a poté stále více převládaly čepy.

4.1.2 Druhy příčného rybinového přeplátování

Rybinové přeplátování se uplatňuje ve spojích šikmých konstrukčních prvků k prvkům svislým nebo vodorovným, kde je nutné přenášet kromě tlakového zatížení i zatížení tahové. Tlak je ve spoji přenášen jádrem připojovaného dřeva, tah se přenáší plátem ve tvaru rybího (v angličtině „hrdliččina“) ocasu^[6]. Rybinové přeplátování můžeme dále rozdělit na jednostranné a oboustranné. Oboustranná rybina dobře přenáší tlakové a tahové síly, je navíc zajištěna proti bočnímu posuvu. Také otočení dřev navzájem je vyloučeno (pouze v případě přesného zpracování spoje a vyloučení sesychání rybiny). Není-li plát zatížen shora, je nutné pouze zajištění proti zdvihu. Sevření spojů zajišťuje kolík z tvrdého dřeva, který má tvar klínu, s jeho pevností ve smyku se nepočítá. Rybinové přeplátování je možné kombinovat se zapuštěním. Kryté rybinové přeplátování zajišťuje větší odolnost čelní strany spoje proti pronikání vlhkosti, vyšší estetickou hodnotu a méně oslabuje průběžný prvek.^[5]



Obr. č. 60 Ukázka plátování se složitou profilací. Zdroj: vlevo viz obr. č. 13, vpravo [2]

Následující výčet představuje možnosti kolmého a šikmého spojování dřev přeplátováním s rybinovým tvarem. Ve výčtu nejsou zahrnuty složitěji tvarované pláty, které mohly mít i více zazubení, vykytovaly se i rybiny tvarované do oblouku. Složitějším tvarováním mohlo být dosaženo lepšího přenosu tahu, ale většinou šlo o dekorativní účel. Práce se podrobně zaměří na jednostranný rybinový příčný plát, který se z následujících možností vyskytoval v krovech nejhojněji.

4.1.2.1 Rybinový příčný plát

Nazývá se také rybinový plát, měkká rybina nebo měkký rybinový příčný plát.

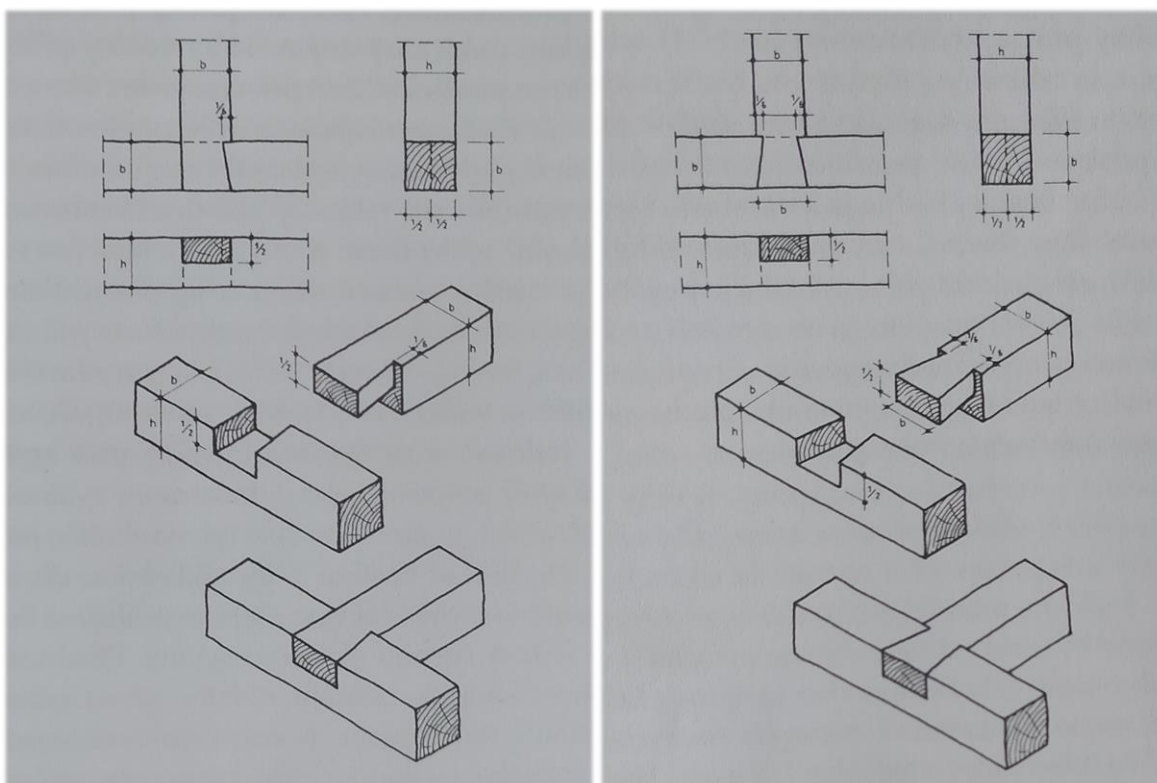
Plát je v jednostranném i oboustranném rybinovém příčném plátu seříznut na polovinu výšky dřeva.

V jednostranné variantě je jeden bok plátu rovný a pravoúhlý, druhý je na straně plného profilu dřeva zúžen o jednu šestinu šířky dřeva. Ve tvaru šikmého napojení se tento plát často používal v krovech např. při napojování hambalků, vzpěr, pásků, patních sloupků nebo zavětrování (ondřejský kříž).



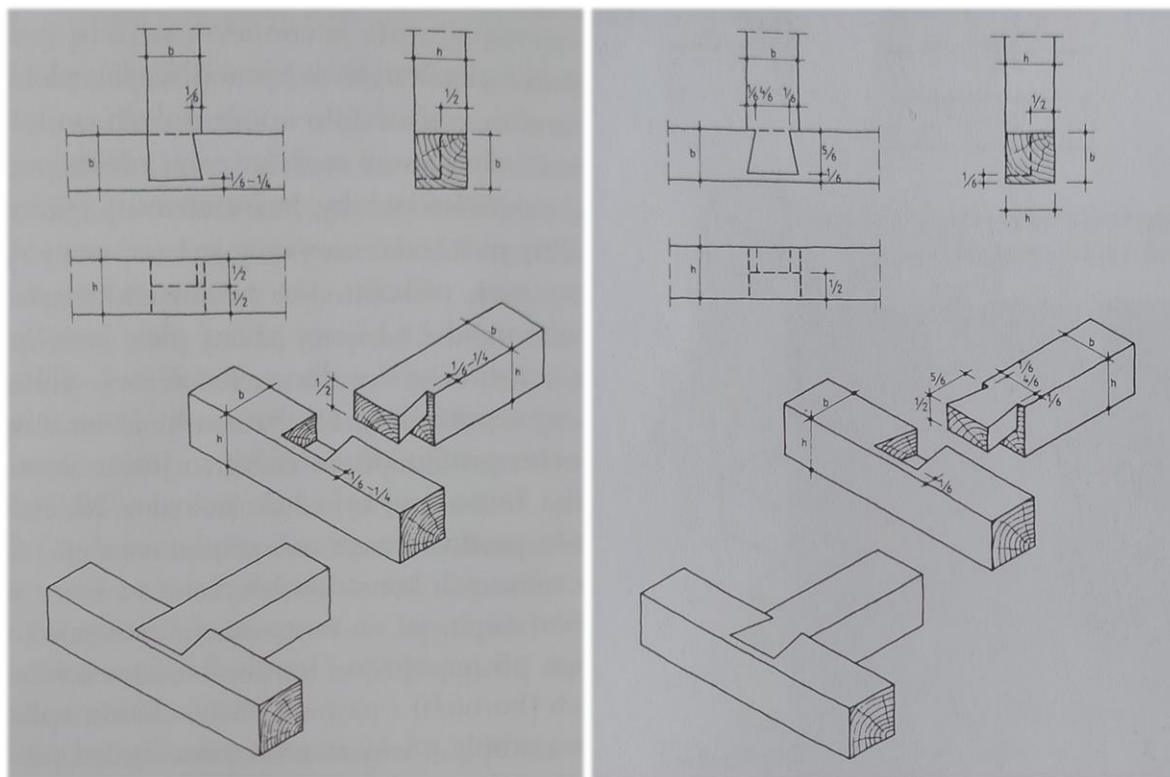
Obr. č. 61 Ukázka rybinového plátování hambalku ke krokvi a pásků k hambalku v krovu hradu Krásná Hôrka (zvýrazněno).

Oboustranný plát je na straně plného profilu dřeva zúžen na obou stranách o jednu šestinu šířky dřeva. Oboustranným zúžením může tento plát zachytit větší tahové síly, ale kvůli pracnosti je používán vzácněji než plát jednostranný.



Obr. č. 62 Jednostranný (vpravo) a oboustranný (vlevo) příčný rybinový plát nekrytý. Zdroj: [2]

Plát může procházet celou tloušťkou spodního dřeva, nebo může být krytý; to znamená, že se na čele připojovaného dřeva rybina zkrátí o jednu čtvrtinu až šestinu šířky spodního dřeva, na jehož vnější straně zůstane průběžná líce se šířkou rovnou zkrácení rybin. Předností tohoto řešení je ochrana čelního dřeva rybin a jeho vyšší elegance.^[2]



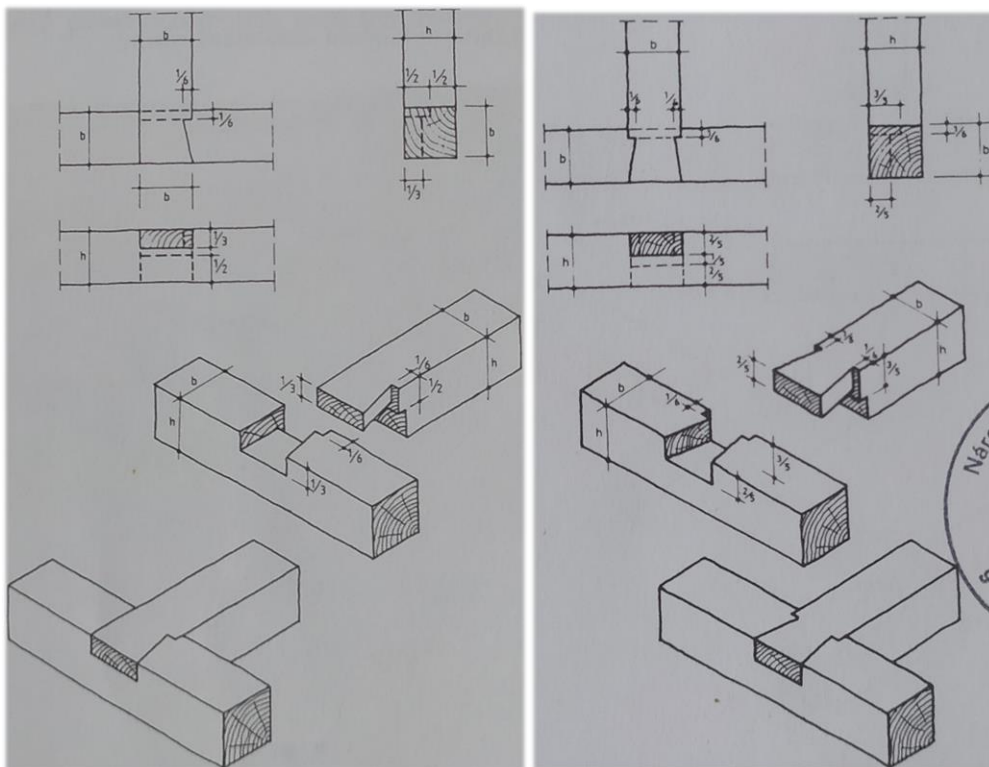
Obr. č. 63 Jednostranný (vpravo) a oboustranný (vlevo) příčný rybinový plát krytý. Zdroj: [2]

4.1.2.2 Rybinový příčný plát s předsazením

U jednostranné rybiny je předsazení jako dodatečná opěra provedeno tak, že se rybina na čelním konci plátu do hlavního hranolu zapustí jen na jednu třetinu výšky hranolu, kdežto v místě zádlabu zbydou ještě dvě třetiny síly dřeva. Předsazení je na plnou šířku vkládaného dřeva a má tloušťku rovnou polovině výšky hranolu.

U oboustranné rybiny se výška hranolů rozdělí na pětiny, a pak má rybina mocnost dvě pětiny a předsazení tři pětiny. Průchozí dřevo se tak oslabí pouze na tři pětiny. Jiný návrh umožňuje využít stejný postup jako u jednostranné rybiny. Spoj pak předpokládá tloušťku plátu jedné třetiny, přičemž předsazení má pak poloviční výšku dřeva a nosné dřevo je oslabeno na dvě třetiny.

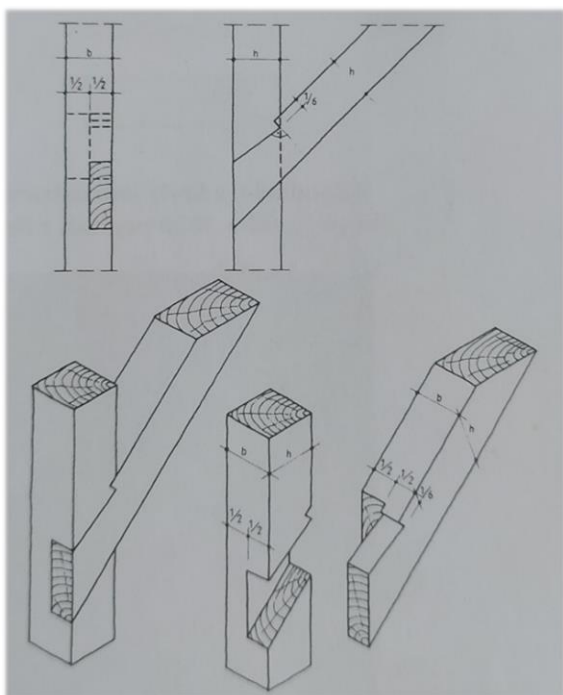
Při eventuálním rozevření tohoto spoje nejsou vidět spáry a zmenší se oslabení nosného dřeva, takže lze přes něj přenášet vyšší zatížení. Jak u jednostranného, tak u oboustranného rybinového příčného plátu s předsazením lze spoj realizovat jako nekrytý i krytý.^[2]



Obr. č. 64 Jednostranný (vpravo) a oboustranný (vlevo) příčný rybinový plát s předsazením nekrytý. Zdroj: [2]

4.1.2.3 Rybinový příčný plát se zarážkou

Používá se obzvláště při napojování šikmých prvků. Jedná se obdobu předchozího spoje, ale čelo zářezu rybiny je zde zapuštěno do spodního dřeva. Tento spoj se uplatňuje pouze u jednostranné rybiny. Palec zapuštění na šikmo vázaném dřevě se vyrábí se šířkou, která je rovna tloušťce plátu, a jeho čelo je kolmé k vázanému (připojovanému) dřevu. Přidaným zapuštěním je podstatně vylepšen přenos tlakových sil. Lze realizovat nekrytý i krytý.^[2]



Obr. č. 65 Jednostranný rybinový příčný plát se zarážkou nekrytý. Zdroj: [2]

5 Metodika

Návrhy a ověření konstrukcí krovů je třeba prokázat statickým posouzením, že konstrukce je dostatečně spolehlivá. Ke stanovení účinků zatížení (tj. normálových sil, posouvajících sil a ohybových momentů na průřezy prvků a přetvoření konstrukce) bude využit výpočetní program. Pro jeho použití je třeba vytvořit výpočetní model konstrukce, který obsahuje vstupní veličiny a údaje dostatečně přesné a uspořádané tak, aby výstižně popsaly statické chování konstrukce.

Podrobné údaje k jednotlivým částem statické analýzy budou uvedeny vždy v příslušné kapitole, zde je souhrnný výčet kroků metodického postupu:

1) Definice problému

Prvním krokem statické analýzy je definice řešeného problému. Předmětem statické analýzy je část nového krovu v rekonstruovaném hradu Krásná Hôrka. Krov je již postaven a úkolem statické analýzy je určení vhodného výpočetního modelu konstrukce a zhodnocení pevnosti a stability vybraných prvků a spojů krovu. V krovu bude analyzován vliv rybniny jako kloubu a tuhého vetknutí a dále porovnávány různé modely podepření.

2) Výpočetní model nosné konstrukce

Výpočetní model nosné konstrukce má obsahovat:

- a. model materiálu udávající tuhostní a pevnostní charakteristiky i fyzikální vztah mezi napětím a přetvořením dřeva;
- b. model zatížení, který určuje charakteristiky, hodnoty a uspořádání zatížení po střešní konstrukci a možné nejúčinnější kombinace zatěžovacích vlivů;
- c. model konstrukce, který popisuje tvar a rozměry konstrukce. Udává rozměry průřezů prvků, geometrické uspořádání prvků v prostoru a modely spojení prvků.^[6]

Model konstrukčního dřeva

Dřevo je hygroskopický ortotropní materiál s rozdílnými vlastnostmi v podélném, radiálním a tangenciálním směru. Vlastnosti v podélném směru se odlišují od vlastností v příčných směrech daleko výrazněji než vlastnosti v radiálním a tangenciálním směru navzájem. Proto je v normách pro zjednodušení výpočtu zaveden transversálně izotropní model konstrukčního dřeva stálé vlhkosti, který bude materiálovým modelem i v této analýze.

Výpočetní model materiálu je určen vztahem mezi napětím a přetvořením. Tento vztah může být lineární nebo nelineární. Vztah mezi napětím a přetvořením je uvažován lineární s moduly pružnosti rovnoběžně s vlákny a kolmo na vlákna. Také pevnostní charakteristiky jsou uvažovány rozdílné v podélném a příčném směru dřeva a jejich hodnoty jsou převzaty z normy ČSN EN 338 (731711) - Konstrukční dřevo: Třídy pevnosti.

Model zatížení

Zatížení se podle proměnnosti v čase dělí na zatížení stálá, proměnná a mimořádná. Podle odezvy v konstrukci se zatížení dělí na statická a dynamická. Na předmětnou konstrukci budou uvažovány dva typy zatěžovacích stavů – silový a vlastní tíha. Deformační zatížení, oteplení nebo změna vlhkosti uvažovány nejsou. Jako stálá zatížení jsou uvažovány vlastní tíha a střešní krytina, proměnnými zatíženími jsou sníh a vítr se statickými účinky. Na konstrukci nepůsobí mimořádná ani dynamická zatížení (účinky větru jsou brány jako statické). Užité zatížení střechy není uvažováno – dají se předpokládat občasné revize a opravy střechy, toto zatížení předpokládáme, že je podchyceno zvyšováním hodnot ostatního reálného zatížení a snižováním hodnot reálných pevností při posuzování konstrukce metodou dílčích součinitelů.

Model konstrukce

Ve výpočetním programu Scia Engineer budou vytvořeny prostorové modely vybrané části krovu dle skutečné geometrie konstrukce. Prutům budou zadány navržené průřezové charakteristiky a materiálové vlastnosti dřeva. Oslabení prutů v místě tesařských spojů není v modelu konstrukce uvažováno. Všechny prvky jsou uvažovány jako stýkající se ve svých střednicích. Spoje a podpory jsou uvažovány jako klouby nebo vetknutí s nekonečnou tuhostí (nulovým posunem) nebo volností v příslušných směrech. Celkem bude vytvořeno 9 modelů konstrukce – tři modely s rybinovými spoji uvažovanými jako klouby, nebo vetknutí, a každý z těchto modelů bude zpracován ve třech variantách modelování podpor. V práci bude vznesena úvaha o pružném modelování spojů a podpor.

3) Výpočet vnitřních sil a deformací v konstrukci

Existuje mnoho analytických a numerických metod pro stanovení vnitřních sil a deformací v konstrukcích. Mezi analytické metody patří například metoda řešení rovnic rovnováhy (pouze pro staticky určité konstrukce), princip virtuálních sil a posunutí, deformační a silové metody (vhodné pro výpočet staticky neurčitých konstrukcí). Mezi numerické metody patří metoda konečných prvků, m. konečných diferencí, m. konečných objemů nebo m. diferenciálních rovnic.

K výpočtu vnitřních sil a deformací bude využit výpočetní program, který získává příslušné hodnoty deformační variantou metody konečných prvků (FEM – finite element method). Výpočet bude proveden na nedeformované konstrukci podle teorie 1. řádu (neuvažuje se zatížení konstrukce po počáteční deformaci, tímto výpočtem se zabývá teorie 2. řádu).

4) Posouzení modelů

Po získání vnitřních sil a posunů v jednotlivých modelech konstrukce bude vyhodnocen vliv modelování spojů a podpor na rozložení vnitřních sil v konstrukci. Dále bude vyhodnocen nejvhodnější model pro posouzení pevnosti a stability vybraných prvků a spojů krovu.

5) Zhodnocení pevnosti a stability

V závěru bude provedena kontrola toho, zda jsou napětí v rámci přijatelných limitů a zda konstrukce odolá poruše pod působením zatížení. Vývoj různých metod pro navrhování stavebních konstrukcí se postupně ustálil na třech všeobecně používaných metodách, které se v různých modifikacích uplatňují v normách pro navrhování konstrukcí dodnes: metoda dovolených namáhání, m. stupně bezpečnosti a metoda mezních stavů. Prvky konstrukce budou posuzovány metodou mezních stavů, ve které se spolehlivost konstrukce ověřuje pomocí dílčích součinitelů spolehlivosti. Tato metoda se používá v Eurokódech.

6 Popis konstrukčního provedení a zatížení krovu

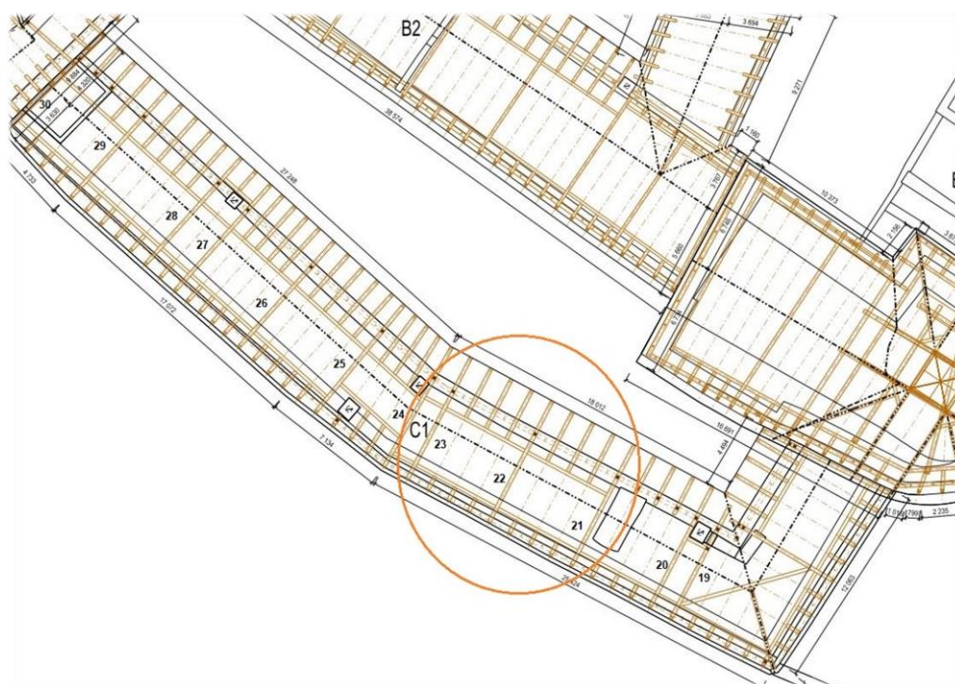
6.1 Geometrie krovu

Krov zastřešující část hradu označenou C1 můžeme řadit do hambalkové soustavy. Dle tvarového dělení se jedná o sedlovou střechu.



Obr. č. 66 Umístění zkoumané části krovu v kontextu stavby. Zdroj: Paprčka Milan - Slovensko z neba - letecký záber - Krásnohorské Podhradie - hrad Krásna Hôrka (2012)

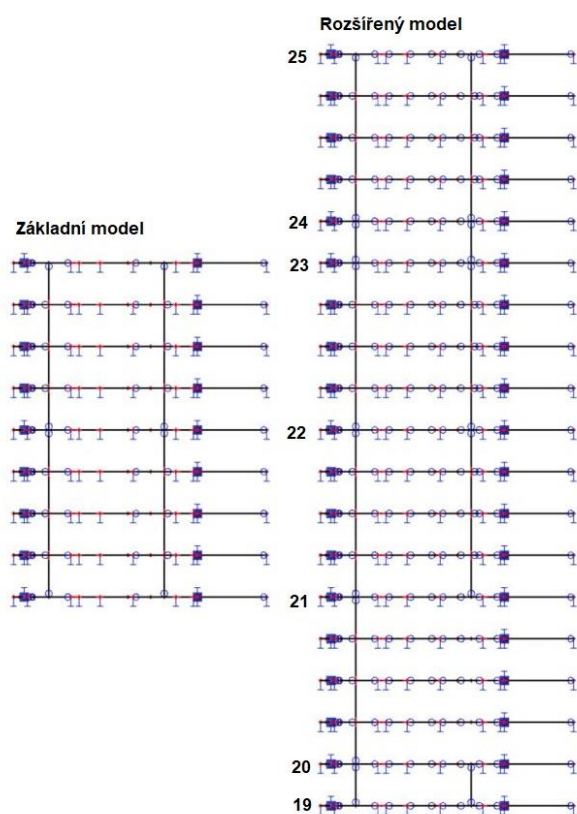
Pro model konstrukce byla zvolena pravidelná část krovu C1 mezi plnými vazbami 21 – 23 včetně. Zkoumané budou plná vazba 22 a dále prostřední jalová vazba a výměny mezi vazbami 22 a 23. Díky symetrii konstrukce podle roviny XZ předpokládáme i symetrii výsledků ve vazbách.



Obr. č. 67 Zkoumaná část krovu – výkres půdorysu

Vyjmutí části krovu z kontextu konstrukce nemá vliv na výsledky ve zkoumaných vazbách. Teoreticky by ve výpočtu mělo být zohledněno zatížení vazného trámu vazby 23 od výměn mezi vazbami 23 a 24 a vazného trámu vazby 21 od výměny mezi vazbami 20 a 21 osamělými silami v místě napojení výměn na vazný trám. Dodatečné zatížení zvyšuje deformaci vazných trámů 21 a 23, která ovlivňuje výměny mezi nimi a tím i vazný trám 22. Přípustné deformace vazných trámů 21 a 23 (a 22) jsou ale tak malé, že můžeme předpokládat, že při správném návrhu konstrukce bude jejich vliv na konstrukční prvky mezi vazbami 21 a 23 minimální až nulový. Byl proveden výpočet modelů konstrukcí, kdy byly modely zjednodušeně rozšířeny o vazby 19 – 21 a 23 – 25.

Zjednodušení spočívalo v tom, že byly modely pouze rozšířeny o zkopírované vazby tak, aby odpovídal počet a pořadí plných a jalových vazeb a jejich skladba, ale nepravidelnost v geometrii vazeb nebo v jejich vzájemných polohách nebyla brána v úvahu. Pro simulaci spolupůsobení větší části konstrukce a vyvození závěrů ohledně vlivu na rozložení reakcí a vnitřních sil by tento postup měl poskytnout dostatečně vypovídající výsledky, ačkoliv opět chybí zatížení okrajových vazeb od navazujících konstrukcí.



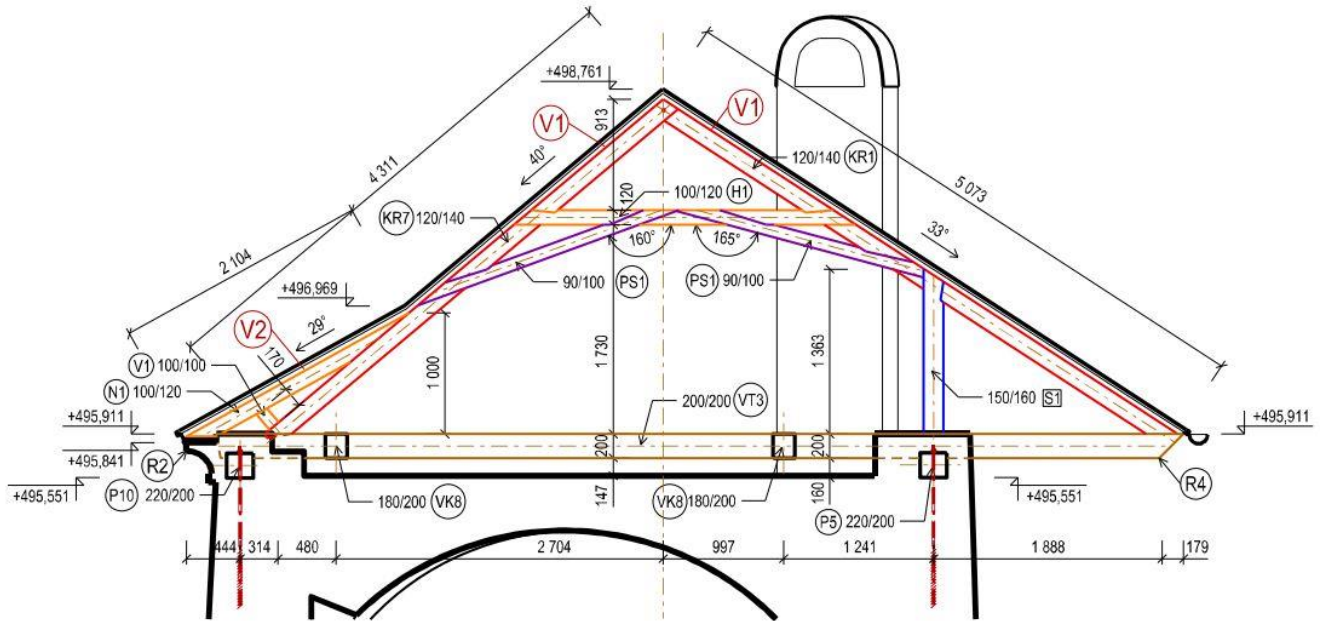
Obr. č. 68 Základní a rozšířený model konstrukce

Rozdíly v reakcích i vnitřních silách ve vazbách 22 – 23 včetně byly mezi základním (vazby 21 – 23 včetně) a rozšířeným (vazby 19 – 25 včetně) modelem velmi nepatrné (setiny kN nebo kN.m) z důvodu bezprostřední blízkosti plných vazeb 23 a 24 – vazný trám vazby 23 není od výměn směrem od vazby 24, které zde neplní svou základní funkci nesení krátčat a pouze spojují dvě plné vazby, téměř zatěžován, proto lze model za vazbou 23 ukončit.

Ve vazbě 21 se absence navazující konstrukce projevuje pouze na velikosti vnitřních sil ve vazném trámu a velikosti reakcí v podporách v této vazbě, kde v základním modelu chybí zatížení od výměn navazující konstrukce, ale reakce a vnitřní síly v jalových vazbách mezi 21 a 22 jsou opět ovlivněny zanedbatelně (setiny kN nebo kN.m).

6.1.1 Řez

Jednotlivé vazby krovu se skládají ze stejných prvků, pouze příčné vázání ve spodním roštu se liší dle plné nebo prázdné vazby. V horní části krovu nejsou žádné podélné prvky (vaznice, apod.). Průřez krovu není symetrický podle svislé osy, liší se sklon rovin střechy, poloha krokví vzhledem k pozednici a sloup, který je umístěný pouze na jedné straně. Prvky jsou z jehličnatého dřeva třídy C24.



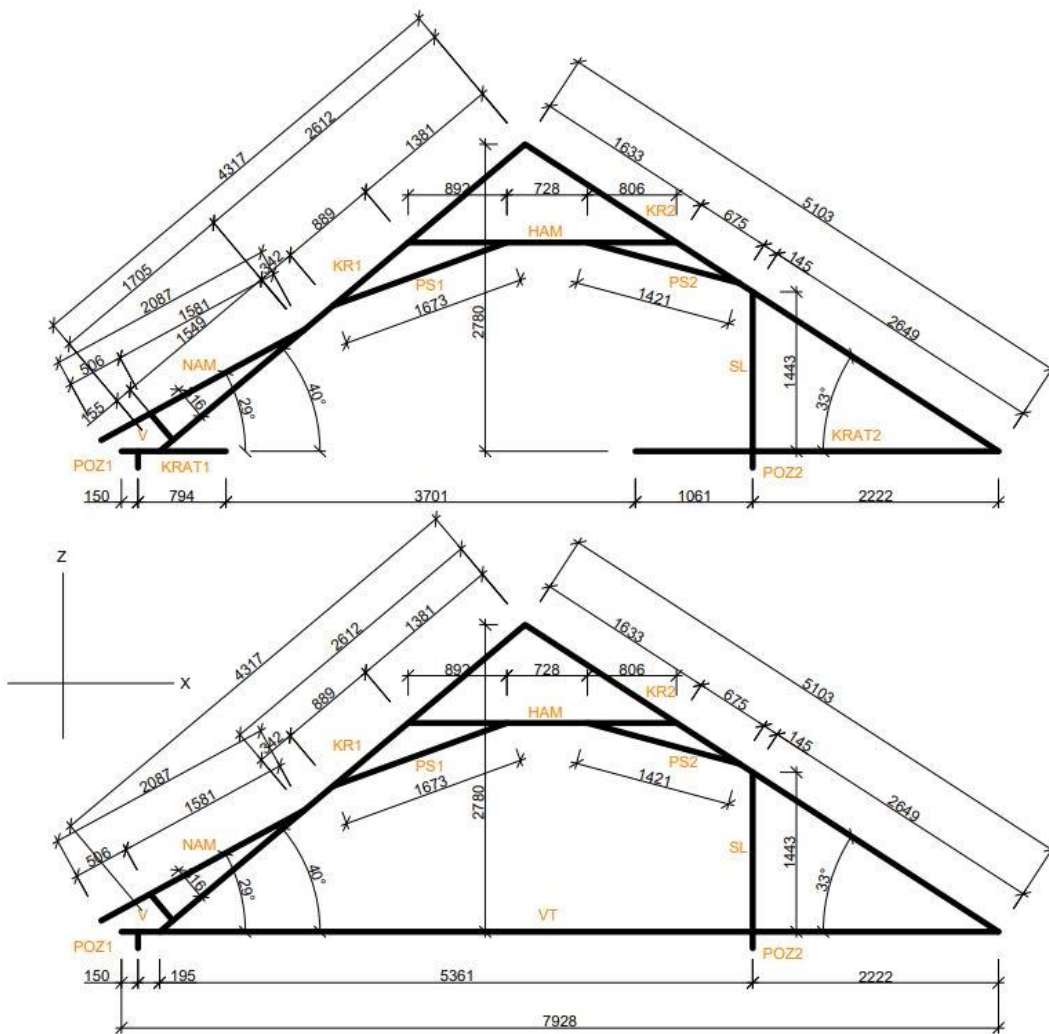
Obr. č. 69 Plná vazba č. 24 - ukázka reálného spojování prvků a uložení v podporách

Základem trojúhelníkového průřezu sedlové střechy, na kterou působí zatížení, jsou krokve. Ty jsou navzájem spojené na ostřích a začepované do vazných trámů v plné vazbě nebo do krátčat v jalové vazbě. Navzájem jsou v cca 2/3 výšky trojúhelníku spojené posuvným hambalkem, který je ke krokví připlátován na rybinu. K dodatečnému vyztužení tvaru „A“ slouží vzpěrné pásky rybinově plátované k hambalku a krokví. Krokve jsou v pravé části, kde krov tvoří přesah střechy přes stěnu, podepřeny svislým sloupem, který je ke krokvi zajištěn kolíkem a do vazného trámu je začepován nad osou pozednice. Zalomenou střešní rovinu na druhé straně tvoří námětek, který je ke krokvi lípnutý a ve spodní části podepřený vzpěrkou začepovanou do námětku a do krokve.

Pro lepší orientaci budou označeny strany krovu na *levou* (JZ rovina střechy) a *pravou* (SV rovina střechy) z pohledu v kladném směru osy Y.

| konstrukční prvek | označení | rozměry b/h [mm] | třída pevnosti |
|-------------------|-------------|------------------|----------------|
| krokve | KR1 (levá) | 120/140 | C24 |
| | KR2 (pravá) | 120/140 | C24 |
| hambalek | HAM | 100/120 | C24 |
| pásky | PS1 (levý) | 90/100 | C24 |
| | PS2 (pravý) | 90/100 | C24 |
| sloup | SL (vpravo) | 160/150 | C24 |
| námětek | NAM (vlevo) | 100/120 | C24 |
| vzpěrka | V (vlevo) | 100/100 | C24 |

Tab. č. 1 Výčet prvků horní části krovu



Obr. č. 70 Geometrie prázdné (nahore) a plné (dole) vazby

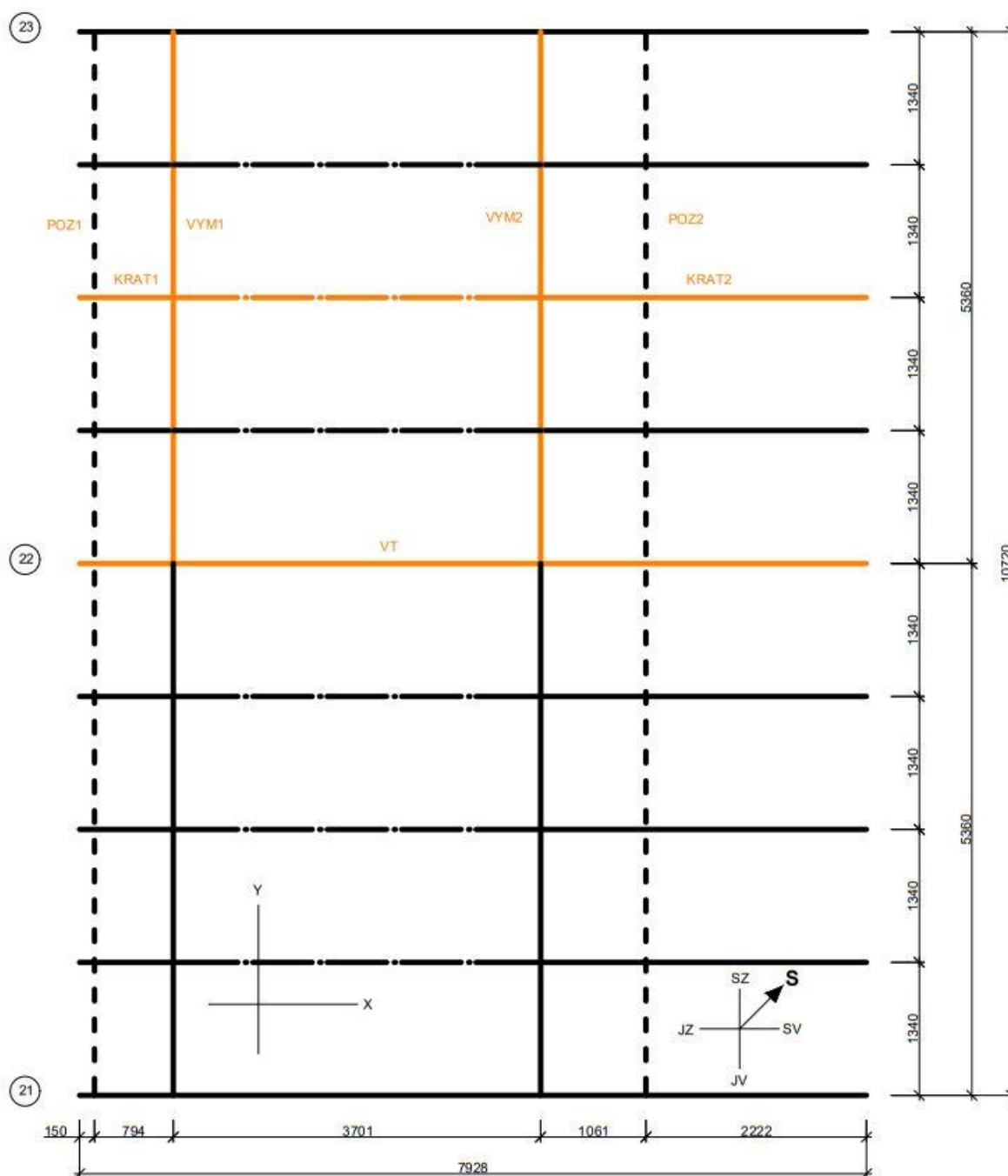
6.1.2 Půdorys

Spodní rošt konstrukce tvoří pozednice, vazné trámy, krátkata a výměny z dubového dřeva.

Krokve přenáší zatížení do vazných trámů nebo krátkat. Krátkata jsou začepována do výměn, které jsou začepovány do vazných trámů plných vazeb. Takto jsou do vazných trámů plných vazeb přeneseny z vazeb prázdných síly od momentů vznikajících okolo osy pozednice a zároveň vzniká volný prostor. Vazné trámy v plných vazbách nebo krátkata ve vazbách jalových (prázdných) jsou kamповány na pozednice. Pozednice jsou položeny na podélných obvodových stěnách a mezi vaznými trámy nebo krátkaty jsou zadrženy.

| konstrukční prvek | označení | rozměry b/h [mm] | třída pevnosti |
|-------------------|---------------|------------------|----------------|
| pozednice | POZ1 (levá) | 220/200 | D40 |
| | POZ2 (pravá) | 220/200 | D40 |
| vazný trám | VT | 200/200 | D40 |
| krátkata | KRAT1 (levé) | 200/200 | D40 |
| | KRAT2 (pravé) | 200/200 | D40 |
| výměny | VYM1 (levá) | 180/200 | D40 |
| | VYM2 (pravá) | 180/200 | D40 |

Tab. č. 2 Výčet prvků spodního roštu



Obr. č. 71 Geometrie půdorysu s vyznačenými zkoumanými vazbami a prvky

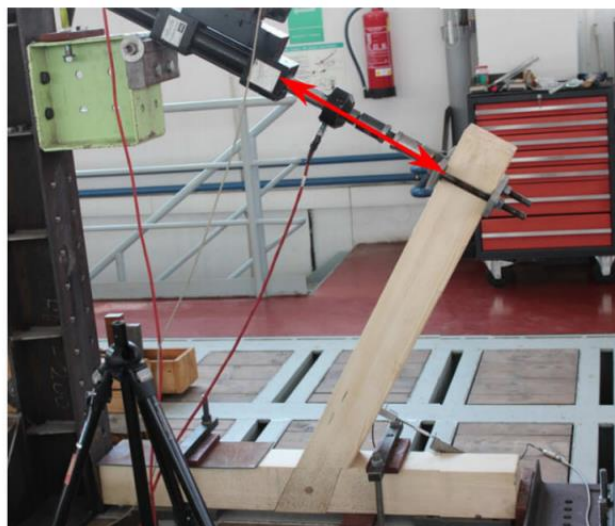
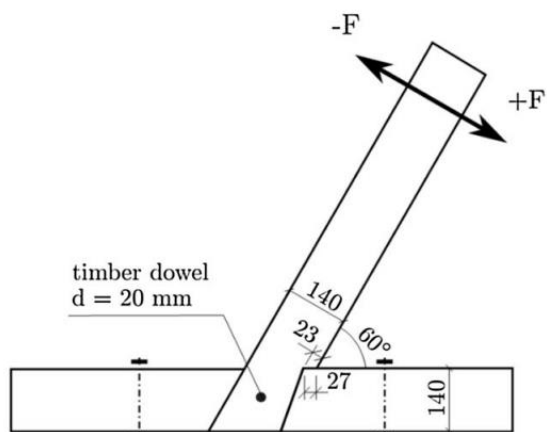
6.2 Modely konstrukce

Při statickém návrhu a posouzení stavební konstrukce, i když je proveden za pomoci statického výpočetního softwaru, je nejobtížnější na začátku stanovit správný statický model konstrukce a statické působení nosného systému. Přesný výpočetní model, který by vystihoval skutečné chování konstrukce, není možné v běžné praxi obvykle stanovit. Úkolem statické analýzy je tedy nalézt idealizovaný výpočetní model, který co nejlépe vystihuje chování skutečné konstrukce. U určitých typů konstrukce není nalezení idealizovaného výpočetního modelu velkým problémem, zejména pokud se jedná o staticky určitou konstrukci. U krovů, které jsou téměř vždy staticky neurčité, je však častým problémem určit tento idealizovaný výpočetní model.^[17]

Tato práce se bude zabývat zjednodušeným výpočtem extrémních modelů konstrukcí s pružnými prvky, ale nekonečně tuhými/volnými spoji. Při výpočtu vnitřních sil na staticky neurčité konstrukci musíme již na začátku výpočtu znát (nebo odhadnout) geometrii konečně tuhých prvků a modul pružnosti materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, pro výpočet vnitřních sil na idealizované konstrukci. Spoje a podpory můžeme zjednodušeně modelovat jako nekonečně tuhé nebo volné. Ve skutečnosti však spoje v krovu (včetně uložení) nemusí být dokonale tuhé a nemohou být dokonale volné v příslušných směrech. Při uvážení pružnosti materiálu ve spojích a podporách dochází k rozdílnému rozložení vnitřních sil v konstrukci než u modelů s dokonale tuhými a volnými spoji, kdy v modelech konstrukcí s pružnými spoji obvykle vznikají menší síly a momenty. Při pružné deformaci spoje se napětí absorbuje deformací materiálu. V pružném stavu se materiál deformuje elasticky, což znamená, že se po skončení působení zatížení vrátí do své původní polohy bez trvalé deformace. Při tomto procesu dochází k přeměně mechanické energie na energii pružnosti materiálu. Pokud tedy dojde k určité deformaci, napětí se zmenší, což může vést k menším silám v konstrukci. Pokud se tedy uváží pružnost dřeva a jeho schopnost absorbovat napětí při pružné deformaci ve spojích a podporách, je možné navrhnout materiálově úspornější konstrukci.

Pružné modelování spoje nebo podpory je však náročnější než modelování konstrukcí s dokonale tuhými spoji a podporami z důvodu obtížného stanovování jejich pružnosti. Analyticky lze celkovou tuhost spoje získat rozložením jednotlivých částí spoje na dílčí komponenty, které jsou nahrazeny pružinami a popsány odpovídajícími tuhostmi v příslušných směrech. Zároveň je třeba stanovit účinné kontaktní plochy ve spoji pro získání maximální zatěžovací síly. Poté je možné stanovit maximální přípustný posun daného spoje pro porovnání s výsledky výpočtu modelu. Spoj lze analyzovat také numericky. Je třeba vytvořit trojrozměrný model v konečně-prvkovém výpočetním programu, popsat materiálové vlastnosti dřeva (lze zadat pružno-plastický ortotropní model materiálu nebo jakýkoliv model materiálových nelinearit včetně vlivu vlhkosti), zvolit kvalitu konečně-prvkové sítě a zadat okrajové podmínky numerického modelu, tedy způsob podepření a namáhání spoje.

Problematikou pružného modelování rybinově plátovaných spojů se podrobně zabývá studie od Kuneckého a kol. „Vliv mechanických vlastností rybinového spoje na celkovou tuhost dřevěných střešních konstrukcí“, jejímž výsledkem je závěr, že tahová únosnost těchto spojů je velká, zatímco momentová únosnost těchto spojů je tak malá, že jejich podrobná analýza tuhosti v ohybu je zbytečná a spoje lze v konstrukci modelovat jako tuhé klouby^[26]. Ve studii byly provedeny experimentální zkoušky oboustranných rybinových plátování s různou geometrií a přesností provedení na tahovou tuhost a pevnost a zkoušky jednostranných rybinových plátování na ohybovou tuhost a pevnost. Oba spojované prvky mají průřez 140x140 mm a svírají vzájemně úhel 60°, síla je aplikována na rameni o délce 1 m. Výsledná průměrná ohybová tuhost spoje od záporné síly je 0,133 MNm/rad a od kladné síly 0,04 MNm/rad. Tyto výsledky nelze přímo aplikovat na rybinově plátované spoje ve zkoumaném krovu, protože prvky v krovu mají menší průřezy (KR 120x140 mm, HAM 100x120 mm, PS 90x100 mm) a svírají menší úhly (HAM/KR1 40,1°, HAM/KR2 33°, PS1/KR1 20,1°, PS1/HAM 20°, PS2/KR2 18°, PS2/HAM 15°). Přesto lze na základě výsledků experimentu s masivnějšími prvky předpokládat, že ohybová tuhost spojů v krovu hradu Krásná Hôrka bude ještě menší.



Obr. č. 72 Nastavení experimentu pro zjištění ohybové tuhosti jednostranného rybinového přeplátování. Výsledky: průměrná ohybová tuhost od záporné síly je 0,133 MNm/rad a od kladné síly 0,04 MNm/rad. Zdroj: [26]

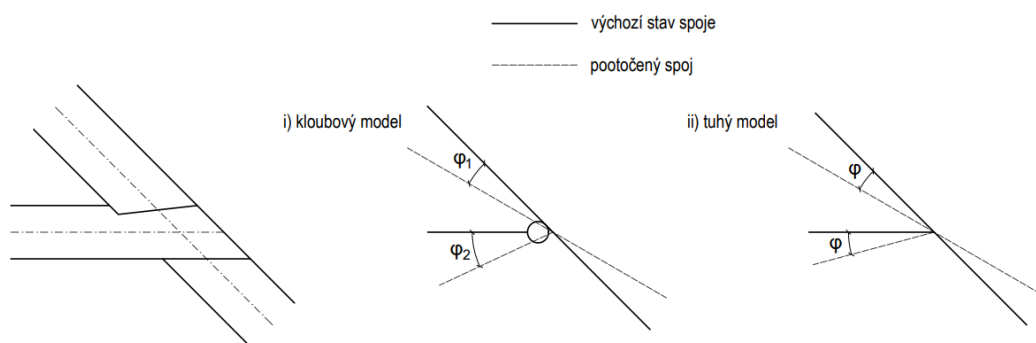
Studie [26] se tedy zabývá analýzou tuhosti v ohybu jednostranného nekrytého rybinového plátu, který je pak aplikován v konstrukci, na které je ukázáno, že rozdíl v celkové deformaci konstrukce je malý při modelování spojů jako dokonale kloubových nebo dokonale vetknutých. Nejsou ale uvedeny rozdíly v průběhu vnitřních sil na jednotlivých prvcích ani podrobnější analýza posunů jednotlivých spojů. To bude úkolem této práce. Účelem je zhodnocení, zda má smysl zabývat se detailní analýzou složitěji profilovaných rybinových spojů, jejichž potenciál přenosu ohybového momentu může být větší. Proto budou zhodnoceny extrémní modely rybinově plátovaných spojů jako kloubových nebo vetknutých.

Ve zkoumaném krovu se nacházejí navzájem spojené pouze souběžné prutové prvky, žádné mimoběžné, jako to bývá například při osedlání krokve na vaznici ve vaznicovém krovu. Dle literatury lze všechna spojení popsaná v geometrii zkoumaného krovu modelovat jako kloubová, prvkům je tedy zamezeno ve vzájemném posunu, ale je umožněno vzájemné pootočení kolem os kolmých na osy prvků.^[10] Práce se bude zabývat potenciálním vlivem kloubového a tuhého modelování rybinových plátování na globální chování konstrukce.

Úkolem této práce je stanovit rozdíl v rozložení vnitřních sil při:

- i) kloubovém – u_x tuhý, u_y tuhý, u_z tuhý, ϕ_x tuhý, ϕ_y volný, ϕ_z volný,
- ii) tuhém – u_x tuhý, u_y tuhý, u_z tuhý, ϕ_x tuhý, ϕ_y tuhý, ϕ_z volný

modelu rybinově plátovaných spojů.

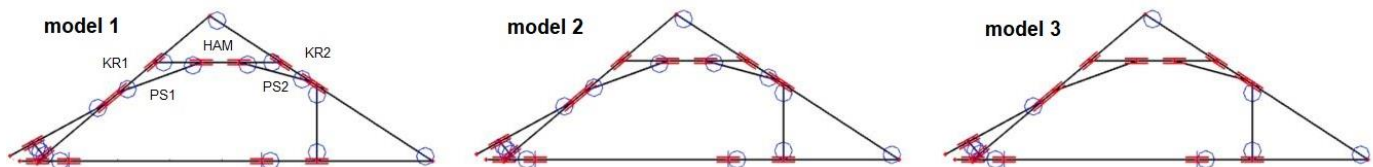


Obr. č. 73 Rozdíl ve vzájemném pootočení prvků v kloubovém a tuhém modelu spoje

Toto spojení je realizováno mezi hambalkem a krokvi (HAM/KR1, HAM/KR2) a dále mezi pásky a hambalkem a krokvi (PS1/KR1, PS1/HAM, PS2/KR2, PS2/HAM). Podepření sloupem je uvažováno jako kloubové. Pro zjištění rozdílů ve vnitřních silách mezi extrémy <kloubová spojení; tuhá spojení> budou vytvořeny tři modely:

1. všechna spojení prvků krovu jsou kloubová,
2. spojení HAM/KR1 a HAM/KR2 jsou tuhá, ostatní spojení prvků jsou kloubová,
3. spojení HAM/KR1, HAM/KR2, PS1/KR1, PS1/HAM, PS2/KR2 a PS2/HAM jsou tuhá, ostatní kloubová.

První model odpovídá užívaným postupům dle literatury. Druhý a třetí model slouží pro zjištění potenciálního vlivu rybinových přeplátování modelovaných jako tuhé spoje na rozložení vnitřních sil v konstrukci. Rozdělení do dvou modelů je zvoleno kvůli tomu, že hambalek je hlavním ztužujícím prvkem vazby a svírá s krokvi větší úhly, zatímco pásky jsou pouze prvky podpůrnými a svírají s krokvi a hambalky malé úhly. Zajímavé je tedy hlavně sledování vlivu spojení hambalku s krokvi, ale zároveň je dobré prozkoumat vliv modelování všech rybinově plátovaných spojení jako tuhých spojů.



Obr. č. 74 Modely spojování prvků

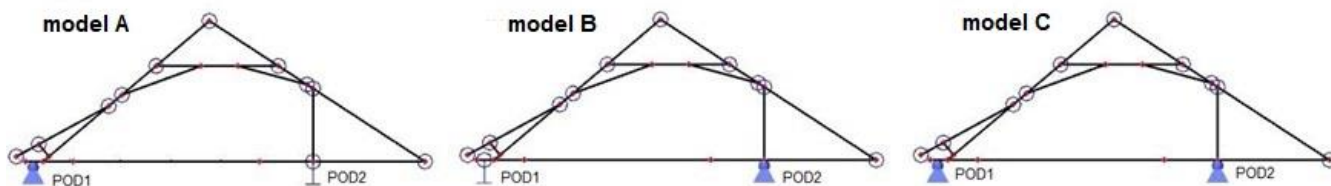
Určení výpočetního modelu krovu je dále problematické vzhledem k vodorovnému podepření krovu proti vodorovnému posunu. Krov přenáší vodorovné síly na pozednici v místě kámpování vazných trámů nebo krátkat přes pozednici, vodorovným silám tedy musí vzdorovat svíslá plocha horního kámpovaného dřeva (vazný trám nebo krátkce) ve směru vláken a odpovídající svíslá plocha dolního kámpovaného dřeva (pozednice) kolmo na vlákna. Vodorovné síly dále působí na plochu mezi pozednicí a zdivem, na kterém je položena, a mohou vyvolat posun pozednice po zdivu, kde jim v případě absence kotvení vzdoruje pouze třecí síla mezi pozednicí a zdivem. Nakonec je třeba pamatovat na pevnost spodního zdiva v ohybu na momenty vyvolané zmíněnými vodorovnými silami.

Obě podpory jsou konstrukčně řešeny identicky, proto se může zdát zbytečné řešit v rámci jednoho modelu podpory s různou tuhostí v příčném směru. Kámpování zajišťuje stejnou tuhost v obou směrech namáhání, a tudíž optimálním řešením by bylo nalézt pružnost obou podpor v příčném směru, aby byly splněny všechny požadavky na výsledné chování konstrukce. Hledání této přípustné pružnosti a posouzení předmětného spoje (podpory) ale může být velmi náročné, jak bylo zmíněno výše. Úplným uvolněním jedné podpory, zatímco druhá zůstává dokonale tuhá, zjednodušeně získáváme informace o tom, co se děje v prvcích krovu, pokud je v uložení umožněn nějaký příčný posun.

Pro vyšetření vnitřních sil a posunů v krovu bude ještě každý z modelů spojů proveden:

- A) ve variantě pro neposuvnou levou (X tuhý, Y tuhý, Z tuhý, R_x volný, R_y volný, R_z volný) a posuvnou pravou (X volný, Y tuhý, Z tuhý, R_x volný, R_y volný, R_z volný) podporu a
- B) ve variantě opačné a
- C) ve variantě pro obě neposuvné podpory.

Ve všech modelech je konstrukce podepřena ve směru Y jednosměrnými podporami kvůli zajištění stability modelu. V konstrukci vznikají v tomto směru nepatrné síly (v řádu desítek N) v důsledku deformace výměn (průhyb výměn způsobuje kroucení krátčat, do kterých jsou čepované krokve a sloup a jalové vazby se „klopí“). Konstrukce je ve směru Y zatížena také třecími účinky větru v podélném směru. Výpočet tření větru a návrh zavětrování není předmětem této práce. Posouzení zavětrování a celkové stability konstrukce je neméně důležité, ale pro účely zkoumání chování vybraných vnitřních spojů a posouzení hlavních nesených a nesoucích prvků není tak podstatné. K přenesení podélných sil poslouží laťování vhodně připojené na krokve rovnoběžně s pozednicí a případně zavětrování v podobě diagonál upevněných mezi krokve (navržené dle stabilitního výpočtu).



Obr. č. 75 Modely podepření

| model rybinového přeplátování | podpory | označení modelu |
|--|---|-----------------|
| všechny spoje klouby | POD1 (levá) neposuvná, POD2 (pravá) posuvná | model 1A |
| | POD1 (levá) posuvná, POD2 (pravá) neposuvná | model 1B |
| | obě podpory neposuvné | model 1C |
| HAM/KR tuhý spoj, zbytek klouby | POD1 (levá) neposuvná, POD2 (pravá) posuvná | model 2A |
| | POD1 (levá) posuvná, POD2 (pravá) neposuvná | model 2B |
| | obě podpory neposuvné | model 2C |
| HAM/KR, KR/PS/HAM a SL/KR tuhý spoj, zbytek klouby | POD1 (levá) neposuvná, POD2 (pravá) posuvná | model 3A |
| | POD1 (levá) posuvná, POD2 (pravá) neposuvná | model 3B |
| | obě podpory neposuvné | model 3C |

Tab. č. 3 Modely konstrukce

6.3 Zatížení

Konstrukce krovu bude posuzována metodou navrhování podle mezních stavů uvedenou v Eurokódu, konkrétně bude posuzován pouze mezní stav únosnosti vztahený k trvalé návrhové situaci.^[11, 12, 13, 14]

Posuzování mezních stavů pro dočasnou, mimořádnou nebo seizmickou návrhovou situaci není předmětem této práce.

Vnější zatížení je spočteno jako plošné pro rovinu střechy a následně přepočteno na jednotlivé vazby dle vzájemné vzdálenosti vazeb.

6.3.1 Zatěžovací stavy

Zatěžovací stav je množina jednotlivých zatížení na jednotlivých dílcích a styčnicích, která k sobě logicky patří a jsou vzájemně neoddělitelná, tedy působí na konstrukci vždy dohromady. Na předmětnou konstrukci budou uvažovány dva typy zatěžovacích stavů – silový a vlastní tíha. Deformační zatížení, oteplení nebo změna vlhkosti uvažovány nejsou.

Jako stálá zatížení jsou uvažovány vlastní tíha a střešní krytina, proměnnými zatíženími jsou sníh a vítr se statickými účinky. Užité zatížení střechy není uvažováno.

6.3.1.1 Vlastní tíha

Jedná se o stálé zatížení. Vlastní tíhu konstrukce spočítá program Scia Engineer na základě údajů o geometrii a objemové hmotnosti prvku.

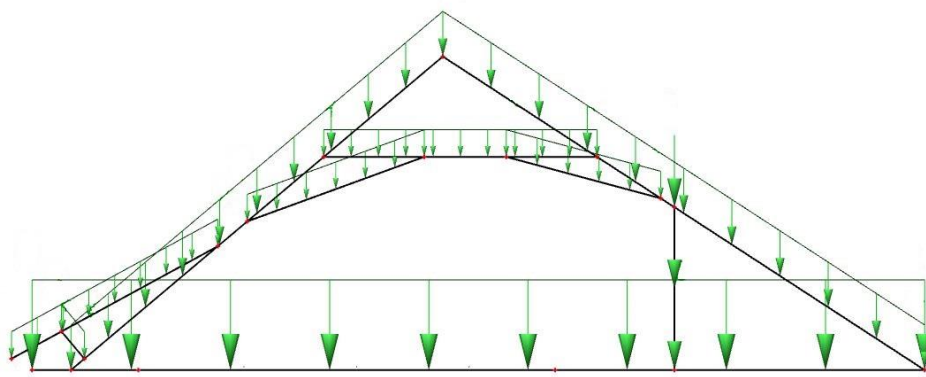
vlastní tíha vztažená k ose prvku

$$g_k = \rho_{\text{mean}} * b * h * g \quad [\text{N.m}^{-1}]$$

ρ_{mean} = stř. hodnota objem. tíhy; b a h = rozměry průřezu prvku
g = gravitační zrychlení

| třída pevnosti | ρ_{mean} [kg.m ⁻³] |
|----------------|--|
| C24 | 420 |
| D40 | 660 |

Tab. č. 4 Střední hodnoty objemové hmotnosti použitého dřeva



Obr. č. 76 ZS1 - Vlastní tíha (ilustrace působení zatížení)

6.3.1.2 Střešní krytina

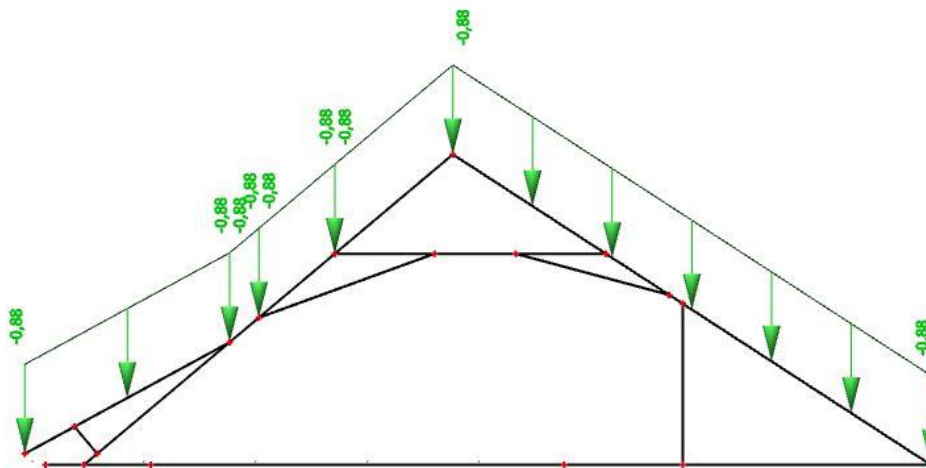
Jedná se o stálé zatížení. Krytinu tvoří bobrovka položená na laťování, které je upevněno ke krokům.

střešní krytina bobrovka + laťování

R = 1,34 [m] osová vzdálenost vazeb

g_k = 660 [N.m⁻²]

g_k = 884,4 [N.m⁻¹] $g_k * R$



Obr. č. 77 ZS2 - Střešní krytina

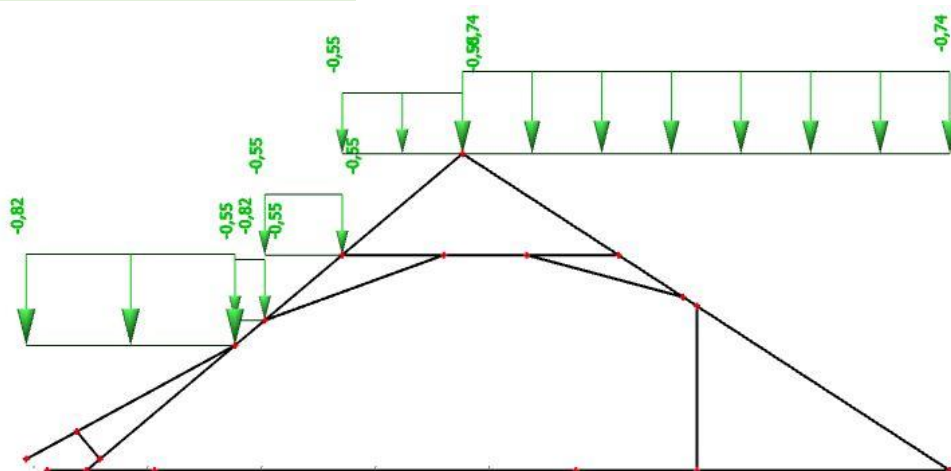
6.3.1.3 Sníh

Sníh je proměnné zatížení se střednědobým působením. Charakteristická hodnota zatížení sněhem na povrchu země s_k byla zvolena dle software Dlubal, který disponuje podrobnou sněhovou mapou České a Slovenské republiky. Charakteristické zatížení sněhem je spočteno pro všechny tři sklony střechy. Je brán v úvahu pouze zatěžovací stav plným zatížením nenavátým sněhem. Odvátí sněhu se zanedbává, přivátí sněhu se vzhledem k poloze nepředpokládá – sníh by mohl přivát pouze z okolních střech.

Pro $s_k \geq 1\,500\text{ N.m}^{-2}$ se má uvážit sníh převislý přes okraj střechy, což není případ této stavby.

sníh

| | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|---|
| R | 1,34 [m] | osová vzdálenost vazeb |
| s_k | 954 [N.m ⁻²] | mapa SW Dlubal ; dle STN EN 1991-1-3 (2004) $s_k = 1050\text{ N.m}^{-2}$ |
| C_e | 0,8 [-] | střecha se nachází v otevřené krajině |
| C_t | 1 [-] | prostup tepla z interiéru stavby nemá vliv na odtání sněhu |
| <i>rovina střechy 40° (levá)</i> | | |
| $\alpha(40)$ | 40 [°] | |
| $\mu_1(40)$ | 0,53 [-] | $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ \rightarrow 0,8*(60-\alpha)/30$; není bráněno sesuvu sněhu |
| $s(40)$ | 407 [N.m ⁻²] | $\mu_1 * C_e * C_t * s_k$ |
| $s(40)$ | 545 [N.m⁻²] | *R |
| <i>rovina střechy 33° (pravá)</i> | | |
| $\alpha(33)$ | 33 [°] | |
| $\mu_1(33)$ | 0,72 [-] | $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ \rightarrow 0,8*(60-\alpha)/30$; není bráněno sesuvu sněhu |
| $s(33)$ | 550 [N.m ⁻²] | $\mu_1 * C_e * C_t * s_k$ |
| $s(33)$ | 736 [N.m⁻²] | *R |
| <i>rovina střechy 29° - námětek</i> | | |
| $\alpha(29)$ | 29 [°] | |
| $\mu_1(29)$ | 0,80 [-] | $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$; není bráněno sesuvu sněhu |
| $s(29)$ | 611 [N.m ⁻²] | $\mu_1 * C_e * C_t * s_k$ |
| $s(29)$ | 818 [N.m⁻²] | *R |



Obr. č. 78 Z53 - Sníh

6.3.1.4 Vítr

Vítr představuje proměnné zatížení s krátkodobým působením. Hrad se nachází na osamělém kopci, což je třeba vzít v úvahu kvůli vyššímu zatížení větrem. Krov je z levé strany přímo exponovaný do krajiny, z pravé strany je chráněný vyššími částmi hradu. Stínění je bráno v úvahu při posuzování, jakým způsobem bude vítr působit na střešní přesah, který je orientovaný do nádvoří hradu směrem k vyšším budovám. Díky stínění můžeme vztlak na spodní rovinu přesahu zanedbat. Stínění není uvažováno při výpočtu tlaku větru na krytou střešní rovinu.

vítr

| | | |
|--------------|----------------------------|--|
| $v_{b,0}$ | 26,00 [m.s ⁻¹] | výchozí základní rychlost větru pro oblast II, 485 m.n.m. |
| C_{dir} | 1,00 [-] | součinitel směru větru - doporučená hodnota |
| C_{season} | 1,00 [-] | součinitel ročního období - doporučená hodnota |
| v_b | 26,00 [m.s ⁻¹] | základní rychlost větru: $v_{b,0} * C_{dir} * C_{season}$ |
| z_0 | 0,01 [m] | délka nerovnosti, parametr drsnosti terénu: kategorie I |
| z_{min} | 1,00 [m] | $z_{max} = 200$ m: kategorie I |
| $z = h$ | 117,00 [m] | nejsilnější vítr = výška budovy + výška osamělého kopce |
| $z_{0,II}$ | 0,05 [m] | parametr drsnosti terénu pro kat. II |
| k_r | 0,17 [-] | součinitel terénu: $0,19 * (z_0/z_{0,II})^{0,07}$ |
| $c_0(z)$ | 1,00 [-] | součinitel orografie - doporučená hodnota |
| $c_r(z)$ | 1,59 [-] | součinitel drsnosti terénu: $k_r * \ln(z/z_0)$ |
| $v_m(z)$ | 41,34 [m.s ⁻¹] | střední rychlost větru: $c_{r(z)} * c_0(z) * v_b$ |
| ρ_a | 1,25 [kg.m ⁻³] | hustota vzduchu |
| k_1 | 1,00 [-] | součinitel turbulence - doporučená hodnota |
| σ_v | 4,41 [m.s ⁻¹] | směrodatná odchylka turbulentní složky rychlosti větru $k_r * v_b * k_1$ |
| $I_v(z)$ | 0,11 [-] | intenzita turbulence ve výšce z $\sigma_v/v_m(z)$ nebo $k_1/(c_0(z) * \ln(z/z_0))$ |
| q_b | 422,50 [Pa] | základní dynamický tlak větru $0,5 * \rho_a * v_b^2$ |
| $q_p(z)$ | 1866,69 [Pa] | maximální charakteristický tlak $[1+7 * I_v(z)] * 0,5 * \rho_a * v_m(z)^2$ |
| $c_e(z)$ | 4,42 [-] | součinitel expozice $q_p(z)/q_b$ |
| $w_{e,k}$ | $q_p(z) * c_{pe}$ [Pa] | viz tabulka pro konkrétní oblasti |

C_{pe} je součinitel vnějšího a vnitřního tlaku pro konkrétní oblast. Použity budou hodnoty $c_{pe,10}$, které slouží pro návrh celkové nosné konstrukce budovy. Hodnoty jsou interpolovány z normových hodnot dle sklonu střechy.

| oblast | vítr příčný - kolmý na delší rozměr budovy | | | | | | vítr podélný - kolmý na kratší rozměr budovy | | | | | |
|--------|---|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|---|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| | $C_{pe,10}$ (29°) | $w_{e,k}$ [Pa] | $C_{pe,10}$ (40°) | $w_{e,k}$ [Pa] | $C_{pe,10}$ (33°) | $w_{e,k}$ [Pa] | $C_{pe,10}$ (29°) | $w_{e,k}$ [Pa] | $C_{pe,10}$ (40°) | $w_{e,k}$ [Pa] | $C_{pe,10}$ (33°) | $w_{e,k}$ [Pa] |
| F | -0,53 | -983 | -0,17 | -311 | -0,40 | -747 | -1,11 | -2078 | -1,10 | -2053 | -1,10 | -2053 |
| | 0,67 | 1244 | 0,70 | 1307 | 0,70 | 1307 | | | | | | |
| G | -0,52 | -971 | -0,17 | -311 | -0,40 | -747 | -1,39 | -2601 | -1,40 | -2613 | -1,40 | -2613 |
| | 0,67 | 1244 | 0,70 | 1307 | 0,70 | 1307 | | | | | | |
| H | -0,21 | -386 | -0,07 | -124 | -0,16 | -299 | -0,79 | -1468 | -0,87 | -1618 | -0,82 | -1531 |
| | 0,39 | 722 | 0,53 | 996 | 0,44 | 821 | | | | | | |
| I | -0,40 | -747 | -0,27 | -498 | -0,36 | -672 | -0,50 | -933 | -0,50 | -933 | -0,50 | -933 |
| | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | | | | | | |
| J | -0,53 | -996 | -0,37 | -684 | -0,46 | -859 | | | | | | |
| | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | | | | | | |

Tab. č. 5 Zatížení větrem pro oblasti střechy F – J

Pro zatížení větrem lze uvažovat 10 zatěžovacích stavů; 8 pro vítr příčný – 4 případy, ve kterých jsou největší a nejmenší hodnoty z oblastí F, G a H kombinovány s největšími a nejmenšími hodnotami v oblastech I a J, krát 2 pro JZ (zleva) a SV (zprava) směr větru; a 2 pro vítr podélný – SZ a JV směr větru.

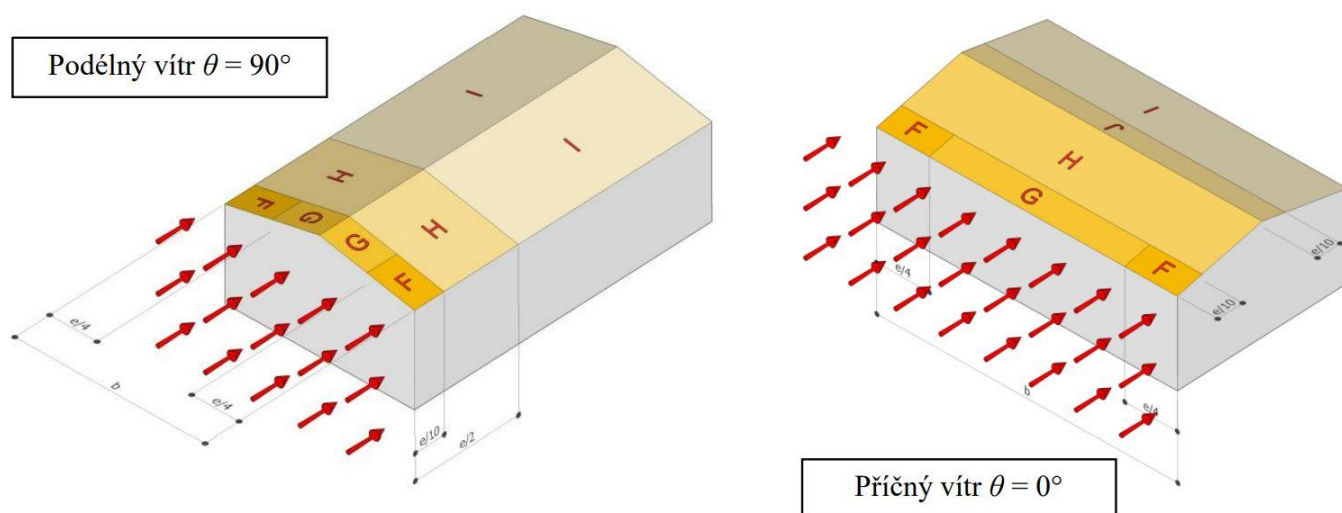
Z těchto možností jsou vybrány tři zatěžovací stavy, dva pro příčnou linii a jeden pro podélnou. U příčného větru budou uvažovány kombinace největších hodnot tlaku z oblastí F, G a H s největšími hodnotami tahu v oblastech I a J pro JZ a SV směr větru. U podélného větru nezáleží na směru z důvodu předpokládaného umístění zkoumané části v oblasti I. Varianta, kdy v důsledku příčného větru vzniká sání na všech rovinách střechy, je zohledněna v sacích účincích podélného větru, protože hodnoty zatížení jsou podobné.

Výsledky z tabulky výše jsou $N \cdot m^{-2}$ a je třeba je převést na liniové zatížení vynásobením osovou vzdáleností vazeb $R = 1,34$ m.

| zatěžovací stav | sklon | G | H | I | J |
|------------------------|-------|------|------|-------|-------|
| ZS4 - JZ vítr (zleva) | 29° | 1668 | - | - | - |
| | 40° | 1751 | 1334 | - | - |
| | 33° | - | - | -900 | -1151 |
| ZS5 - SV vítr (zprava) | 29° | - | - | -1001 | -1334 |
| | 40° | - | - | - | -917 |
| | 33° | 1751 | 1101 | - | - |
| ZS6 - SZ nebo JV vítr | 29° | - | - | -1251 | - |
| | 40° | - | - | -1251 | - |
| | 33° | - | - | -1251 | - |

Tab. č. 6 Výčet hodnot zatížení v zatěžovacích stavech od větru [$N \cdot m^{-2}$]

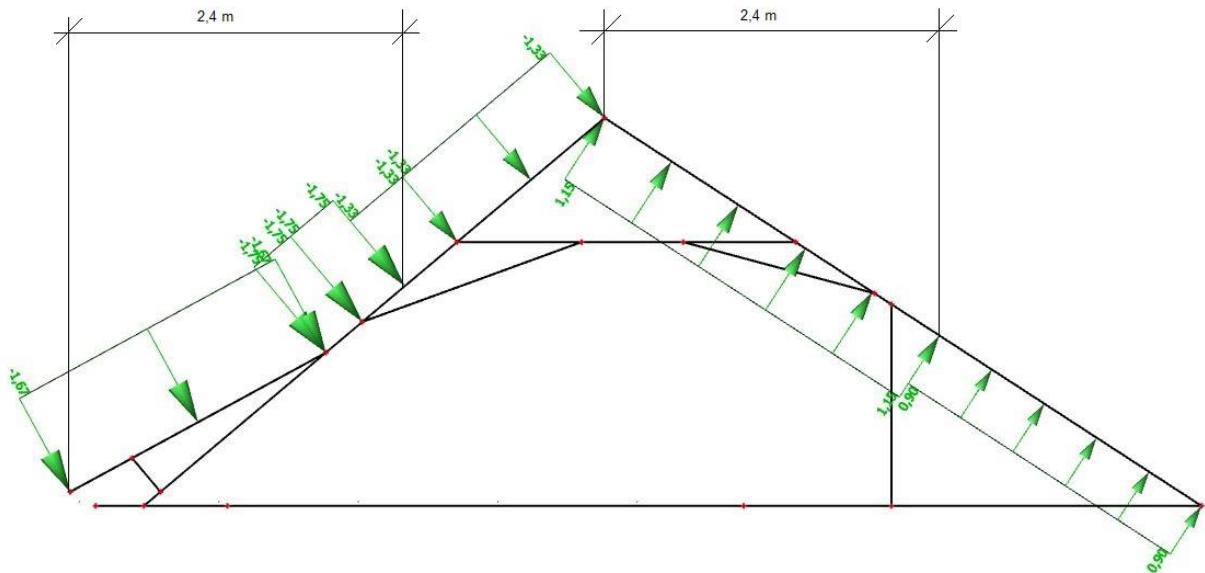
Dále je třeba určit velikost oblastí F – J. Kvůli středovému umístění výseku budovy nejsou pro podélný vítr uvažovány oblasti F, G a H (také by vyšlo velmi malé a tyto oblasti jsou pro celou střechu prakticky bezvýznamné), pro příčný vítr není uvažovaná oblast F.



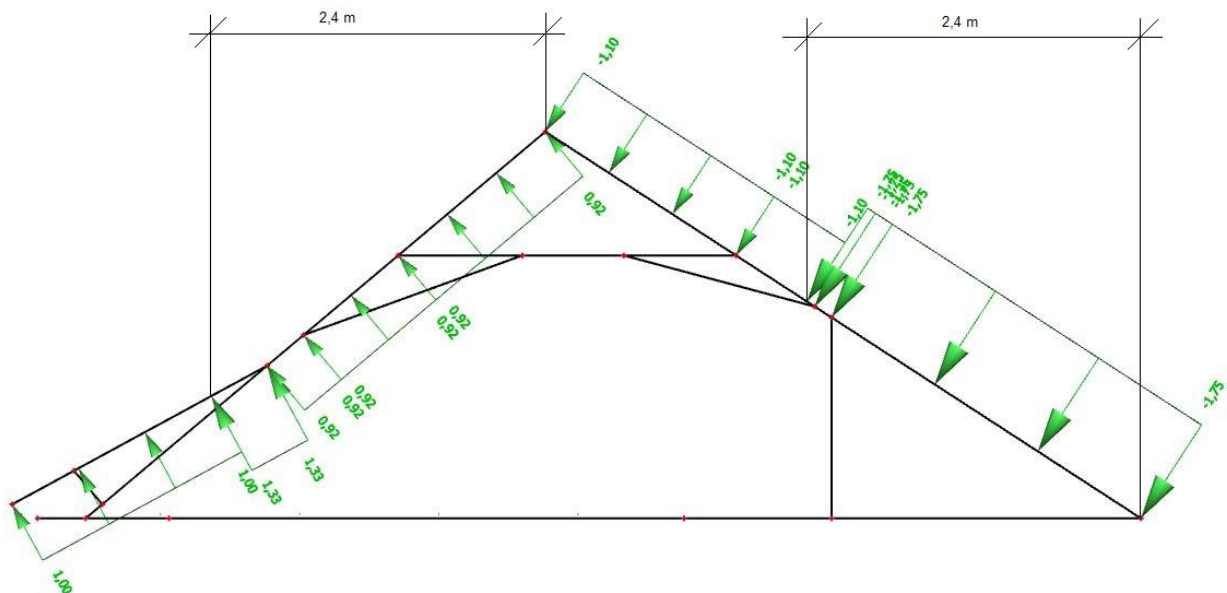
Obr. č. 79 Návod na rozdělení střechy včetně přečnávajících částí

Výpočet šířky oblastí pro příčný vítr

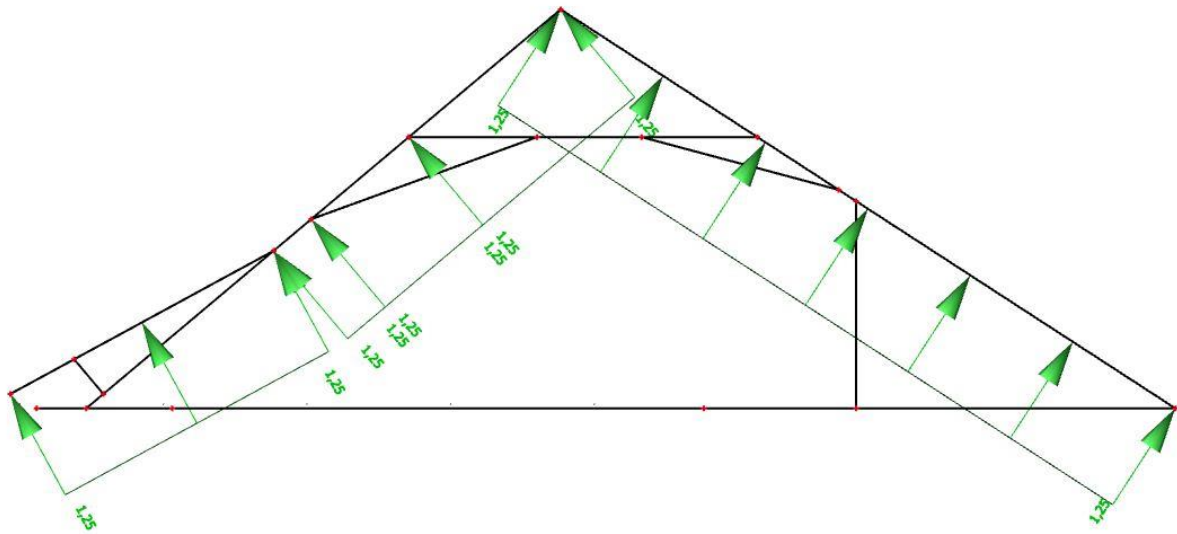
| | | |
|------|-----------|----------------------------|
| b | 54 [m] | délka traktu pod krovem C1 |
| h | 12,00 [m] | výška traktu se střechou |
| 2*h | 24,00 [m] | |
| e | 24,00 [m] | $e = \min(b; 2*h)$ |
| e/10 | 2,4 [m] | |



Obr. č. 80 ZS4 – Vítr příčný JZ (zleva; tlak na 29° a 40°, tah na 33°)



Obr. č. 81 ZS5 – Vítr příčný SV (zprava; tah na 29° a 40°, tlak na 33°)



Obr. č. 82 ZS6 - Vítr podélný SZ nebo JV směr

6.3.2 Kombinace

Konstrukce bude posuzována metodou dílčích součinitelů, která je založena na porovnání návrhové hodnoty maximálního účinku zatížení a návrhové (minimální) odolnosti konstrukce.

V předchozích kapitolách byly spočteny charakteristické hodnoty účinků stálých a proměnných zatížení. Aby se na přijatelnou míru snížila pravděpodobnost překročení mezního stavu únosnosti, tj. pravděpodobnost zřícení nebo porušení nosné konstrukce, užije se dvojího opatření:

1. do výpočtu se zavádějí vyšší (návrhové) hodnoty zatížení, než jsou maximální (charakteristické) hodnoty, které lze na základě zkušeností a statistického vyhodnocení očekávat a
2. pevnost materiálu (návrhová) se naopak snižuje – z garantovaných charakteristických hodnot.

Hlavní reprezentativní hodnotou zatížení pro výpočet mezního stavu únosnosti vztaženého k trvalé návrhové situaci je jeho charakteristická hodnota F_k a kombinační hodnota daná součinem $\psi_0 \cdot Q_k$. Pomocí kombinačního součinitele ψ_0 se vyjadřuje pravděpodobnost současného výskytu několika nezávislých proměnných zatížení.

Návrhová hodnota zatížení F_d se stanoví pomocí reprezentativní hodnoty zatížení F_{rep} , vynásobené dílčím součinitelem zatížení γ_F , vyjadřujícím možné nepříznivé odchylky hodnot zatížení od reprezentativní hodnoty, tedy

$$F_d = \gamma_F \cdot F_{rep}$$

Hodnoty dílčích součinitelů zatížení γ_F se přitom liší podle druhu mezního stavu, který je posuzován.

| označení | hodnota [-] |
|------------|-------------|
| γ_G | 1,35 |
| γ_Q | 1,5 |

Tab. č. 7 Hodnoty dílčích součinitelů γ_F pro MSÚ EQU/STR

Reprezentativní hodnota zatížení F_{rep} je vyjádřena charakteristickou hodnotou F_k vynásobenou součinitelem ψ , jehož hodnota je 1,0 nebo ψ_0 , ψ_1 , popř. ψ_2 . Platí tedy:

$$F_{rep} = \psi \cdot F_k$$

Součinitelem kombinace ψ se tedy vyjadřuje zmenšení pravděpodobnosti současného překročení

návrhových hodnot u několika zatížení, v porovnání s pravděpodobností překročení návrhové hodnoty u jediného zatížení působícího samostatně. U stálého zatížení se ψ neuvádí, $G_{rep} = G_k$.

| označení | hodnota [-] |
|--------------|-------------|
| $\psi_{0,s}$ | 0,5 |
| $\psi_{0,w}$ | 0,6 |

Tab. č. 8 Hodnoty kombinačních součinitelů ψ_0 pro MSÚ EQU/STR

Ke stanovení nejnepříznivějších účinků zatěžovacích stavů na konstrukci se využívá kombinačních vzorců uvedených v normě. Kombinace slouží k modelování situací, kdy na konstrukci působí více typů zatížení najednou. Kombinace mohou být různých typů a každý typ je používán pro jiný druh posudku. V této práci bude posuzován mezní stav únosnosti vztažený k trvalé návrhové situaci EQU/STR podle základního vzorce:

$$f_d = \sum \gamma_{G,j} * g_{k,j} + \gamma_{Q,1} * q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * q_{k,i}$$

kde:

- f_d je návrhová hodnota zatížení
- Σ značí „kombinovaný účinek“
- $\gamma_{G,i}$ je dílčí součinitel vyjadřující rozptyl účinků i-tého stálého zatížení
- $g_{k,i}$ je charakteristická hodnota i-tého stálého zatížení
- “+ “ značí „kombinovaný s“
- $\gamma_{Q,1}$ je dílčí součinitel vyjadřující rozptyl účinků hlavního proměnného zatížení
- $q_{k,1}$ značí charakteristickou hodnotu hlavního proměnného zatížení
- $\gamma_{Q,i}$ je dílčí součinitel vyjadřující rozptyl účinků i-tého vedlejšího proměnného zatížení
- $q_{k,i}$ značí charakteristickou hodnotu i-tého vedlejšího proměnného zatížení

Mezní stav únosnosti EQU/STR slouží k posouzení, zda nedojde ke ztrátě statické rovnováhy konstrukce nebo její dílčí části uvažované jako tuhé těleso (EQU) a k posouzení vnitřních poruch a nadměrných deformací konstrukce nebo nosných prvků (STR).

Rekapitulace zatěžovacích stavů:

| zatěžovací stav | reprezentuje | označení char. hodnoty |
|-----------------|---|------------------------|
| ZS1 | Vlastní tíha | $g_{k,vt}$ |
| ZS2 | Střešní krytina | $g_{k,sk}$ |
| ZS3 | Sníh | $q_{k,s}$ |
| ZS4 | Vítr příčný – JZ směr (zleva; tlak na 29° a 40°, tah na 33°) | $q_{k,w,L}$ |
| ZS5 | Vítr příčný – SV směr (zprava; tah na 29° a 40°, tlak na 33°) | $q_{k,w,P}$ |
| ZS6 | Vítr podélný (90°) – SZ nebo JV směr | $q_{k,w,90}$ |

Tab. č. 9 Přehled zatěžovacích stavů

Celkem bude bráno v úvahu 8 kombinací: 1 kombinace pro sníh bez větru + 3 kombinace pro tři případy větru bez sněhu + 4 kombinace pro dva zatěžovací stavy příčným větrem a sněhem ve dvou přístupech k stanovení hlavního a vedlejšího proměnného zatížení. Kombinace zatížení podélným větrem a sněhem není uvažována, protože u podélného větru jsou zajímavé zejména sací účinky, které jsou přítomností sněhu kompenzovány (navíc dochází k jeho odvátí).

| mezní stav | q ₁ | q ₂ | vzorec f _d = | alternativně f _d = |
|------------|----------------|----------------|---|---|
| MSÚ1 | sníh | - | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,s}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS3 |
| MSÚ2 | vítr zleva | - | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,w,L}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS4 |
| MSÚ3 | vítr zprava | - | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,w,P}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS5 |
| MSÚ4 | vítr podélný | - | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,w,90}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS6 |
| MSÚ5 | sníh | vítr zleva | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,s}$ + $\gamma_Q \cdot \psi_{0,w} \cdot q_{k,w,L}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS3 + 0,9*ZS4 |
| MSÚ6 | vítr zleva | sníh | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,w,L}$ + $\gamma_Q \cdot \psi_{0,s} \cdot q_{k,s}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS4 + 0,75*ZS3 |
| MSÚ7 | sníh | vítr zprava | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,s}$ + $\gamma_Q \cdot \psi_{0,w} \cdot q_{k,w,P}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS3 + 0,9*ZS5 |
| MSÚ8 | vítr zprava | sníh | $\gamma_G \cdot g_{k,vt} + \gamma_G \cdot g_{k,sk} + \gamma_Q \cdot q_{k,w,P}$ + $\gamma_Q \cdot \psi_{0,s} \cdot q_{k,s}$ | 1,35*ZS1 + 1,35*ZS2 + 1,5*ZS5 + 0,75*ZS3 |

Tab. č. 10 Přehled uvažovaných kombinací zatěžovacích stavů pro MSÚ

MSP

K určení deformací modelů poslouží stejné kombinace zatěžovacích stavů jako při stanovování vnitřních sil, pouze jejich hodnoty budou charakteristické dle normového vzorce.

Ke stanovení nejnepříznivějších deformačních účinků zatěžovacích stavů na konstrukci se využije charakteristického kombinačního vzorce:

$$f_d = \sum \gamma_{G,j} \cdot g_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot q_{k,i}$$

Z uvedených zatěžovacích stavů budou vytvořeny tyto kombinace pro porovnání deformací:

| mezní stav | q ₁ | q ₂ | vzorec f _d = | alternativně f _d = |
|------------|----------------|----------------|--|-------------------------------|
| MSP1 | sníh | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,s}$ | ZS1 + ZS2 + ZS3 |
| MSP2 | vítr zleva | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,L}$ | ZS1 + ZS2 + ZS4 |
| MSP3 | vítr zprava | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,P}$ | ZS1 + ZS2 + ZS5 |
| MSP4 | vítr podélný | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,90}$ | ZS1 + ZS2 + ZS6 |
| MSP5 | sníh | vítr zleva | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,s} + \psi_{0,w} \cdot q_{k,w,L}$ | ZS1 + ZS2 + ZS3 + 0,6*ZS4 |
| MSP6 | vítr zleva | sníh | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,L} + \psi_{0,s} \cdot q_{k,s}$ | ZS1 + ZS2 + ZS4 + 0,5*ZS3 |
| MSP7 | sníh | vítr zprava | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,s} + \psi_{0,w} \cdot q_{k,w,P}$ | ZS1 + ZS2 + ZS3 + 0,6*ZS5 |
| MSP8 | vítr zprava | sníh | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,P} + \psi_{0,s} \cdot q_{k,s}$ | ZS1 + ZS2 + ZS5 + 0,5*ZS3 |

Tab. č. 11 Přehled uvažovaných kombinací zatěžovacích stavů pro určení deformací

7 Porovnání modelů spojů a podpor

7.1 Porovnání reakcí a vnitřních sil

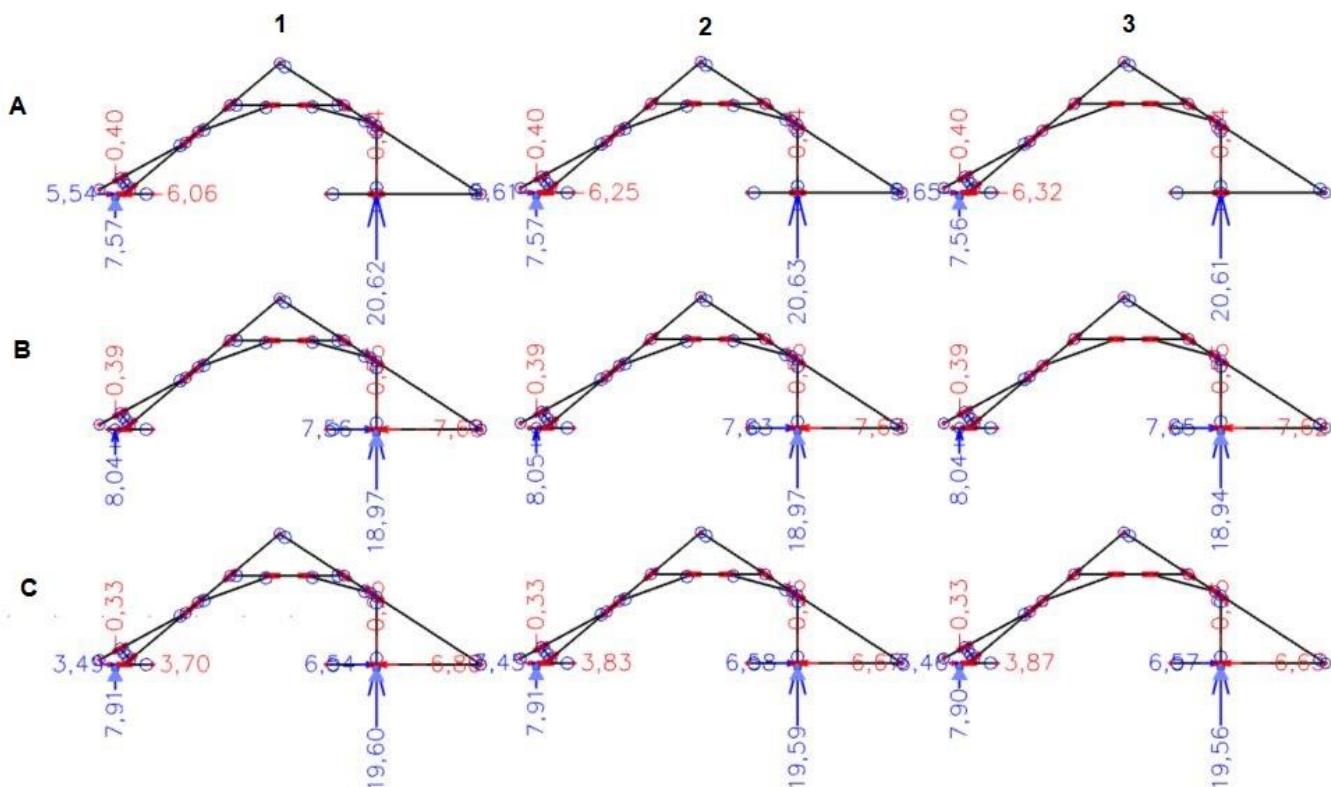
Vnitřní síly jednotlivých modelů budou porovnávány z obálky všech MSÚ. Tak získáme extrémní hodnoty vnitřních sil na jednotlivé prvky v různých stavech zatížení a jejich kombinacích. Pro každý bod na průběhu tedy platí, že vykreslená hodnota veličiny (síly, ohybového momentu) není překročena v žádné z uvažovaných kombinací.

Tento způsob je vhodný pro porovnání extrémních sil v jednotlivých modelech, nikoliv ke stanovení vnitřních sil pro posouzení prvků, protože neposkytuje informace o skutečné kombinaci vnitřních sil (např. N + M) prvku při nejnepříznivějším MSÚ v daném bodě (v různých bodech konstrukce můžou mít nejméně příznivé účinky různé kombinace zatěžovacích stavů).

K hodnotám reakcí a vnitřních sil bude vždy v tabulce uveden procentuální rozdíl hodnot mezi modely. Jako základ bude vždy považován model 1 – model se všemi spoji modelovanými jako klouby. Pod tabulkou bude dále uveden maximální procentuální rozdíl v absolutní hodnotě a opět bude jako základ brán model 1.

7.1.1 Jalová vazba

7.1.1.1 Reakce



Obr. č. 83 Reakce v modelech jalové vazby

| Podpora 1 | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|----------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| Rx kladná [kN] | | | | | | |
| model A | 8 | 5,54 | 5,61 | 101% | 5,65 | 102% |
| model B | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model C | 8 | 3,49 | 3,45 | 99% | 3,46 | 99% |

| Rx záporná [kN] | | | | | | |
|-----------------|---|-------|-------|------|-------|------|
| model A | 6 | -6,06 | -6,25 | 103% | -6,32 | 104% |
| model B | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model C | 6 | -3,7 | -3,83 | 104% | -3,87 | 105% |
| Rz kladná [kN] | | | | | | |
| model A | 5 | 7,57 | 7,57 | 100% | 7,56 | 100% |
| model B | 6 | 8,04 | 8,05 | 100% | 8,04 | 100% |
| model C | 6 | 7,91 | 7,91 | 100% | 7,9 | 100% |
| Rz záporná [kN] | | | | | | |
| model A | 4 | -0,4 | -0,4 | 100% | -0,4 | 100% |
| model B | 4 | -0,39 | -0,39 | 100% | -0,39 | 100% |
| model C | 4 | -0,33 | -0,33 | 100% | -0,33 | 100% |

| Podpora 2 | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-----------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| Rx kladná [kN] | | | | | | |
| model A | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | 8 | 7,56 | 7,63 | 101% | 7,65 | 101% |
| model C | 8 | 6,54 | 6,58 | 101% | 6,57 | 100% |
| Rx záporná [kN] | | | | | | |
| model A | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | 6 | -7,68 | -7,63 | 99% | -7,62 | 99% |
| model C | 6 | -6,8 | -6,67 | 98% | -6,63 | 98% |
| Rz kladná [kN] | | | | | | |
| model A | 8 | 20,62 | 20,63 | 100% | 20,61 | 100% |
| model B | 7 | 18,97 | 18,97 | 100% | 18,94 | 100% |
| model C | 7 | 19,6 | 19,59 | 100% | 19,56 | 100% |
| Rz záporná [kN] | | | | | | |
| model A | 4 | -0,64 | -0,64 | 100% | -0,64 | 100% |
| model B | 4 | -0,55 | -0,55 | 100% | -0,55 | 100% |
| model C | 4 | -0,25 | -0,26 | 104% | -0,25 | 100% |

Tab. č. 12 Porovnání reakcí modelů 1-3 v modelech podpor a-c – JV

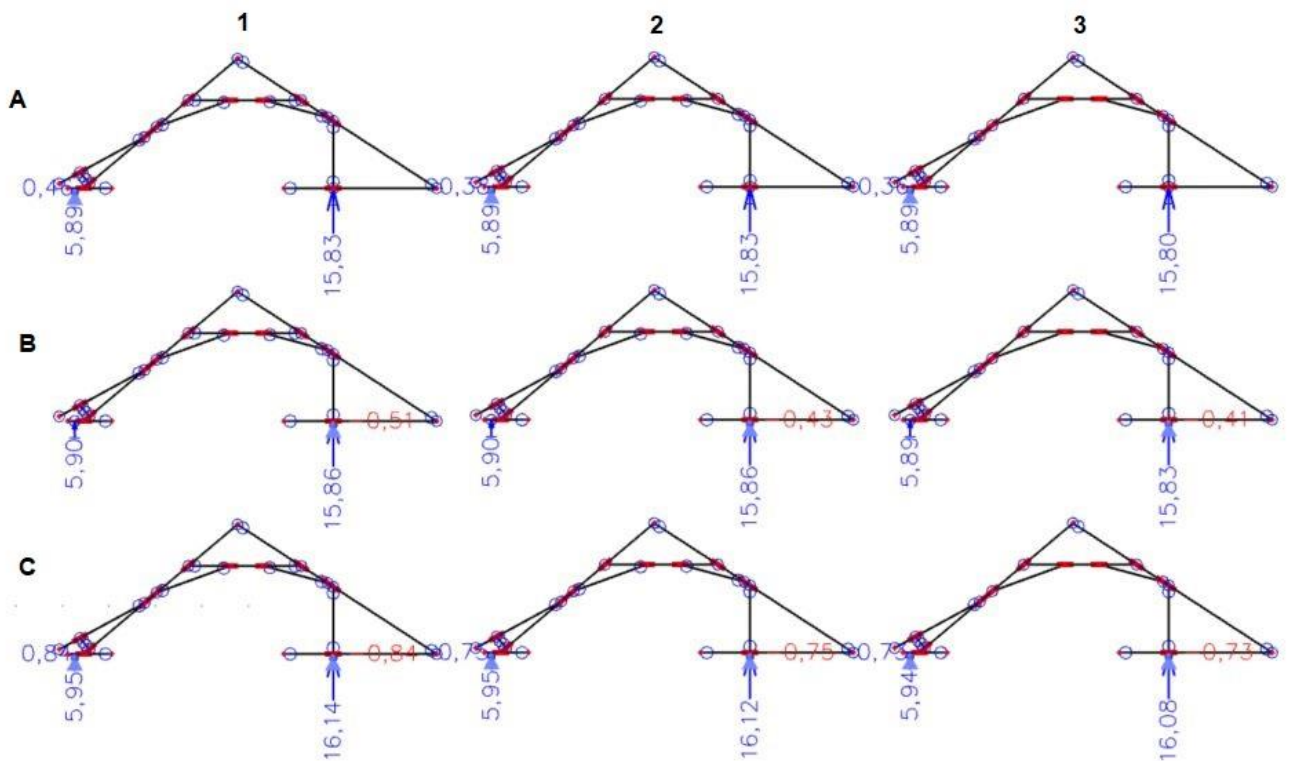
Z výsledků je patrné, že charakter spojů rybinově plátovaných, tedy zda jsou modelované jako kloub, nebo tuhý spoj, nemá ve vyšetřovaném krovu vliv na výsledné reakce (rozdíl modelů s tuhými spoji oproti kloubovému modelu max. 5 %).

V následující tabulce jsou uvedené maximální vodorovné síly, kterým musí karpování, podepření pozednice a zdivo vzdorovat v různých modelech podpor:

| $ R_{x_{max}} $ | model 1 | model 2 | model 3 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| model A | 6,06 | 6,25 | 6,32 |
| model B | 7,68 | 7,63 | 7,65 |
| b/a | 127 % | 122 % | 121 % |
| model C | 6,8 | 6,67 | 6,3 |
| c/a | 112 % | 107 % | 100 % |
| c/b | 88,5 % | 87,4 % | 82,4 % |

Tab. č. 13 Maximální hodnoty vodorovných sil v podporách jalové vazby

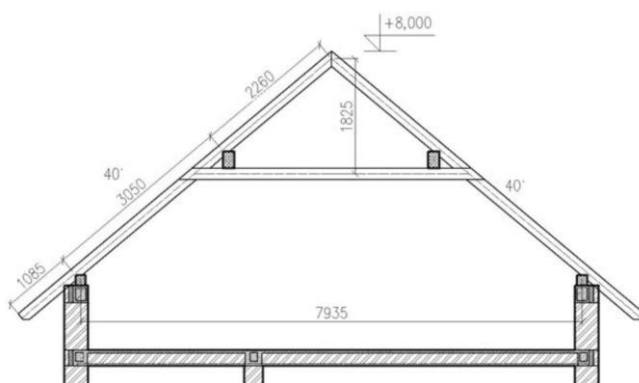
Tyto síly vznikají převážně od účinků příčného zatížení větrem. Vodorovné síly od účinků svislého zatížení dobře přebírá konstrukce krovu díky přítomnosti hambalku a ztužujících pásků.



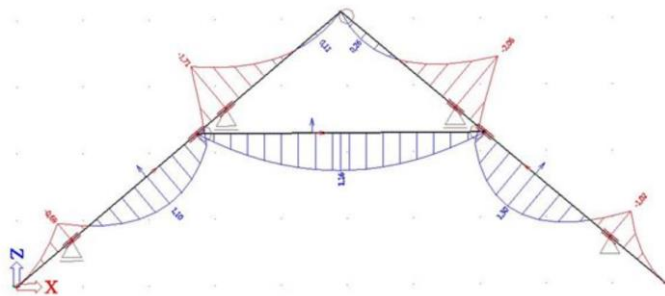
Obr. č. 84 Reakce v modelech od účinků kombinace MSÚ 1 – zatížení krytinou, vlastní tíhou a sněhem

Nejmenší vodorovné síly od větru na podpory krovu vznikají v modelu A, největší naopak v modelu B. V hodnotách vodorovných sil však není mezi jednotlivými modely až tak velký rozdíl oproti například vaznicovému krovu s vaznicemi uloženými ve štítových stěnách, kde může být rozdíl i víc jak dvojnásobný, záleží samozřejmě na konkrétní konstrukci krovu.

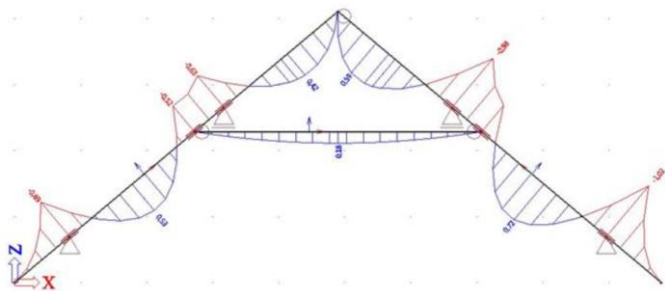
Pro názornost jsou zde uvedeny výsledky výpočtu různých modelů vaznicového krovu Ing. Josefa Musílk a Ph.D., Ing. Jana Plachého z VŠTE České Budějovice uvedeného na portálu tzb – info^[17]:



Obr. č. 85 Vazba krovu – řez



Obr. č. 86 Průběh ohybového momentu pro model krovu s jednou podporou neposuvnou



Obr. č. 87 Průběh ohybového momentu pro model krovu s oběma podporami neposuvnými

Výsledky pro model vaznicového krovu s jednou neposuvnou podporou:

Maximální moment na krokvi v poli (pro kombinaci MSÚ1): 1,3 kNm
 Maximální moment na krokvi nad vaznicí (pro kombinaci MSÚ 1): -2,06 kNm
 Normálová síla v kleštině (pro kombinaci MSÚ 1): 1,8 kN

Reakce:

| Reakce pro kombinaci zatížení MSÚ 1 | Pozednice-Levá | Vaznice-Levá | Vaznice-Pravá | Pozednice-Pravá |
|-------------------------------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|
| Svislá reakce | 4,66 | 8,15 | 10 | 4,71 |
| Vodorovná reakce | 0 | 0 | 0 | 2,05 |

Výsledky pro model vaznicového krovu s oběma podporami neposuvnými:

Maximální moment na krokvi v poli (pro kombinaci MSÚ1): 0,72 kNm
 Maximální moment na krokvi nad vaznicí (pro kombinaci MSÚ 1): - 0,98 kNm
 Normálová síla v kleštině (pro kombinaci MSÚ 1): -3,31 kN

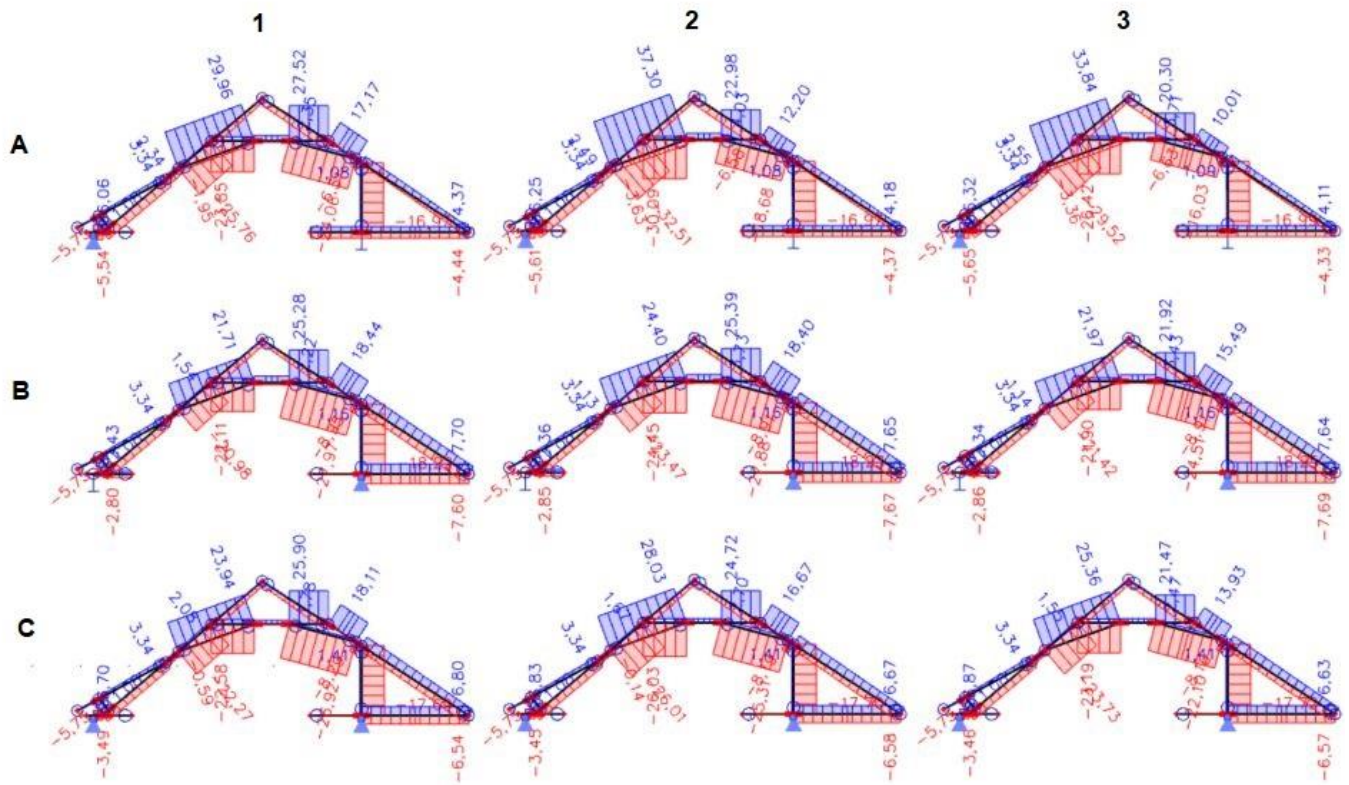
Reakce:

| Reakce pro kombinaci zatížení MSÚ 1 | Pozednice-Levá | Vaznice-Levá | Vaznice-Pravá | Pozednice-Pravá |
|-------------------------------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|
| Svislá reakce | 9,04 | 2,86 | 4,71 | 9,08 |
| Vodorovná reakce | 5,84 | 0 | 0 | -3,80 |

Ve vaznicovém krovu potom obvykle vodorovným silám vzdoruje pouze osedlání krokve na pozednici zajištěné hřebíkem, které vodorovné síle odporuje dobře pouze v jednom směru, takže je na místě snaha o minimalizaci těchto sil vhodným dimenzováním prvků krovu, aby energii zatížení přebíraly spíše jejich průřezy a nepromítala se tolik do uložení krovu na pozednice.

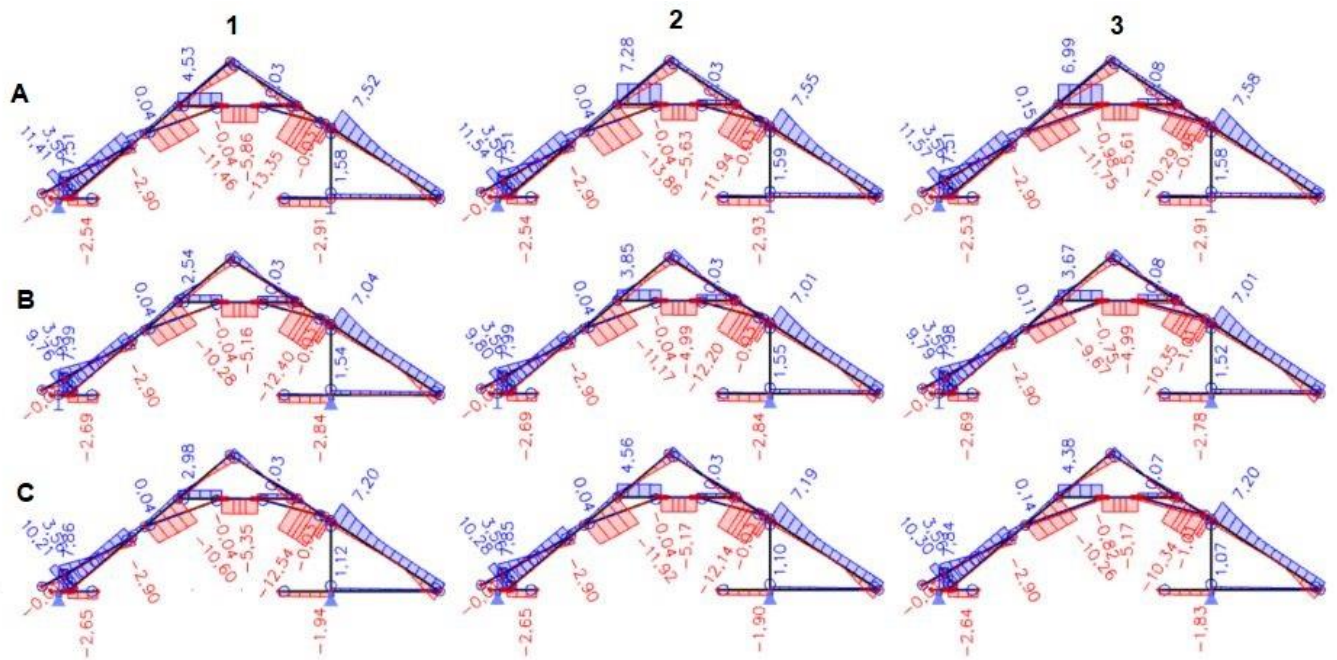
7.1.1.2 Vnitřní síly

N_x



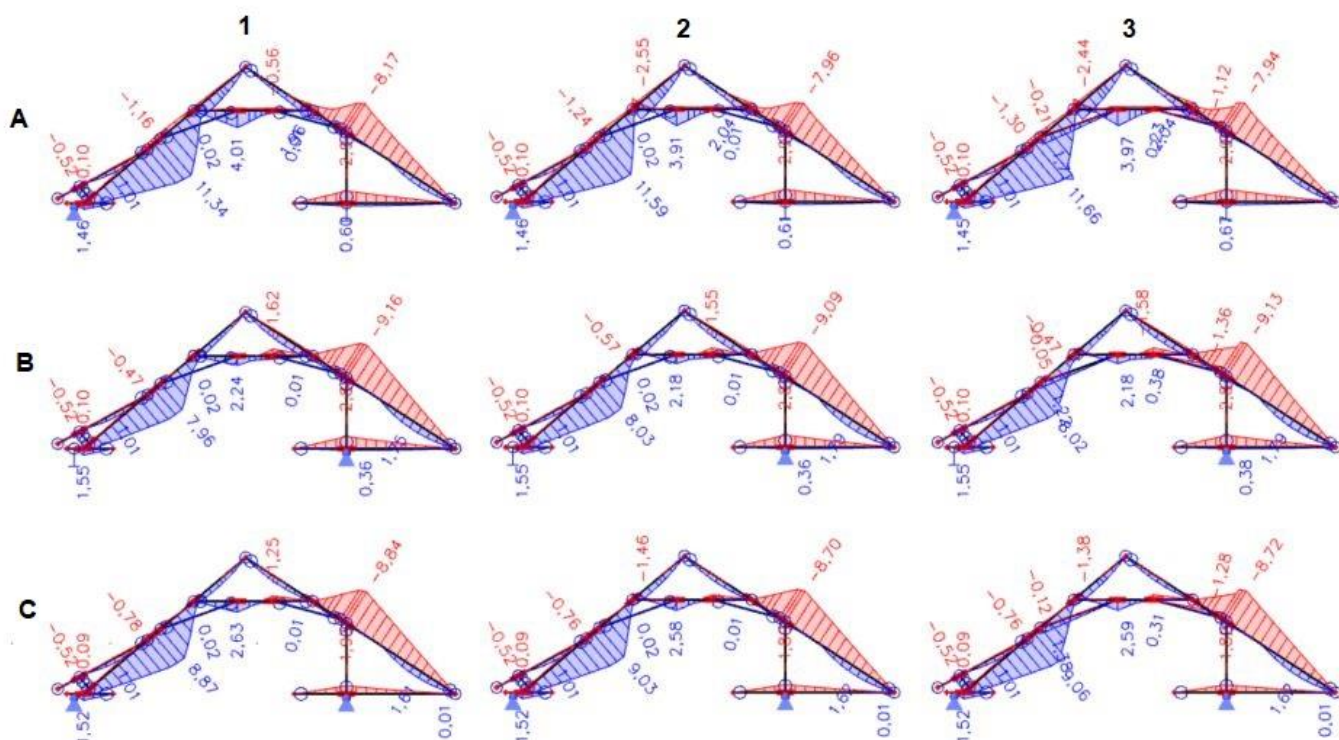
Obr. č. 88 Normálové síly v modelech jalové vazby

V_z



Obr. č. 89 Posouvající síly v modelech jalové vazby

M_y



Obr. č. 90 Ohybové momenty v modelech jalové vazby

V průbězích vnitřních sil stojí za povšimnutí, že v modelu spojů 3 dochází při ztužení připojení pásků ke skokovému zmenšení momentu v místě napojení pásku 1 na krokv 1 pro pole na krokvi 1 mezi napojením pásku a hambalku, kde se oproti zbytku krokve vyskytuje velká normálová síla.

Následující tabulka uvádí porovnání vnitřních sil ve vybraných prvcích mezi modely podpor A – C a modely spojů 1 – 3. Žlutě vyznačené hodnoty jsou hodnoty, které nejsou na daném prutu maximální, ale jsou maximálním hodnotám nacházejícím se v jiném bodě prutu velikostí velmi blízké (rozdíl v desetínách kN – velikost a umístění extrémů viz obrázky) a jejich uvedení zde slouží k porovnání vnitřních sil různých modelů ve stejném bodě konstrukce:

| Krokv 1 | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-----------------------------------|-----------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| N_x tlak [kN] | | | | | | | |
| model A | 2046,640+ | 6 | -25,76 | -32,51 | 126% | -29,52 | 115% |
| model B | | | -20,98 | -23,47 | 112% | -21,42 | 102% |
| model C | | | -22,27 | -26,01 | 117% | -23,73 | 107% |
| V_z [kN] | | | | | | | |
| model A | 2935,272- | 6 | -11,46 | -13,86 | 121% | -11,75 | 103% |
| model B | | | -10,28 | -11,17 | 109% | -9,67 | 94% |
| model C | | | -10,60 | -11,92 | 112% | -10,26 | 97% |
| M_y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 2046,640+ | 6 | 11,34 | 11,59 | 102% | 11,66 | 103% |
| model B | | | 7,96 | 8,03 | 101% | 8,02 | 101% |
| model C | | | 8,87 | 9,03 | 102% | 9,06 | 102% |

| Krokev 2 | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|--------------------------|-----------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| N _x tah [kN] | | | | | | | |
| model A | 1633,227+ | 6 | 17,17 | 12,2 | 71% | 10,01 | 58% |
| model B | | | 18,44 | 18,4 | 100% | 15,49 | 84% |
| model C | | | 18,11 | 16,67 | 92% | 13,93 | 77% |
| N _x tlak [kN] | | | | | | | |
| model A | 2453,907- | 6 | -6,51 | -6,35 | 98% | -6,3 | 97% |
| model B | | | -8,95 | -8,91 | 100% | -8,91 | 100% |
| model C | | | -8,29 | -8,19 | 99% | -8,16 | 98% |
| V _z [kN] | | | | | | | |
| model A | 2308,636- | 5 | -13,1 | -11,94 | 91% | -10,29 | 79% |
| model B | | | -12,4 | -12,18 | 98% | -10,35 | 83% |
| model C | | | -12,54 | -12,14 | 97% | -10,34 | 82% |
| M _y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 2453,907+ | 5 | -8,17 | -7,96 | 97% | -7,94 | 97% |
| model B | | 6 | -9,16 | -9,09 | 99% | -9,13 | 100% |
| model C | | 5 | -8,84 | -8,7 | 98% | -8,72 | 99% |

| Hambalek | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|--------------------------|-----------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| N _x tah [kN] | | | | | | | |
| model A | 1620,302+ | 6 | 27,52 | 22,98 | 84% | 20,3 | 74% |
| model B | | | 25,28 | 25,39 | 100% | 21,92 | 87% |
| model C | | | 25,9 | 24,72 | 95% | 21,47 | 83% |
| N _x tlak [kN] | | | | | | | |
| model A | 0 | 6 | -23,85 | -30,09 | 126% | -26,42 | 111% |
| model B | | | -22,11 | -24,45 | 111% | -21,9 | 99% |
| model C | | | -22,58 | -26,03 | 115% | -23,19 | 103% |
| M _y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 892,155+ | 6 | 4,01 | 3,91 | 98% | 3,97 | 99% |
| model B | | 5 | 2,24 | 2,18 | 97% | 2,18 | 97% |
| model C | | 6 | 2,63 | 2,58 | 98% | 2,59 | 98% |

| Pásek 1 | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-------------------------|----------------|-------|----------|----------|---------|----------|---------|
| N _x tah [kN] | | | | | | | |
| model A | 1672,952 | 6 | 29,96 | 37,3 | 124% | 33,84 | 113% |
| model B | | | 21,71 | 24,4 | 112% | 21,97 | 101% |
| model C | | | 23,94 | 28,03 | 117% | 25,36 | 106% |
| M _y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 0 (836,476) | 6 (8) | 0 (0,02) | 0 (0,02) | - | 1,77 (-) | - |
| model B | | | 0 (0,02) | 0 (0,02) | - | 1,22 (-) | - |
| model C | | | 0 (0,02) | 0 (0,02) | - | 1,38 (-) | - |

| Pásek 2 | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|--------------------------|-----------------------|-------|----------|----------|---------|---------|---------|
| N _x tlak [kN] | | | | | | | |
| model A | 1421,302 | 6 | -24,06 | -18,68 | 78% | -16,03 | 67% |
| model B | | | -27,97 | -27,88 | 100% | -24,51 | 88% |
| model C | | | -26,92 | -25,31 | 94% | -22,1 | 82% |
| M _y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 1421,302 (609,130) | 5 (8) | 0 (0,01) | 0 (0,01) | - | -1,12 | - |
| model B | | 6 (8) | 0 (0,01) | 0 (0,01) | - | -1,36 | - |
| model C | | | 0 (0,01) | 0 (0,01) | - | -1,28 | - |

Tab. č. 14 Porovnání vybraných vnitřních sil vybraných prvků modelů 1-3 v modelech podpor a-c – JV

Z porovnání vnitřních sil modelů spojů 1 – 3 vyplývá, že výraznější rozdíly nastávají u normálových a posouvajících sil, a to obzvlášť u modelu podpor A (až 42 % pro normálovou sílu pro kroky 2). V modelech podpor B a C je rozdíl hodnot normálových sil modelů spojů 2 a 3 oproti modelu 1 až 17 % u kroku 1, 23 % u kroku 2, 17 % u hambalku, 17 % u pásku 1 a 18 % u pásku 2.

V momentových silách je výrazný rozdíl pouze u pásků, kde v důsledku modelování příslušného spoje jako tuhého vetknutí vznikají oproti kloubovému modelu malé momenty, které ale mají velký vliv na posudek průřezu. Momenty na ostatních prutových prvcích jsou ve všech 3 modelech velmi podobné (rozdíl max. 3 %).

Z hlediska modelů podpor vznikají poměrně velké rozdíly v hodnotách vnitřních sil, a to hlavně v porovnání modelu A s modely B a C, které vzájemně vykazují podobné výsledky. Největší rozdíl nastává v hodnotě ohybového momentu na kroku 1:

| M _{y,max} | model 1 | model 2 | model 3 |
|--------------------|---------|---------|---------|
| model A | 11,34 | 11,59 | 11,66 |
| model B | 7,96 | 8,03 | 8,02 |
| b/a | 70,2 % | 69,3 % | 68,8 % |
| model C | 8,87 | 9,03 | 9,06 |
| c/a | 78,2 % | 77,9 % | 77,7 % |
| c/b | 111,4 % | 112,5 % | 113 % |

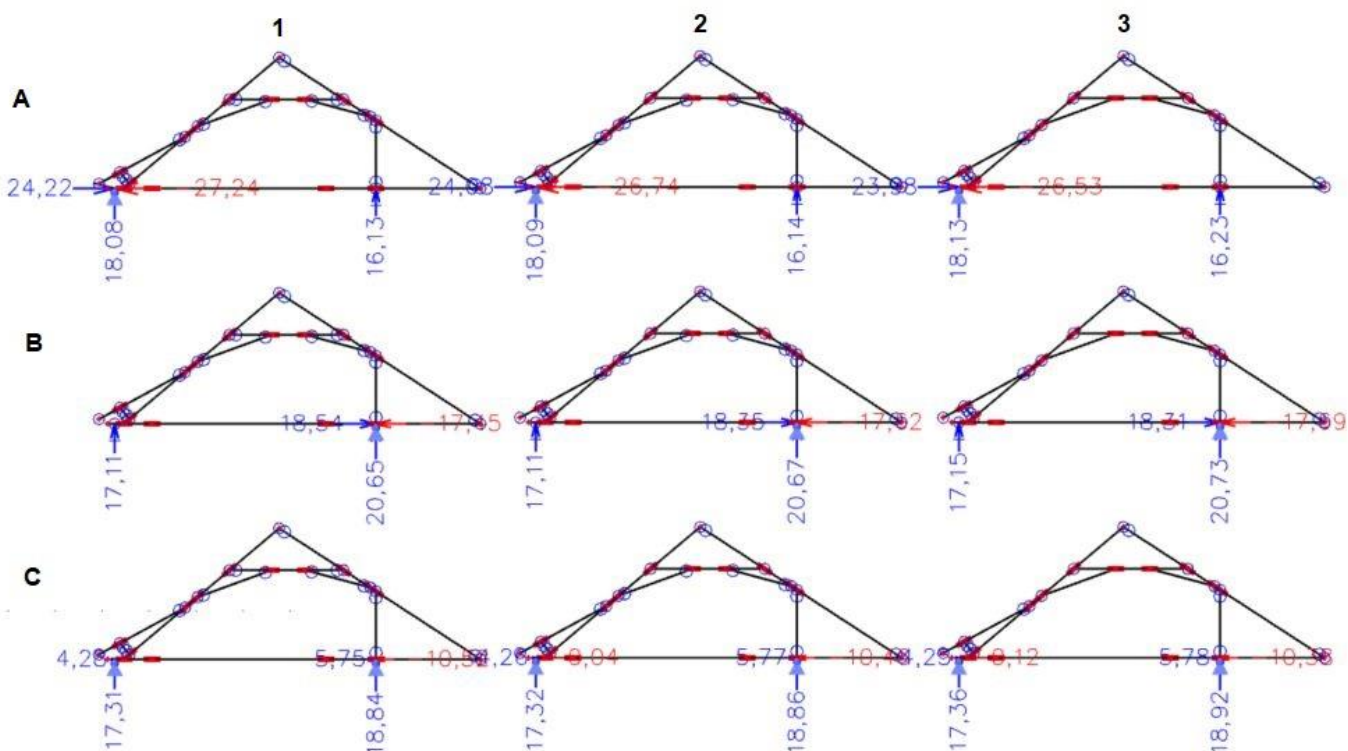
Tab. č. 15 Hodnoty ohybových momentů na kroku 1 v různých modelech podpor

Tento ohybový moment bude pravděpodobně rozhodující vnitřní silou pro posouzení dimenzí průřezu kroky, protože na kroku 2 vzniká ve všech modelech ohybový moment s hodnotou podobnou momentu na kroku 1 v modelech B a C (nejmenší 7,94 pro model 3a a největší 9,16 pro model 1b). Dále vzniká v modelu A oproti modelům B a C o něco vyšší tlak na kroky 1, menší ohybový moment na kroky 2 (nerozhoduje tolik, vysvětleno výše), vyšší tlak a dvojnásobný moment na hambalek, poměrně vyšší tah na pásek 1 a o něco menší tlak na pásek 2.

Vzhledem k tomu, že vodorovné reakce v podporách jalové vazby jsou mezi modely velmi podobné, nedá se říct, že by model A poskytoval výhodnější výsledky pro příčné zatížení karpování, pozednice a zdíva. Naopak poskytuje velmi nevýhodné výsledky z hlediska posouzení kroků a hambalku na účinky ohybového momentu.

7.1.2 Plná vazba

7.1.2.1 Reakce



Obr. č. 91 Reakce v modelech plné vazby

| Podpora 1 | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-----------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| Rx kladná [kN] | | | | | | |
| model A | 8 | 24,22 | 24,08 | 99% | 23,98 | 99% |
| model B | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model C | 8 | 4,28 | 4,26 | 100% | 4,25 | 99% |
| Rx záporná [kN] | | | | | | |
| model A | 6 | -27,24 | -26,74 | 98% | -26,53 | 97% |
| model B | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model C | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| Rz kladná [kN] | | | | | | |
| model A | 6 | 18,08 | 18,09 | 100% | 18,13 | 100% |
| model B | 5 | 17,11 | 17,11 | 100% | 17,15 | 100% |
| model C | 6 | 17,31 | 17,32 | 100% | 17,36 | 100% |
| Rz záporná [kN] | | | | | | |
| model A | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model C | - | 0 | 0 | - | 0 | - |

| Podpora 2 | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-----------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| Rx kladná [kN] | | | | | | |
| model A | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | 8 | 18,54 | 18,35 | 99% | 18,31 | 99% |
| model C | 8 | 5,75 | 5,77 | 100% | 5,78 | 101% |
| Rx záporná [kN] | | | | | | |
| model A | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | 6 | -17,45 | -17,62 | 101% | -17,69 | 101% |
| model C | 6 | -10,52 | -10,46 | 99% | -10,38 | 99% |
| Rz kladná [kN] | | | | | | |
| model A | 7 | 16,13 | 16,14 | 100% | 16,23 | 101% |
| model B | 8 | 20,65 | 20,67 | 100% | 20,73 | 100% |
| model C | 8 | 18,84 | 18,86 | 100% | 18,92 | 100% |
| Rz záporná [kN] | | | | | | |
| model A | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | - | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model C | - | 0 | 0 | - | 0 | - |

Tab. č. 16 Porovnání reakcí modelů 1-3 v modelech podpor a-c – PV

Z výsledků reakcí v plné vazbě je opět zřejmé, že způsob modelování spojů v části krovu hradu Krásná Hôrka nemá vliv na velikost reakcí v modelech (rozdíl max. 3 % pro model podpor A, pro modely B a C je to max. 1 %).

V následující tabulce jsou uvedené maximální vodorovné síly, kterým musí karpování, podepření pozednice a zdivo vzdorovat v různých modelech podpor:

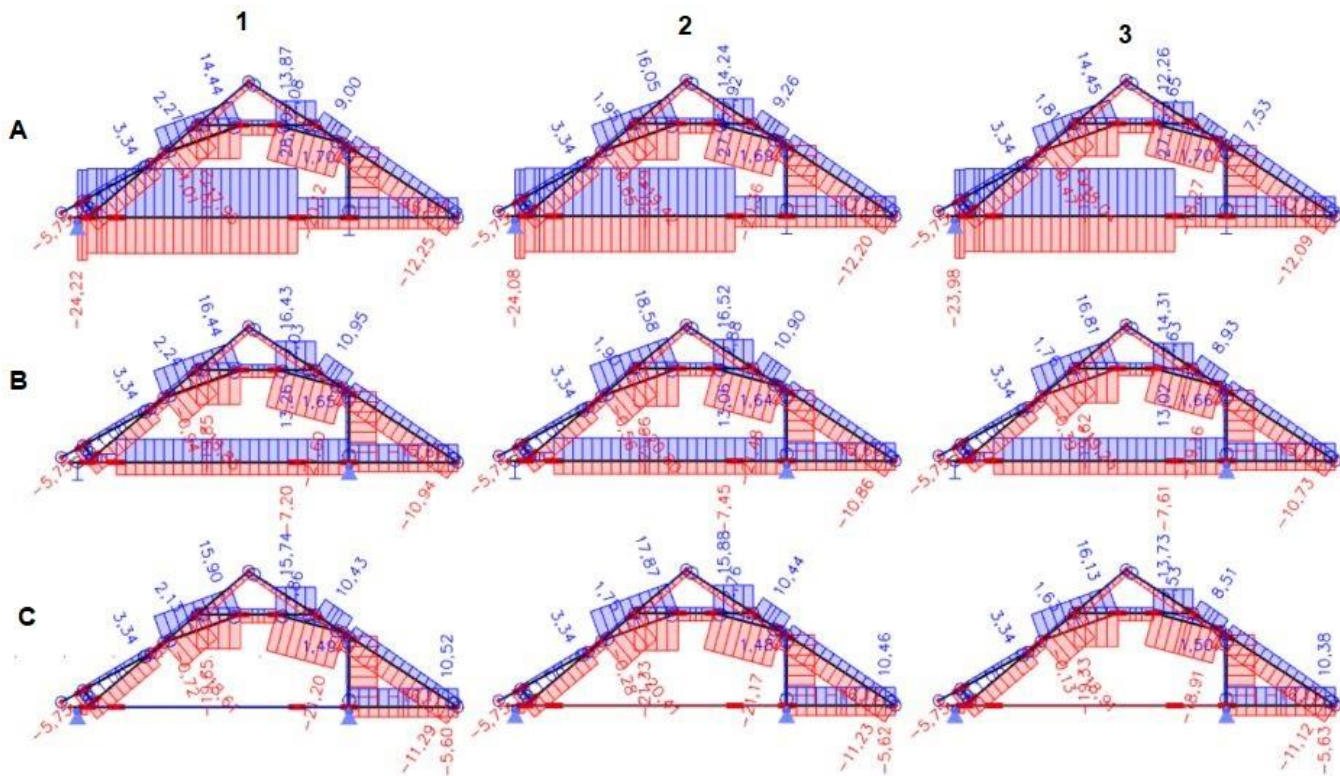
| $ R_{x_{max}} $ | model 1 | model 2 | model 3 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| model A | 27,24 | 26,74 | 26,53 |
| model B | 18,54 | 18,35 | 18,31 |
| b/a | 68 % | 68,6 % | 69 % |
| model C | 10,52 | 10,46 | 10,38 |
| c/a | 38,6 % | 39,1 % | 39,1 % |
| c/b | 56,7 % | 57 % | 56,7 % |

Tab. č. 17 Maximální hodnoty vodorovných sil v podporách plné vazby

V podporách plné vazby už vznikají výrazné rozdíly mezi modely podpor. Je to z toho důvodu, že při uvolnění podpor ve vodorovném směru v modelech A a B přebírají vodorovné síly od krátkat na uvolněné straně výměny, které je přenášejí do vazných trámů plných vazeb (viz vnitřní síly ve výměnách).

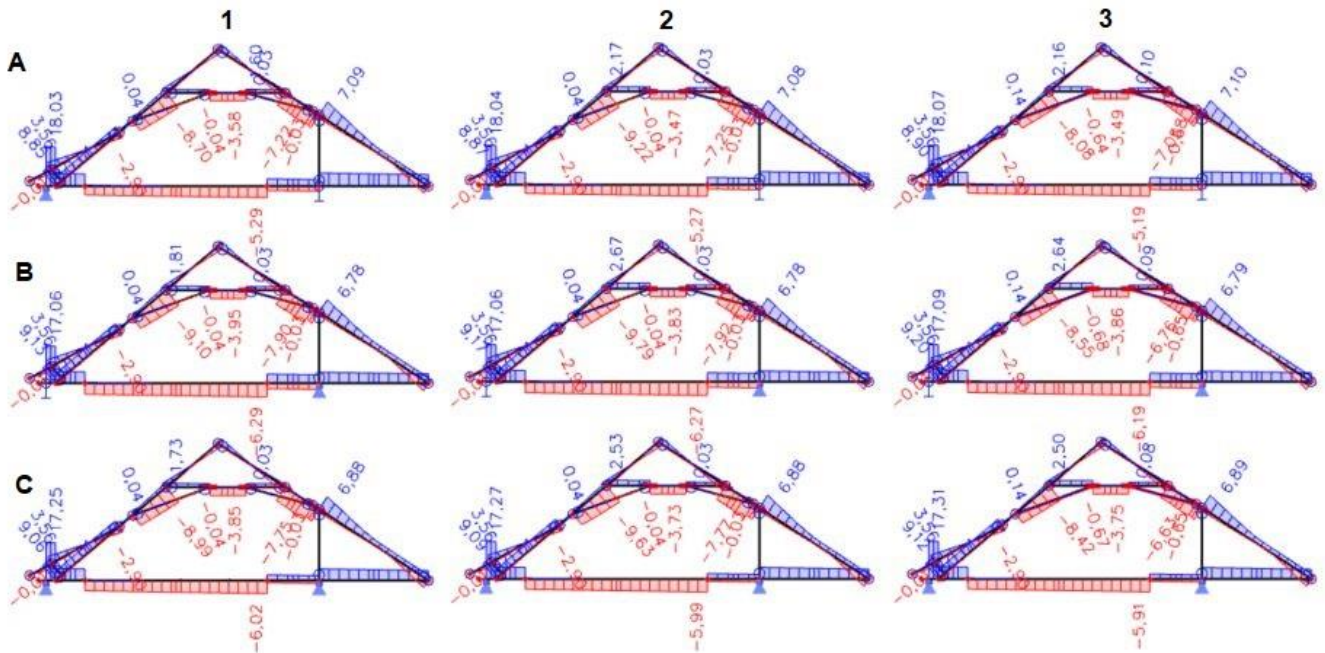
7.1.2.2 Vnitřní síly

N_x



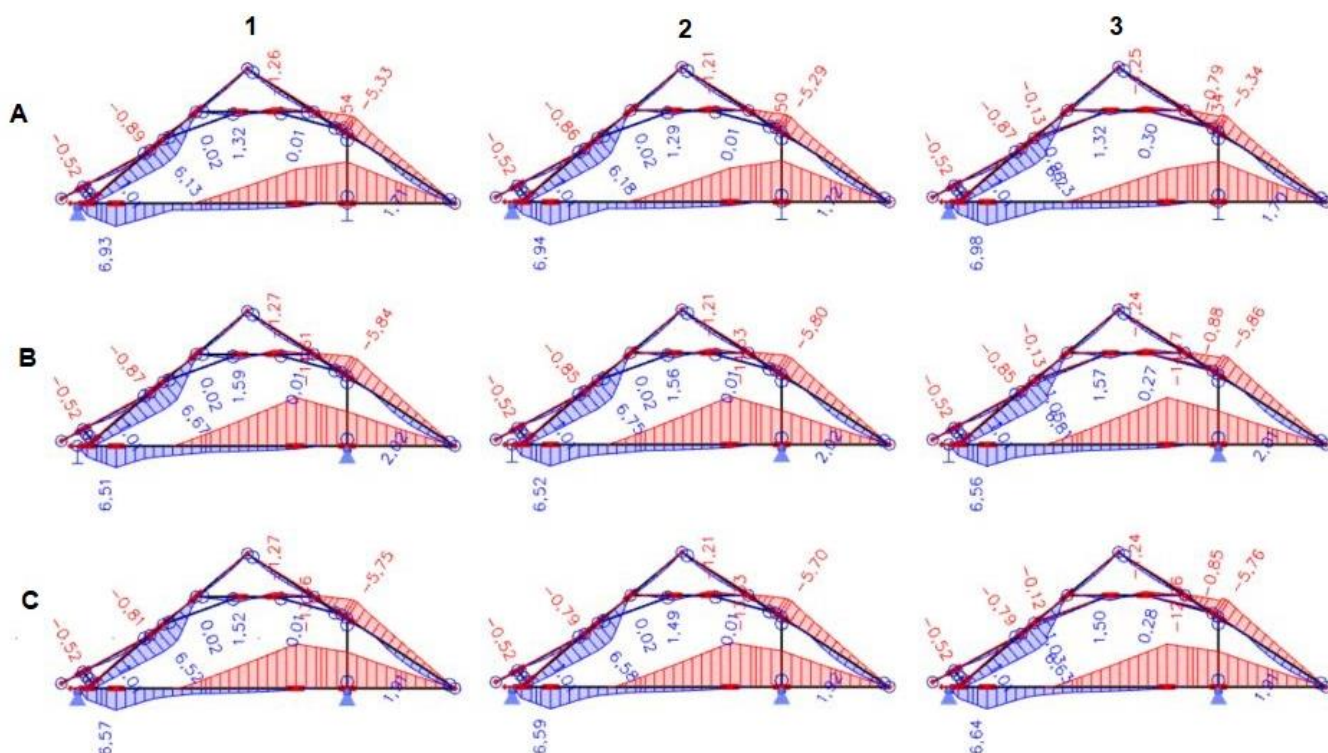
Obr. č. 92 Normálové síly v modelech plné vazby

V_z



Obr. č. 93 Posouvající síly v modelech plné vazby

M_y



Obr. č. 94 Ohybové momenty v modelech plné vazby

| VT | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-----------------------------------|-----------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| N_x tah [kN] | | | | | | | |
| model A | 943,995+ | 6 | 28 | 27,45 | 98% | 27,16 | 97% |
| model B | 943,995+ | 8 | 13,26 | 13,06 | 98% | 13,02 | 98% |
| model C | 5706,000+ | 6 | 10,52 | 10,46 | 99% | 10,38 | 99% |
| N_x tlak [kN] | | | | | | | |
| model A | 150,000+ | 8 | -24,22 | -24,08 | 99% | -23,98 | 99% |
| model B | 943,995+ | 6 | -7,2 | -7,45 | 103% | -7,61 | 106% |
| model C | 5706,000+ | 8 | -5,6 | -5,62 | 100% | -5,63 | 101% |
| V_z [kN] | | | | | | | |
| model A | 150,000+ | 6 | 18,03 | 18,04 | 100% | 18,07 | 100% |
| model B | | 5 | 17,06 | 17,06 | 100% | 17,09 | 100% |
| model C | | 6 | 17,25 | 17,27 | 100% | 17,31 | 100% |
| M_y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 5706,000+ | 6 | -12,54 | -12,5 | 100% | -12,34 | 98% |
| model B | 4645,000+ | | -14,61 | -14,53 | 99% | -14,17 | 97% |
| model C | 4645,000+ | | -13,46 | -13,33 | 99% | -12,96 | 96% |

Tab. č. 18 Porovnání vybraných vnitřních sil vybraných prvků modelů 1-3 v modelech podpor a-c – PV

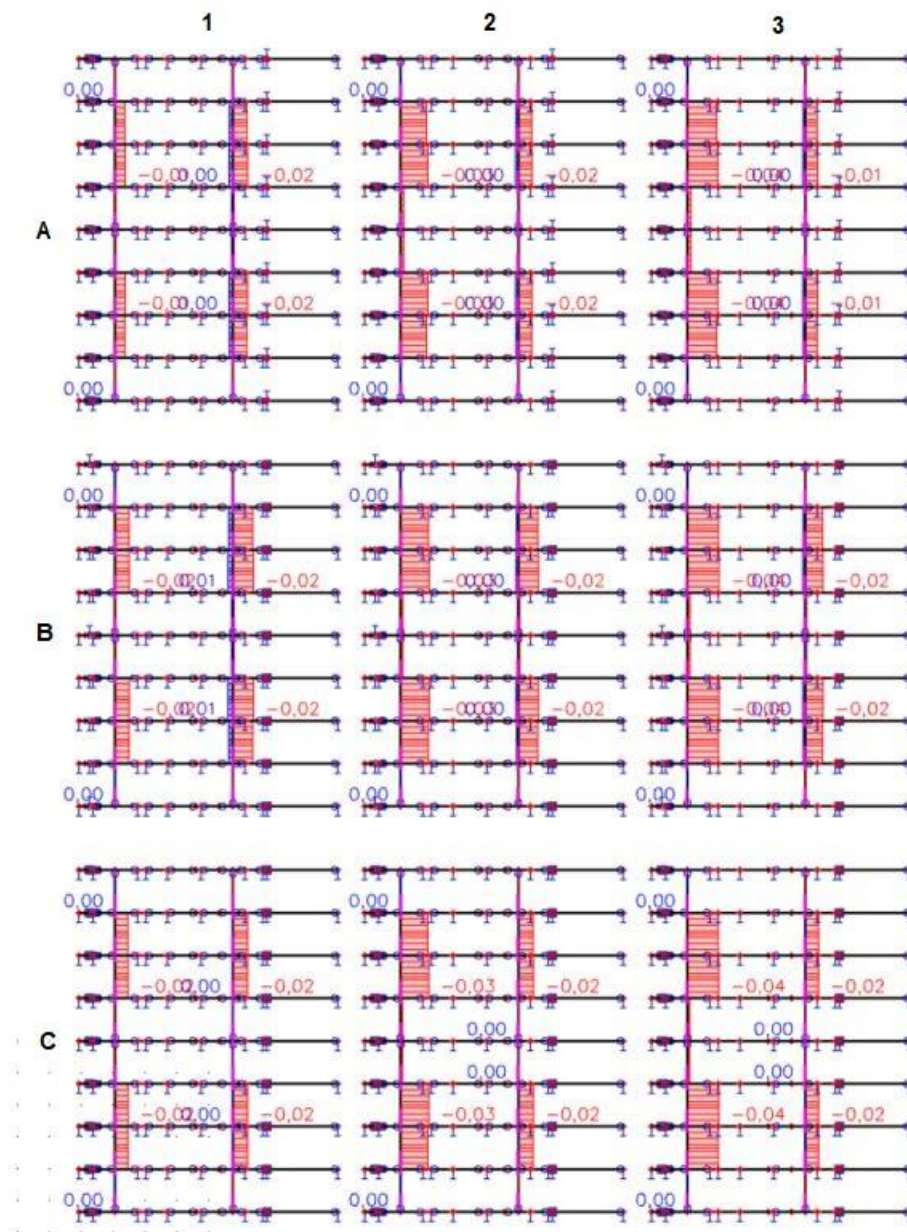
Není zde uvedena tabulka porovnání hodnot vnitřních sil prvků plné vazby, kromě vazného trámu, protože trend průběhu je velmi podobný, ale vnitřní síly jsou menší, tudíž pro posudek únosnosti jsou důležité výsledky sil v jalové vazbě, protože dimenze prvků jalové a plné vazby jsou stejné.

V průběhu vnitřních sil na vazném trámu plné vazby krovu není mezi modely spojů 1 – 3 téměř žádný rozdíl (max. 6 %).

Co se modelů podpor týče, tak nastávají výrazné rozdíly v hodnotách tahu a tlaku ve vazném trámu v poli mezi podporami. Tahová síla působící na trám je víc jak dvojnásobná v modelu A oproti modelu B a v modelu C tah v poli mezi podporami vůbec nevzniká. U tlaku jsou rozdíly ještě větší, oproti modelu B je vazný trám v modelu A namáhán víc jak trojnásobně, v modelu C opět tlak v poli mezi podporami nevzniká. Jak již bylo vysvětleno u rozdílu v reakcích, je to způsobeno normálovými silami v krátkáčech (ty se projevují jako posouvající síly ve výměnách, které tyto síly přenášejí na vazný trám), které v modelech A a B vznikají v důsledku posunu příslušných uvolněných podpor, zatímco v modelu podpor C normálové síly v krátkáčech nevznikají, protože vodorovnou sílu zachytí jejich uložení na pozednici.

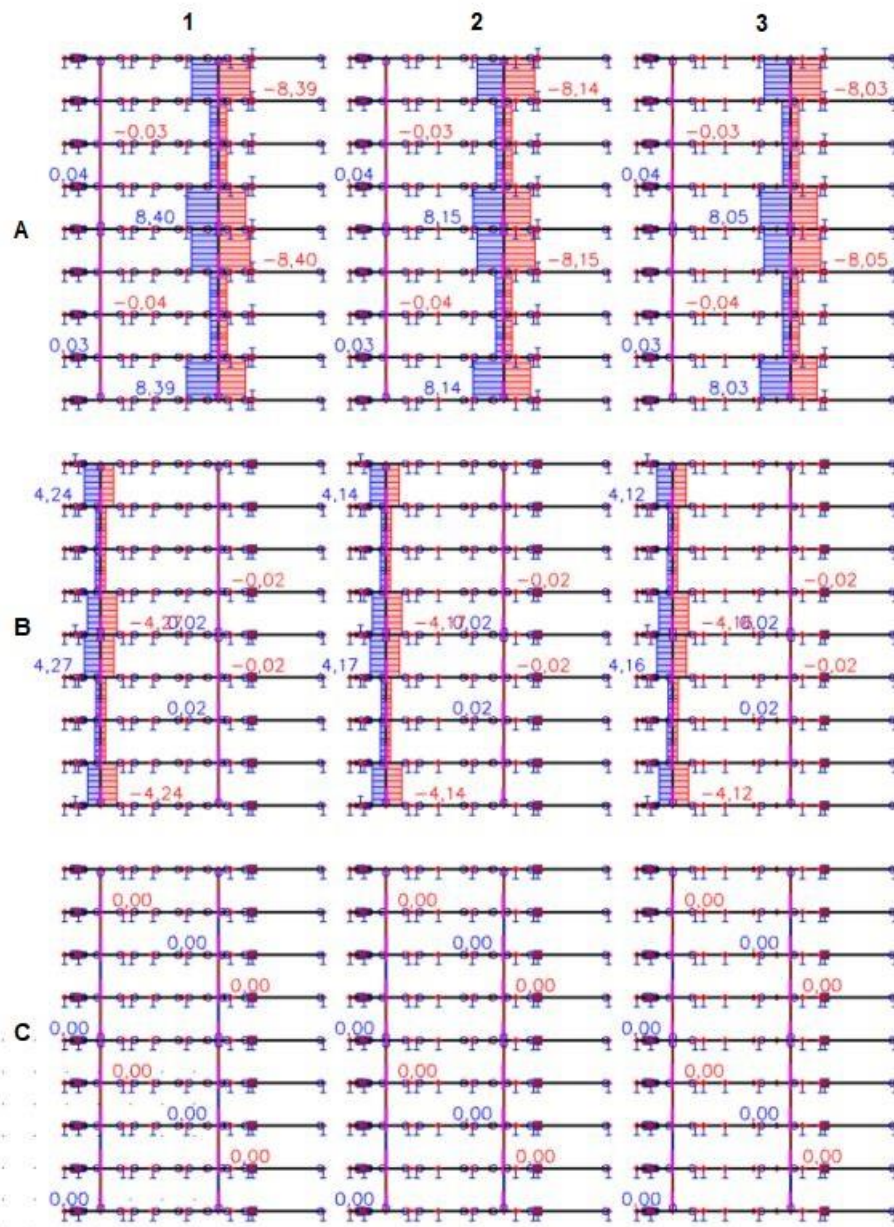
7.1.3 Výměny

N_x



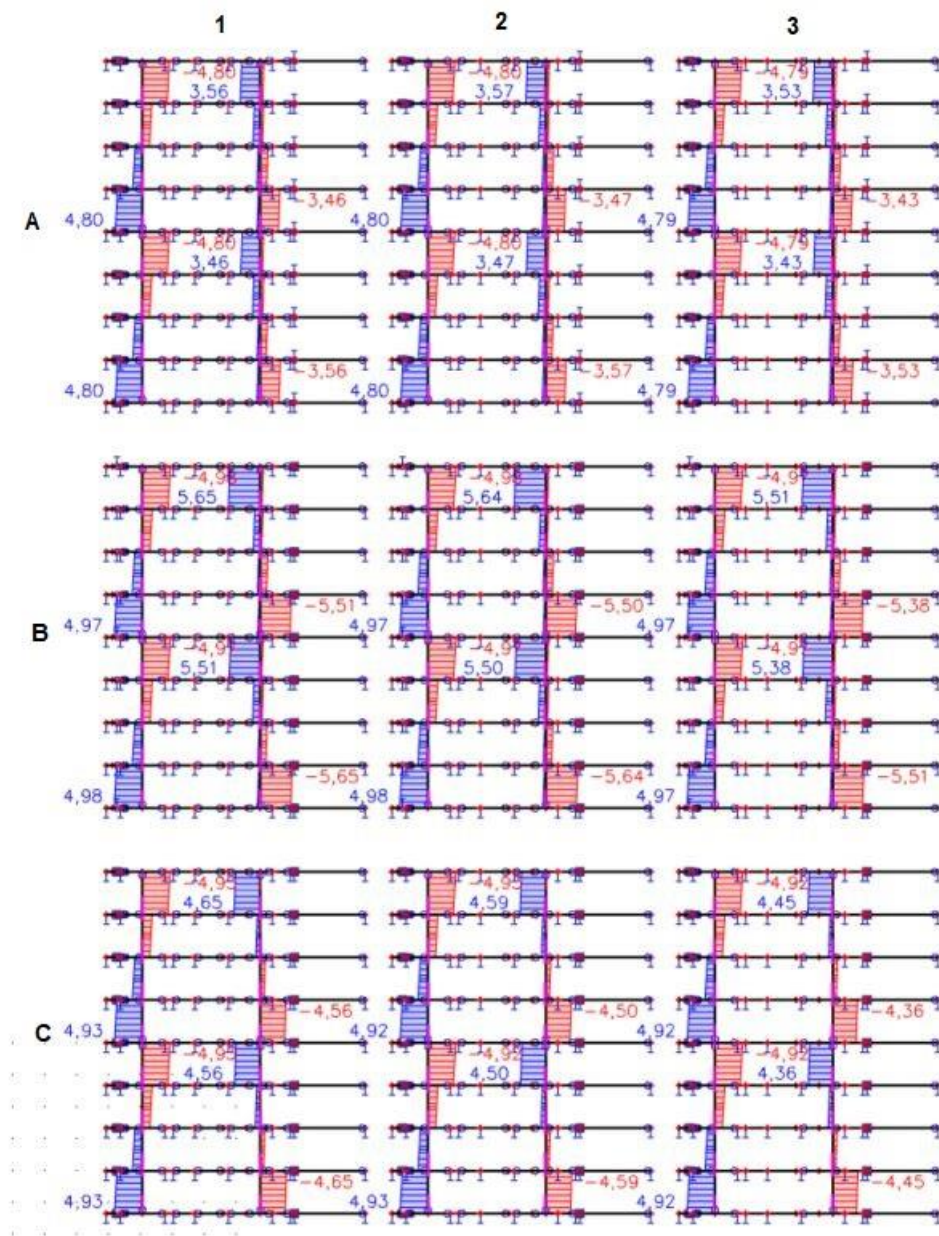
Obr. č. 95 Normálové síly ve výměnách modelů

V_y



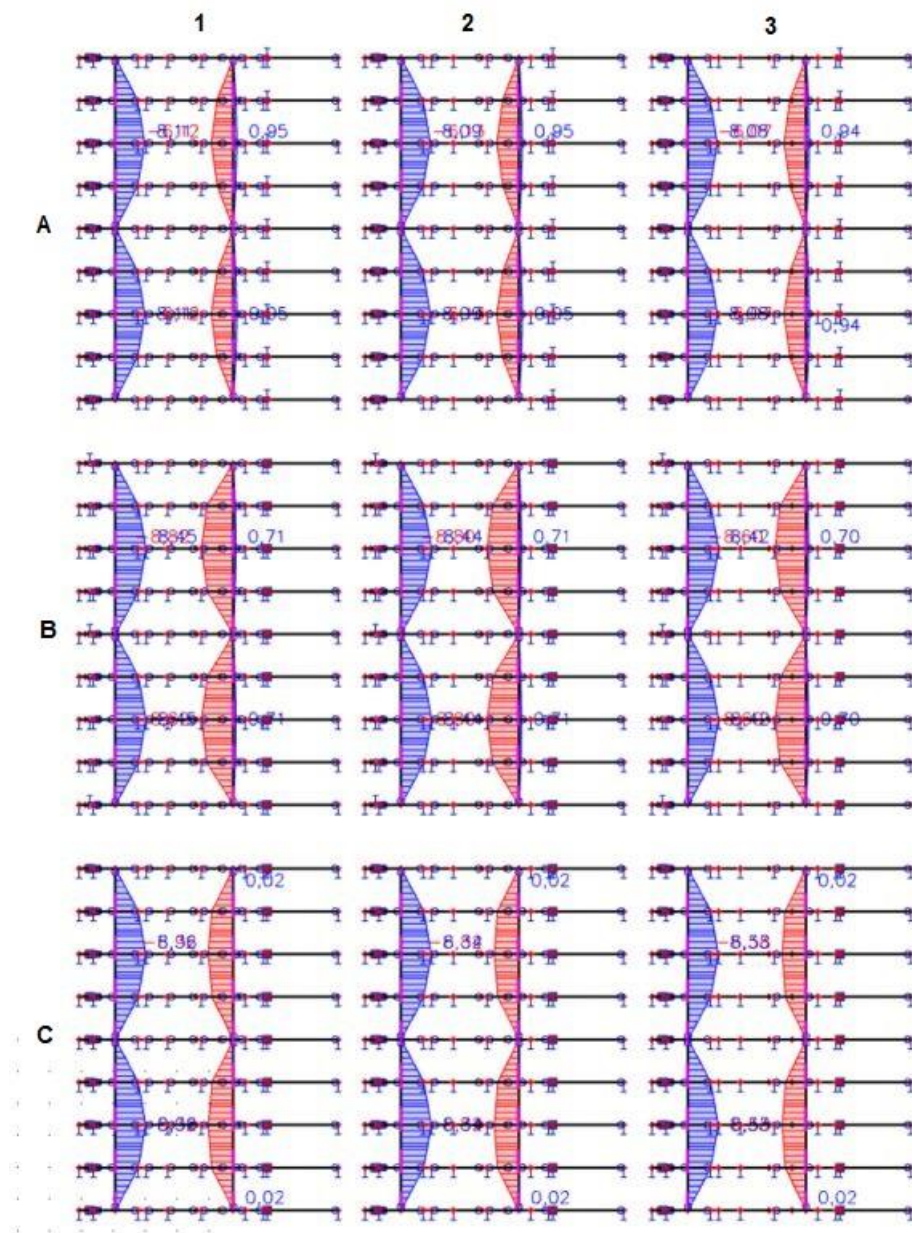
Obr. č. 96 Posouvající síly ve výměnách modelů ve směru osy Y prvku

V_z



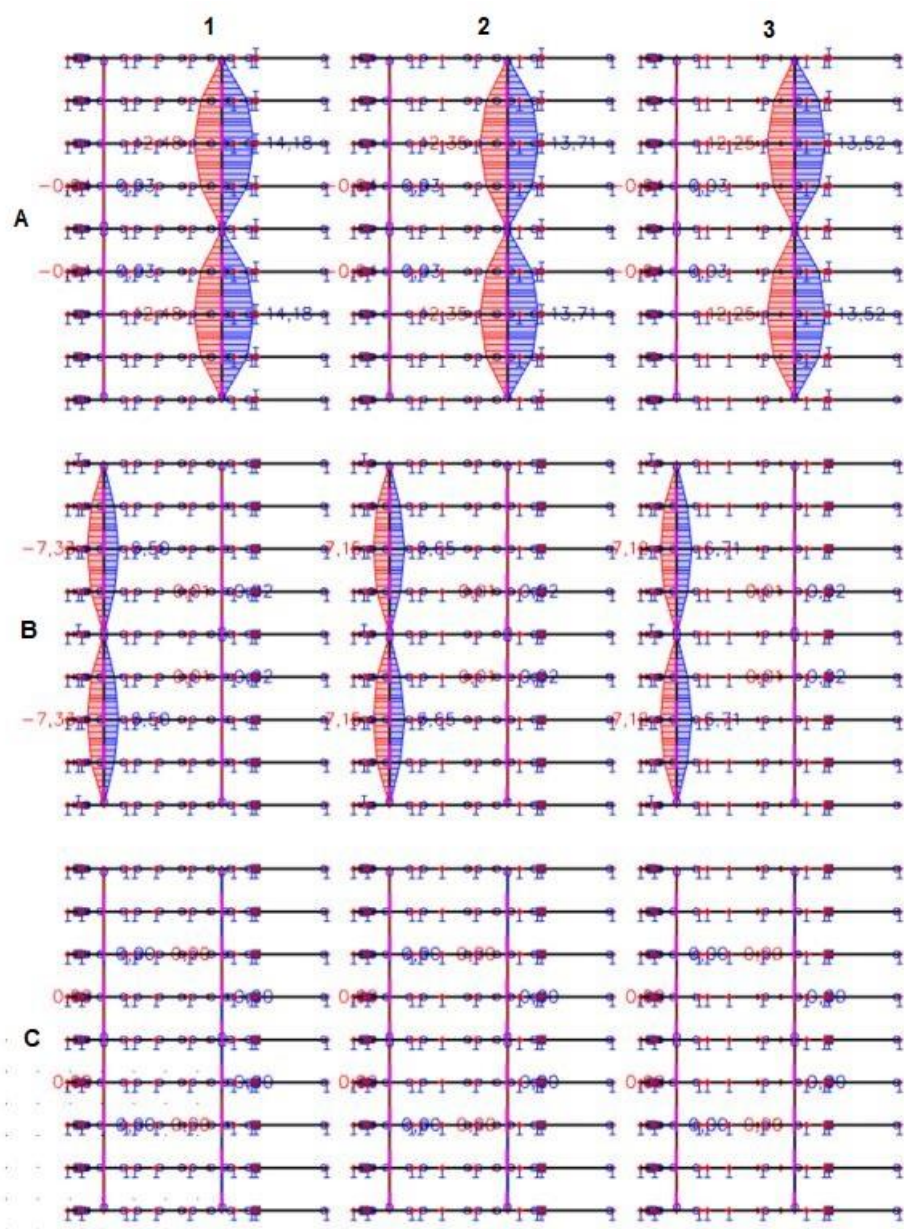
Obr. č. 97 Posouvající síly ve výměnách modelů ve směru osy Z prvku

M_y



Obr. č. 98 Ohybové momenty ve výměnách k ose Y prvku

M_z



Obr. č. 99 Ohybové momenty ve výměnách k ose Z prvku

| Výměna 1 | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-----------------------------------|-----------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| N_x tah [kN] | | | | | | | |
| model A | 4020,000+ | 6 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | | 5 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model C | | 5 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| N_x tlak [kN] | | | | | | | |
| model A | 1340,000+ | 6 | -0,01 | -0,03 | 300% | -0,04 | 400% |
| model B | | | -0,02 | -0,03 | 150% | -0,04 | 200% |
| model C | | | -0,02 | -0,03 | 150% | -0,04 | 200% |

| V _y [kN] | | | | | | | |
|-----------------------|-----------|---|-------|-------|------|-------|------|
| model A | 1340,000+ | 6 | 0,04 | 0,04 | 100% | 0,04 | 100% |
| model B | 0,000 | 8 | -4,27 | -4,17 | 98% | -4,16 | 97% |
| model C | | | 0 | 0 | - | 0 | - |
| V _z [kN] | | | | | | | |
| model A | 5360,000 | 6 | -4,8 | -4,8 | 100% | -4,79 | 100% |
| model B | | | -4,98 | -4,98 | 100% | -4,97 | 100% |
| model C | | | -4,93 | -4,93 | 100% | -4,92 | 100% |
| M _y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 2680,000+ | 6 | 8,11 | 8,09 | 100% | 8,08 | 100% |
| model B | | | 8,45 | 8,44 | 100% | 8,42 | 100% |
| model C | | | 8,36 | 8,34 | 100% | 8,33 | 100% |
| M _z [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 1340,000- | 6 | -0,04 | -0,04 | 100% | -0,04 | 100% |
| model B | 2680,000- | 8 | -7,33 | -7,15 | 98% | -7,12 | 97% |
| model C | | | 0 | 0 | - | 0 | - |

| Výměna 2 | x | MSÚ | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|--------------------------|-----------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| N _x tah [kN] | | | | | | | |
| model A | 1340,000+ | 4 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| model B | | 8 | 0,01 | 0 | - | 0 | - |
| model C | | 4 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| N _x tlak [kN] | | | | | | | |
| model A | 1340,000+ | 8 | -0,02 | -0,02 | 100% | -0,01 | 50% |
| model B | | 6 | -0,02 | -0,02 | 100% | -0,02 | 100% |
| model C | | 6 | -0,02 | -0,02 | 100% | -0,02 | 100% |
| V _y [kN] | | | | | | | |
| model A | 0,000 | 6 | 8,4 | 8,15 | 97% | 8,05 | 96% |
| model B | | 8 | 0,02 | 0,02 | 100% | 0,02 | 100% |
| model C | | | 0 | 0 | - | 0 | - |
| V _z [kN] | | | | | | | |
| model A | 4020,000+ | 8 | 3,56 | 3,57 | 100% | 3,53 | 99% |
| model B | | 6 | 5,65 | 5,64 | 100% | 5,51 | 98% |
| model C | | 6 | 4,65 | 4,59 | 99% | 4,45 | 96% |
| M _y [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 2680,000+ | 8 | -6,12 | -6,13 | 100% | -6,07 | 99% |
| model B | | 6 | -8,82 | -8,8 | 100% | -8,6 | 98% |
| model C | | 6 | -6,92 | -6,82 | 99% | -6,58 | 95% |
| M _z [kN.m] | | | | | | | |
| model A | 2680,000+ | 6 | 14,18 | 13,71 | 97% | 13,52 | 95% |
| model B | 1340,000- | 8 | 0,02 | 0,02 | 100% | 0,02 | 100% |
| model C | | | 0 | 0 | - | 0 | - |

Tab. č. 19 Porovnání vnitřních sil výměn modelů 1-3 v modelech podpor a-c

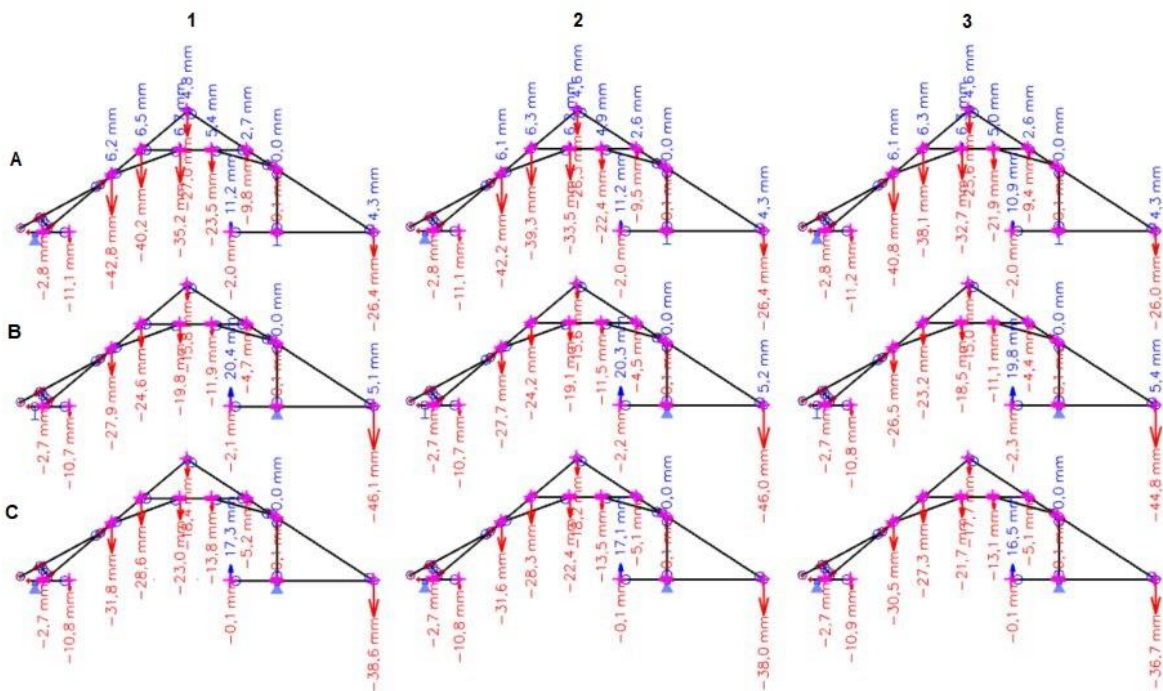
| KR1/KR2 [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|---------------|---------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| kladný | model A | 6 | 20,2 | 19,7 | 98% | 19 | 94% |
| | model B | 6 | 20 | 20,1 | 101% | 19,7 | 99% |
| | model C | 6 | 13,1 | 12,9 | 98% | 12,4 | 95% |
| záporný | model A | 3 | -5,2 | -5,1 | 98% | -5,1 | 98% |
| | model B | 3 | -7,4 | -7,3 | 99% | -7,4 | 100% |
| | model C | 4 | -0,1 | -0,2 | 200% | -0,2 | 200% |
| KR2/HAM [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
| kladný | model A | 6 | 31,4 | 30,6 | 97% | 29,5 | 94% |
| | model B | 6 | 27,7 | 27,6 | 100% | 26,9 | 97% |
| | model C | 6 | 21,7 | 21,4 | 99% | 20,6 | 95% |
| záporný | model A | 3 | -6,6 | -6,4 | 97% | -6,4 | 97% |
| | model B | 3 | -5,5 | -5,5 | 100% | -5,6 | 102% |
| | model C | 4 | -0,1 | -0,2 | 200% | -0,1 | 100% |
| KR2/SL [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
| kladný | model A | 6 | 37,8 | 36,7 | 97% | 35,6 | 94% |
| | model B | 6 | 30 | 29,9 | 100% | 29,2 | 97% |
| | model C | 6 | 25,1 | 24,7 | 98% | 23,9 | 95% |
| záporný | model A | 3 | -8,4 | -8,1 | 96% | -8,1 | 96% |
| | model B | 3 | -3,4 | -3,5 | 103% | -3,7 | 109% |
| | model C | - | - | - | - | - | - |
| SL/KRAT2 [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
| kladný | model A | 6 | 26,8 | 25,9 | 97% | 25,6 | 96% |
| | model B | 6 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| | model C | 6 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| záporný | model A | 3 | -23 | -22,7 | 99% | -22,5 | 98% |
| | model B | 3 | 0 | 0 | - | 0 | - |
| | model C | 4 | 0 | 0 | - | 0 | - |

Tab. č. 20 Porovnání vodorovných posunů uzlů modelů 1-3 v modelech podpor a-c – JV

Z tabulky lze vyčíst, že v hodnotách příčných posunů uzlů jalové vazby krovu není mezi modely spojů 1 – 3 téměř žádný rozdíl (max. 6 % u modelu A, u modelů B a C max. 5 %). Záporné posuny v modelu podpor C ve spojeních KR1/KR2 a KR2/HAM jsou velmi malé, proto je výrazný procentuální rozdíl mezi modely spojů 1 – 3 zanedbatelný.

V modelech podpor vznikají poměrně velké rozdíly v hodnotách příčných posunů.

U_z



Obr. č. 101 Svislé posuny vybraných uzlů v modelech jalové vazby

Porovnání svislých posunů uzlů mezi modely jalové vazby je uvedeno v následující tabulce:

| KR1/PS1 [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|--------------|---------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| kladný | model A | 3 | 6,2 | 6,1 | 98% | 6,1 | 98% |
| | model B | - | - | - | - | - | - |
| | model C | - | - | - | - | - | - |
| záporný | model A | 6 | -42,8 | -42,2 | 99% | -40,8 | 95% |
| | model B | 6 | -27,9 | -27,7 | 99% | -26,5 | 95% |
| | model C | 6 | -31,8 | -31,6 | 99% | -30,5 | 96% |
| KR1/KR2 [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
| kladný | model A | 3 | 4,8 | 4,6 | 96% | 4,6 | 96% |
| | model B | - | - | - | - | - | - |
| | model C | - | - | - | - | - | - |
| záporný | model A | 6 | -27 | -26,3 | 97% | -25,6 | 95% |
| | model B | 5 | -15,8 | -15,6 | 99% | -15 | 95% |
| | model C | 6 | -18,4 | -18,2 | 99% | -17,7 | 96% |
| PS1/HAM [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
| kladný | model A | 3 | 6,7 | 6,2 | 93% | 6,3 | 94% |
| | model B | - | - | - | - | - | - |
| | model C | - | - | - | - | - | - |
| záporný | model A | 6 | -35,2 | -33,5 | 95% | -32,7 | 93% |
| | model B | 5 | -19,8 | -19,1 | 96% | -18,5 | 93% |
| | model C | 6 | -23 | -22,4 | 97% | -21,7 | 94% |

| KR2/HAM [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
|-----------------|---------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| kladný | model A | 3 | 2,7 | 2,6 | 96% | 2,6 | 96% |
| | model B | - | - | - | - | - | - |
| | model C | - | - | - | - | - | - |
| záporný | model A | 6 | -9,8 | -9,5 | 97% | -9,4 | 96% |
| | model B | 7 | -4,7 | -4,5 | 96% | -4,4 | 94% |
| | model C | 6 | -5,2 | -5,1 | 98% | -5,1 | 98% |
| KR2/KRAT2 [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
| kladný | model A | 4 | 4,3 | 4,3 | 100% | 4,3 | 100% |
| | model B | 3 | 5,1 | 5,2 | 102% | 5,4 | 106% |
| | model C | - | - | - | - | - | - |
| záporný | model A | 8 | -26,4 | -26,4 | 100% | -26 | 98% |
| | model B | 6 | -46,1 | -46 | 100% | -44,8 | 97% |
| | model C | 6 | -38,6 | -38 | 98% | -36,7 | 95% |
| VYM2/KRAT2 [mm] | | MSP | model 1 | model 2 | 2/1 [%] | model 3 | 3/1 [%] |
| kladný | model A | 7 | 11,2 | 11,2 | 100% | 10,9 | 97% |
| | model B | 6 | 20,4 | 20,3 | 100% | 19,8 | 97% |
| | model C | 6 | 17,3 | 17,1 | 99% | 16,5 | 95% |
| záporný | model A | 4 | -2 | -2 | 100% | -2 | 100% |
| | model B | 3 | -2,1 | -2,2 | 105% | -2,3 | 110% |
| | model C | 4 | -0,1 | -0,1 | 100% | -0,1 | 100% |

Tab. č. 21 Porovnání svislých posunů uzlů modelů 1-3 v modelech podpor a-c – JV

Také u hodnot svislých posunů je vidět, že mezi modely spojů 1 – 3 zkoumaného krovu není velký rozdíl (max. 10 %).

V modelech podpor vznikají poměrně velké rozdíly v hodnotách svislých posunů.

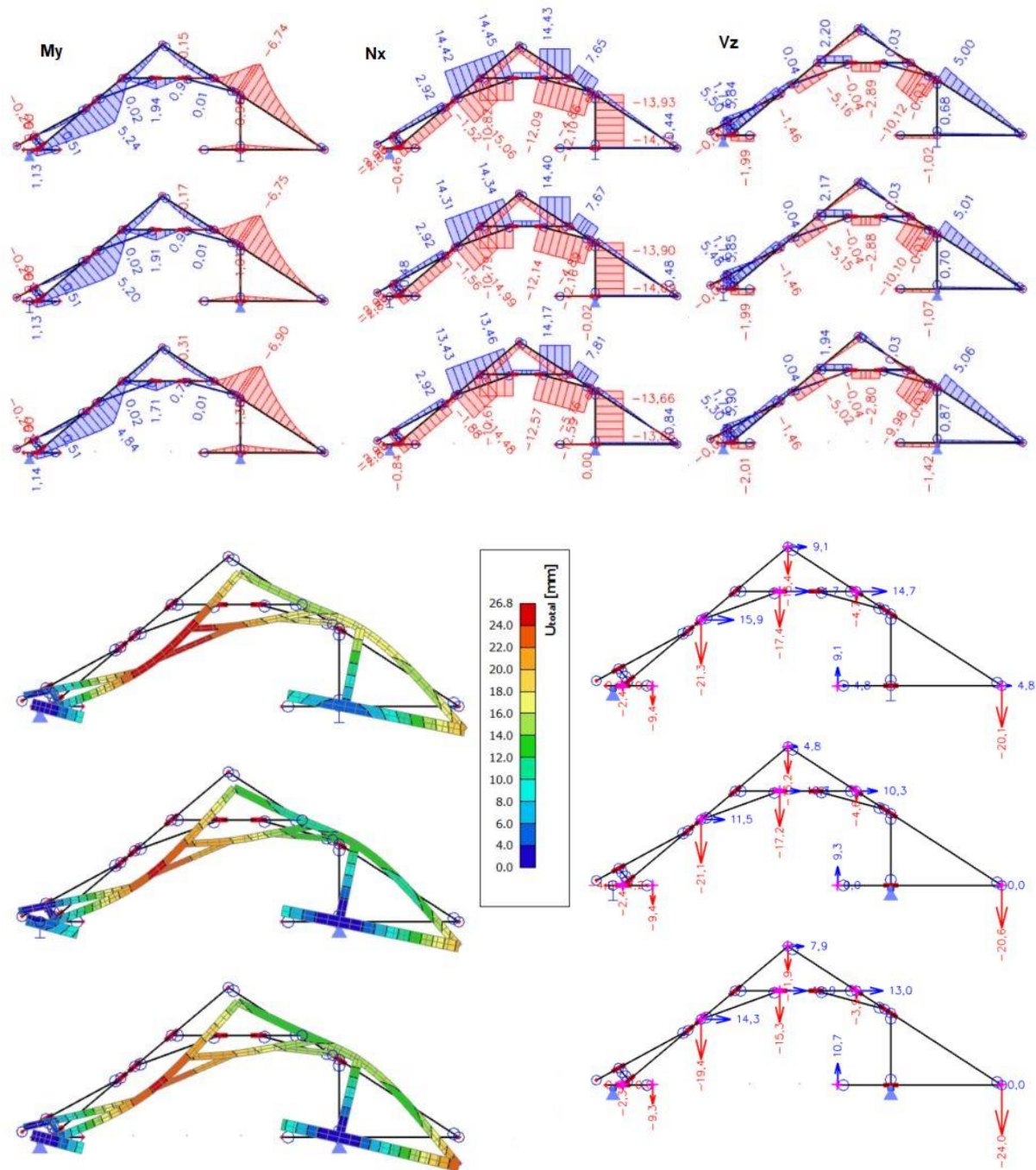
7.2.2 Deformace konstrukce

Z předchozí podkapitoly je patrné, že rozdíl v deformacích mezi modely spojů je bezvýznamný, proto bude v této podkapitole vysvětleno chování konstrukce v různých modelech podpor na modelu s kloubovými spoji. MSP2 A MSP5 vykazují podobný tvar deformované konstrukce jako MSP6 s obdobnou hodnotou celkové deformace (maximální je u MSP 6), MSP3 a MSP7 vykazují podobný tvar deformované konstrukce jako MSP8 s blízkými hodnotami celkové deformace (max. u MSP8), proto jsou pro grafické zobrazení deformace konstrukce zvoleny vyznačené mezní stavy únosnosti:

| mezní stav | q ₁ | q ₂ | vzorec f _d = | alternativně f _d = |
|------------|----------------|----------------|--|-------------------------------|
| MSP1 | sníh | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,s}$ | ZS1 + ZS2 + ZS3 |
| MSP2 | vítr zleva | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,L}$ | ZS1 + ZS2 + ZS4 |
| MSP3 | vítr zprava | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,P}$ | ZS1 + ZS2 + ZS5 |
| MSP4 | vítr podélný | - | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,90}$ | ZS1 + ZS2 + ZS6 |
| MSP5 | sníh | vítr zleva | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,s} + \Psi_{0,w} * q_{k,w,L}$ | ZS1 + ZS2 + ZS3 + 0,6*ZS4 |
| MSP6 | vítr zleva | sníh | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,L} + \Psi_{0,s} * q_{k,s}$ | ZS1 + ZS2 + ZS4 + 0,5*ZS3 |
| MSP7 | sníh | vítr zprava | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,s} + \Psi_{0,w} * q_{k,w,P}$ | ZS1 + ZS2 + ZS3 + 0,6*ZS5 |
| MSP8 | vítr zprava | sníh | $g_{k,vt} + g_{k,sk} + q_{k,w,P} + \Psi_{0,s} * q_{k,s}$ | ZS1 + ZS2 + ZS5 + 0,5*ZS3 |

Tab. č. 22 Vybrané MSP pro grafické zobrazení deformované konstrukce

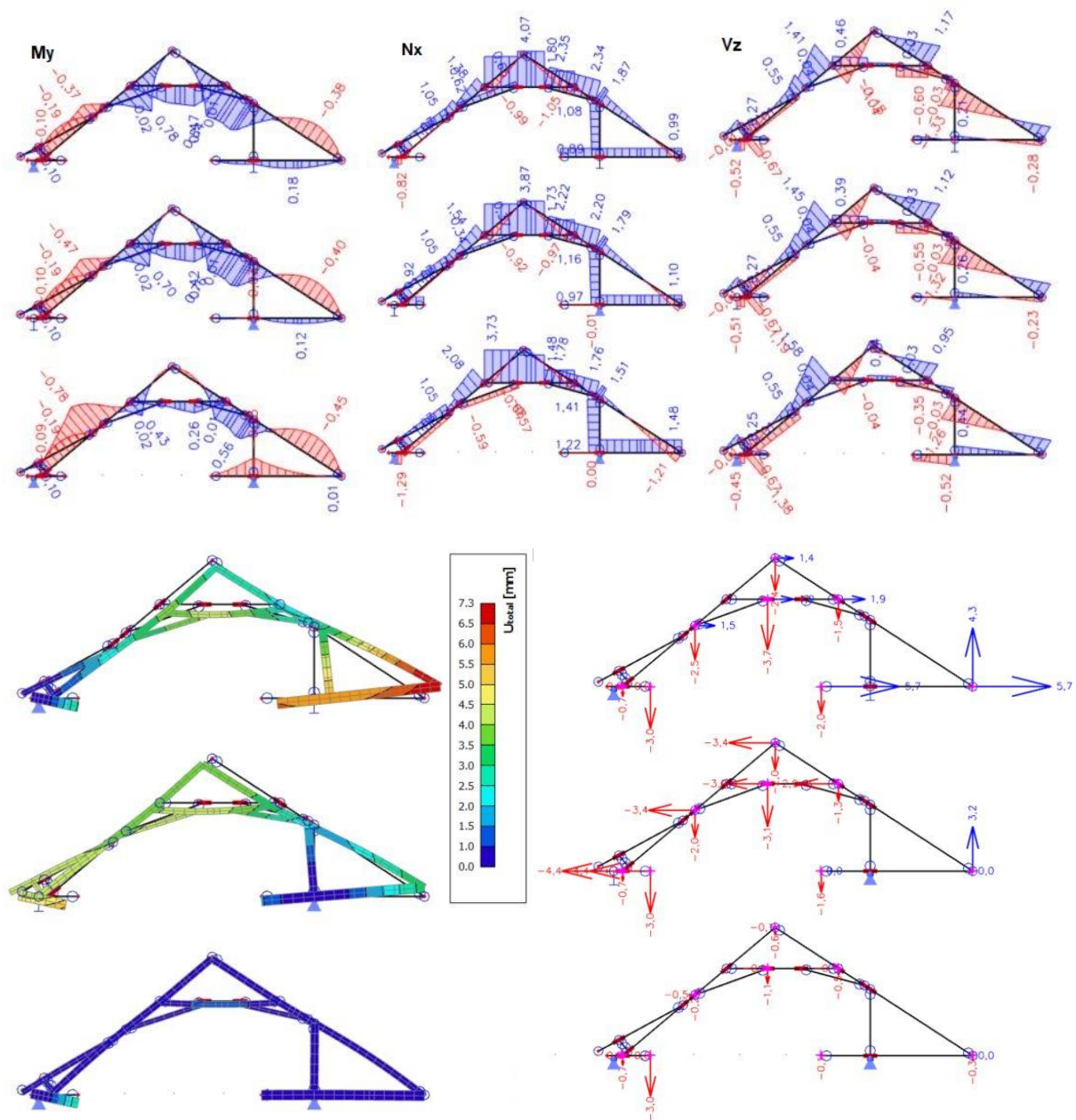
MSÚ1 a MSP1



Obr. č. 102 Vnitřní síly od MSÚ1 a deformace jalové vazby konstrukce pod kombinací zatížení MSP1 - sněh

Při zatížení MSP1 nevznikají velké rozdíly v deformacích mezi modely podpor A – C, protože vodorovné síly od svislého zatížení sněhem, krytinou a vlastní tíhou dobře přebírají hambalky a vazné trámy v plných vazbách. Jiné vodorovné síly v tomto mezním stavu nevznikají, proto posuvnost podpor v příčném směru nehraje velkou roli, pouze malý příčný posun v uvolněné podpoře směrem ven z konstrukce lehce kompenzuje svislý posun napojení pravé krokve a krátkčete. Tvar průběhu vnitřních sil je ve všech modelech stejný, hodnoty se liší jen nepatrně.

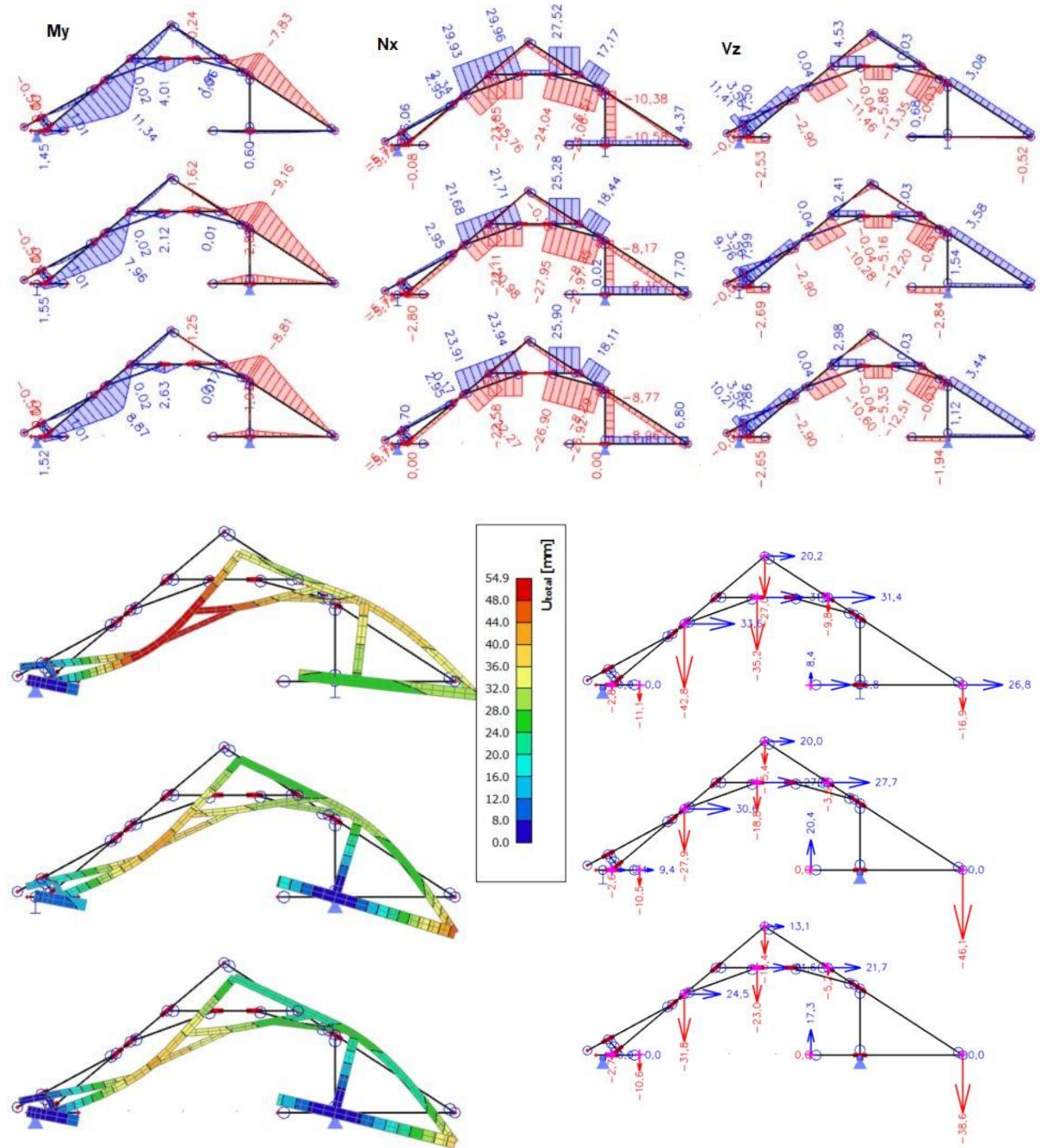
MSÚ4 a MSP4



Obr. č. 103 Vnitřní síly od MSÚ4 a deformace jalové vazby konstrukce pod kombinací zatížení MSP4 – podélný vítr

V kombinaci zatížení č. 4 není uvažováno zatížení sněhem. V modelech podpor A a B způsobuje zatížení podélným větrem oddálení podpor od sebe, a tedy roztahování vazby krovu směrem ven z konstrukce v místě uvolněné podpory, kde dochází k vodorovnému posunu, který je větší v modelu A, protože je umožněn větší posun hambalku, zatímco v modelu B tento posun zmenšuje ztužení pravého rohu sloupem. Vodorovný posun způsobuje větší kladné ohybové momenty na krokvičích a hambalku, a naopak menší záporné ohybové momenty na krokvičích oproti modelu C. Ve vrcholu krokvič v modelech A a B téměř nevznikají záporné momenty, v modelu C jsou ztelnější. V pravém krátketi vzniká v modelu A pouze kladný ohybový moment v polích i nad podporou, v modelu B je nad podporou malý záporný moment a v polích jsou kladné momenty, v modelu C vzniká nad podporou poměrně větší záporný moment a pouze nepatrný kladný moment v pravém poli.

MSÚ6 a MSP6

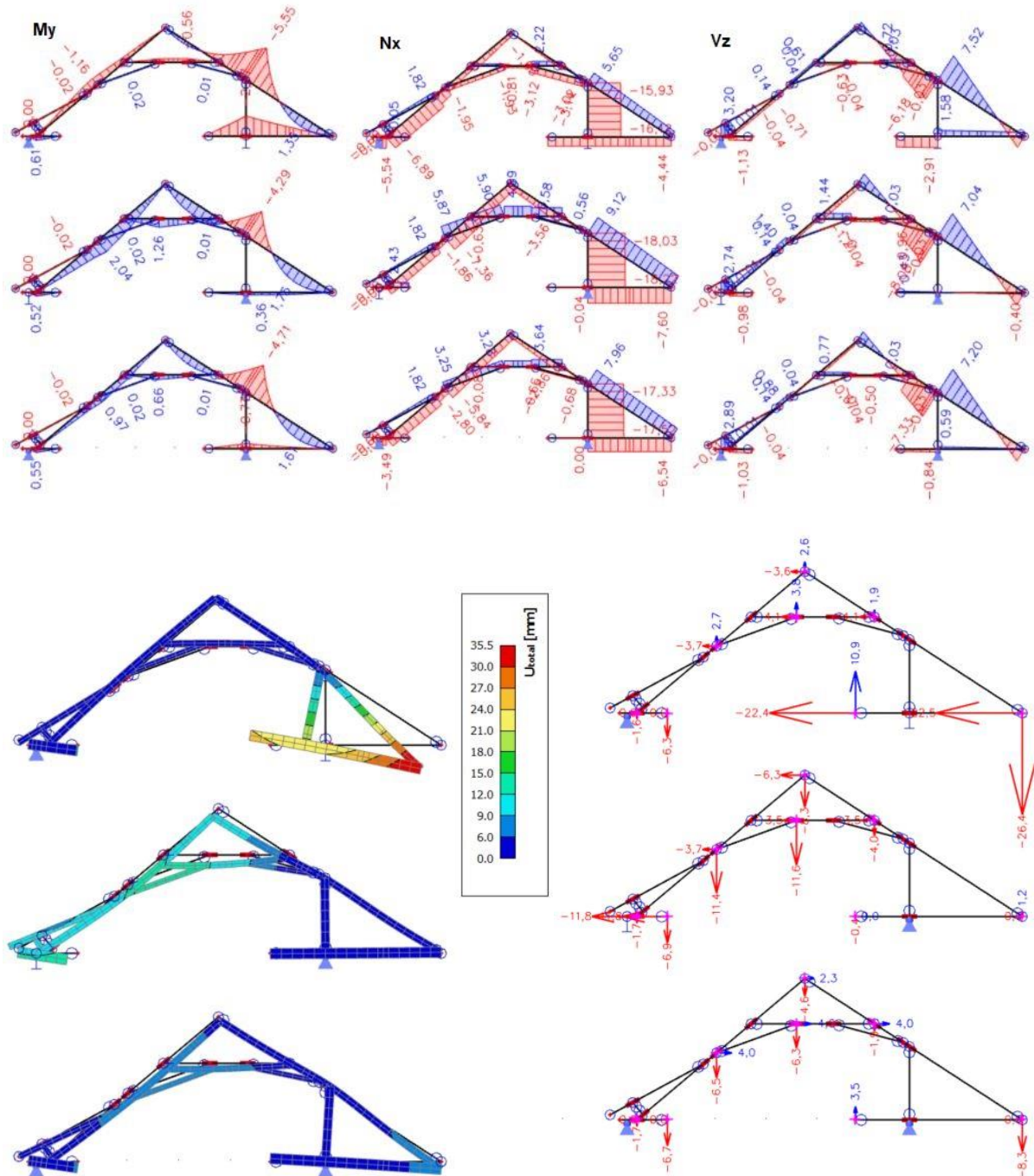


Obr. č. 104 Vnitřní síly od MSÚ6 a deformace jalové vazby konstrukce pod kombinací zatížení MSP6 – sníh a vítr zleva

V modelu A způsobuje vítr zleva velký posun pravé podpory směrem ven z konstrukce, což má za následek výrazný průhyb levé krokve, která je podepřena pouze hambalkem s páskem, které se i v důsledku tahu větru na pravé straně posouvají ještě víc doprava. Zároveň ale posun pravé strany konstrukce kompenzuje svislý posun spojení pravé krokve a krátkčete, který je v modelech B a C mnohem větší kvůli vzniku pevného bodu otáčení v pravé podpoře. Tento svislý posun je největší v modelu B, kde v důsledku tlaku větru na levou stranu a posunu levé podpory směrem dovnitř konstrukce dochází k většímu posunu hambalku doprava oproti modelu C, což způsobuje větší pootočení okolo pravé podpory. Vnitřní síly mají podobný tvar průběhu, pouze v modelu A vzniká na pravém krátkčeti kladný ohybový moment v důsledku posunu pravé podpory, zatímco v modelech B a

C kvůli neposuvné podpoře vzniká na pravém krátkěti záporný moment. V hodnotách vnitřních sil je poměrně velký rozdíl mezi modely B a C a modelem A, kde následkem výše popsaného chování konstrukce vzniká poměrně větší kladný moment na levé krokvi a tah na levém pásku.

MSÚ8 a MSP8



Obr. č. 105 Vnitřní síly od MSÚ8 a deformace jalové vazby konstrukce pod kombinací zatížení MSP8 – sníh a vítr zprava

Při zatížení větrem zprava dochází v modelu A k posunu pravé podpory směrem dovnitř konstrukce, pravý roh se otáčí okolo bodu v místě podpory krokve sloupkem, takže vzniká velký svislý posun směrem dolů v místě napojení pravé krokve s krátkětem. To má také spolu s posunem hambalku a levého pásku doleva za následek vznik záporného momentu na levé krokvi v modelu A oproti

modelům B a C, kde jsou levé krokve namáhány kladným ohybovým momentem, výrazně větším v modelu B. Také v hambalku vzniká záporný moment oproti modelům B a C, kdy v modelu B vzniká výrazně větší kladný moment. Při uvolnění levé podpory v modelu B se vzdálenost mezi podporami zvětšuje a vlivem tahu na levou stranu krovu dochází k mírnému nadzvedávání pravého rohu, což má za následek vznik kladného momentu na pravém krátkěti oproti modelům A a C. V modelech A a B dochází k celkovému vodorovnému posunu doleva kvůli uvolnění podpor, zatímco v modelu C je posun doprava kvůli kladnému otočení pravého rohu okolo pravé podpory, přičemž v podporách není umožněn žádný vodorovný posun. V modelech B a C dochází k celkovému svislému posunu horních uzlů konstrukce směrem dolů vlivem oddálení podpor v modelu B a kvůli poklesu pravého rohu v modelu C, zatímco v modelu A vlivem přiblížení podpor vznikají v uzlech posuny směrem nahoru.

7.3 Vyhodnocení vhodného modelu podpor

Z porovnání modelů podpor vyplývá:

- 1) Rozdíly mezi modely s uvolněnými podporami A a B vyplývají z asymetrie vazeb krovu.
- 2) V hodnotách vodorovných reakcí v neposuvných podporách modelů A a B a více zatížené podpory modelu C v jalových vazbách není výrazný rozdíl.
- 3) V hodnotách vodorovných reakcí v plných vazbách jsou výrazné rozdíly mezi modely podpor z toho důvodu, že plná vazba v modelech s uvolněnými podporami přebírá skrz výměny příčné síly od jalových vazeb.
- 4) Tvar průběhu vnitřních sil v nesené části krovu (krokve, hambalek, pásky, sloupek) je ve všech modelech podobný, maxima vnitřních sil z obálky mezních stavů se nacházejí ve stejných bodech prvků.
- 5) Hodnoty vnitřních sil v nesené části krovu jsou vzájemně podobné v modelech B a C a poměrně se odlišují od hodnot v modelu A.
- 6) Průběh a hodnoty vnitřních sil v nesoucích částech krovu (vazný trám, krátkata a výměny) se v modelech vzájemně poměrně odlišují, především hodnoty normálových sil na poli mezi podporami ve vazném trámu, které jsou největší v modelu A, menší v modelu B a v modelu C v poli mezi podporami vůbec normálové síly nevznikají. Dále se odlišují mezi modely posouvající síly a hlavně moment k ose Z ve výměnách.
- 7) V modelu C nedochází k žádnému příčnému posunu, v modelu B je maximální příčný posun v podpoře 11,8 mm ven z konstrukce, v modelu A vychází maximální příčný posun 26,8 mm ven z konstrukce.
- 8) V modelu A vznikají v různých mezních stavech větší deformace než v modelech B a C, kde jsou hodnoty deformací podobné.

V kapitole Modely konstrukce bylo vysvětleno, že modely s posuvnými podporami slouží pro představu chování prvků konstrukce, pokud je v uložení umožněn posun, bez určování pružnosti podpor. V případě, že tření mezi pozednicí a zdívem není dostatečné pro zabránění posunutí pozednice po zdívu a pozednice musí být kotvena, pak může posun v podporách nastat ze dvou důvodů:

- 1) stlačení pozednice kolmo na vlákna v místě klapování vazného trámu nebo krátkete, nebo
- 2) posun pozednice po zdívu v důsledku ohybu okolo osy Z prvku mezi kotvícími body.

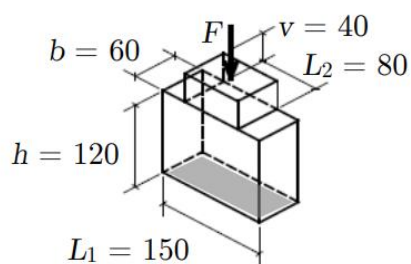
Posun pozednice není možný, protože je zazděná, takže buď musí vyhovět nadezdívka na příčné zatížení, nebo musí být navržené kotvení pozednice tak, aby nedocházelo k příčnému zatěžování nadezdívky, pokud není schopná tomuto zatížení vzdorovat. Vazný trám zazděný není, proto může v místě podpory docházet k jistému posunu v důsledku pružnosti dřeva kolmo na vlákna – kolmo na vlákna má dřevo menší pevnost a modul pružnosti než rovnoběžně s vlákny, proto nás zajímá

deformace v tomto směru, a tedy stlačení pozednice od vazného trámu, který je ve spoji namáhán rovnoběžně s vlákny.



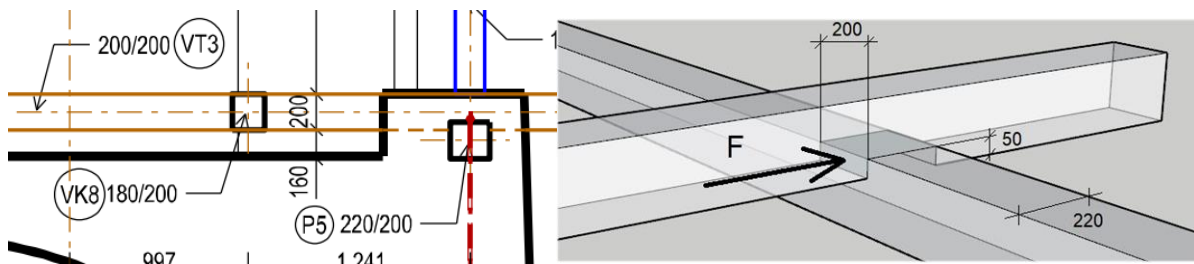
Obr. č. 106 Zazdění pozednice v krovu Krásná Hôrka

Tento posun ale bude s ohledem na pružnost a pevnost dřeva malý, což určitě nesplňuje model A, kde dochází k posunu v podpoře až 26,8 mm. V případě rozdělení tohoto posunu mezi obě podpory vychází stlačení dřeva v podpoře na 13,4 mm, což je pravděpodobně nereálná hodnota deformace před porušením dřeva a určitě nereálná hodnota pružné deformace kolmo k vláknům v daném spoji, proto je model podpor A nevhodný. V modelu B dochází k méně jak polovičnímu posunu oproti modelu A, 11,8 mm. Pokud bychom tento posun rozdělili mezi podpory a v každé zvažili posun 5,9 mm, tak by se z hlediska plasticity dřeva mohlo jednat o reálnou deformaci, ale v pružné oblasti se jedná stále o nereálnou hodnotu. Ke stanovení skutečné pružnosti dřeva v kámpování vazného trámu nebo krátcete přes pozednici by bylo třeba vytvořit numerický nebo analytický model spoje a výsledky výpočtu experimentálně ověřit, což není součástí této práce. V disertační práci Martina Hataje „Numerické a analytické modely tesařských spojů“ byly provedeny experimentální zkouška a numerický a analytický výpočet kolmého lípnutí na pevnost a deformaci v tlaku^[5] pro dřevo třídy C24. Výsledky této práce můžeme ukázat pro představu reálných deformací v obdobném způsobu namáhání v kontaktu dvou dřevěných ploch. Geometrie spoje byla následující:



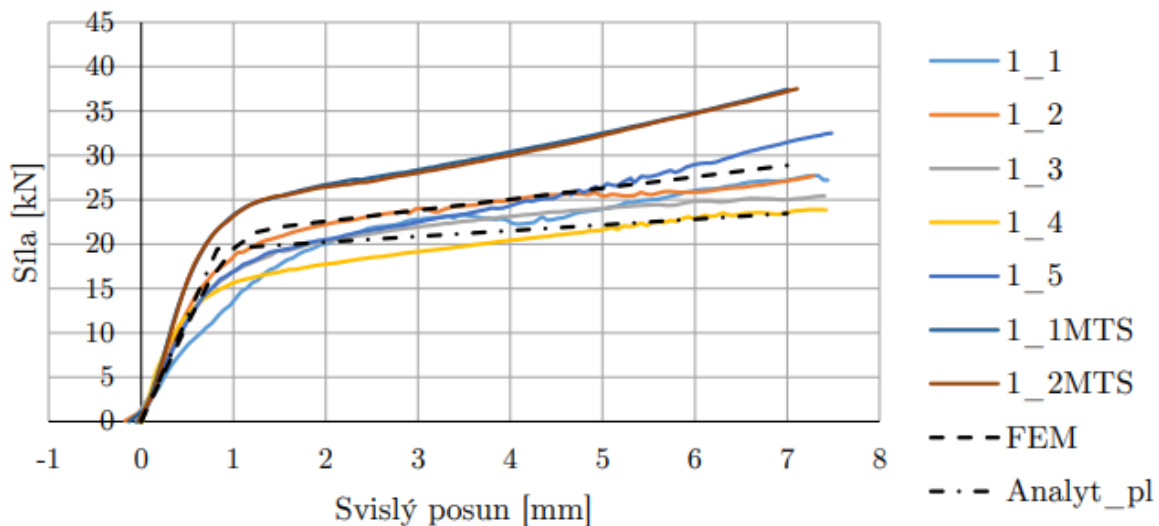
Obr. č. 107 Geometrie lípnutého spoje pro výpočet a experimentální ověření pevnosti a deformace v tlaku. Zdroj: [5]

Geometrie karpování ve zkoumané části krovu Krásná Hôrka není jasná, ale budeme uvažovat karpování jednostranným přeplátováním s hloubkou zářezu $\frac{1}{4}$ výšky horního prutu:



Obr. č. 108 Karpování vazného trámu na pozednici

Otlačovaná plocha v práci [5] má obsah $0,06 \times 0,08 \text{ m} = 0,0048 \text{ m}^2$, otlačovaná plocha pozednice v krovu je $0,05 \times 0,1 = 0,005 \text{ m}^2$. Výsledkem výpočtů a experimentu v disertační práci [5] jsou závislosti aplikované tlakové síly na posunu, které jsou navzájem velmi podobné a ukazují, že v lineární oblasti dochází ke stlačení méně jak 1 mm, v plastické oblasti nedochází k porušení dřeva ani při posunu o hodnotě 7 mm, experiment byl ukončen ještě před porušením dřeva. Průměrná lineární tuhost spoje v tlaku kolmo na vlákna je $22,8 \text{ MN/m}^{[5]}$.



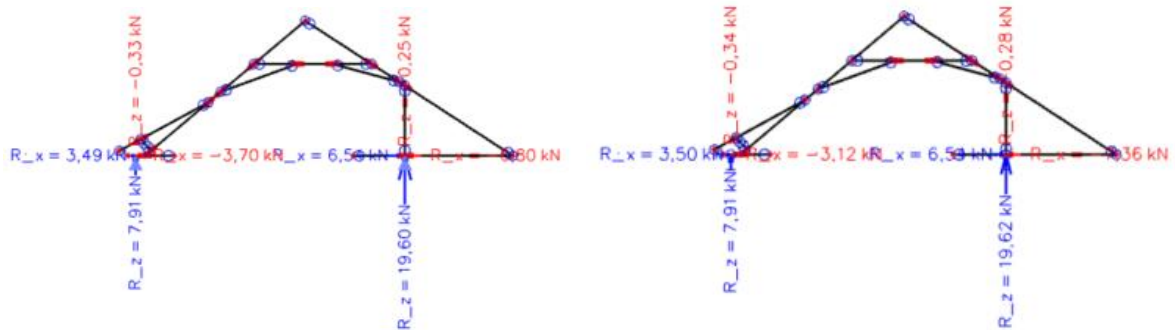
Obr. č. 109 Výsledky numerického a analytického pružno-plastického modelu a experimentálního testu lípnutého spoje. Zdroj: [5]

Pro použití těchto výsledků v úvaze o pružném modelování podpor ve zkoumaném krovu je třeba připomenout, že vazný trám, krátkata i pozednice nejsou vyrobeny ze dřeva třídy C24 jako modely v práci [5], ale z dubového dřeva třídy D40, které má větší pevnost v tlaku a modul pružnosti kolmo na vlákna. Také při výpočtu dle Eurokódu považujeme za pevnost v tlaku hodnotu maximálního zatížení v lineární oblasti chování dřeva a na tuto pevnost dimenzujeme průřezy prvků. Proto je pro porovnání vnitřních sil v modelu pevných podpor C s vnitřními silami v modelu s pružnými podporami zvolen maximální posun v podpoře 1 mm. Skutečnou tuhost spoje neznáme, ale pomocí výpočetního programu můžeme upravovat příčnou tuhost podpor do té doby, než dosáhneme zvolené mezní deformace. Maximálního posunu 1 mm je dosaženo v pravé podpoře v MSP6 při zvolené tuhosti podpor 5 MN/m. Vzhledem k informacím uvedeným výše bude tuhost v podporách pravděpodobně násobně vyšší a zatížení vyvolá mnohem menší deformaci, ale je vhodné zvolit pro porovnání vnitřních sil extrémní případ, který ovšem není tak extrémní jako uvolnění jedné nebo druhé podpory.

Porovnání vnitřních sil v kloubovém modelu s pevnými a pružnými podporami

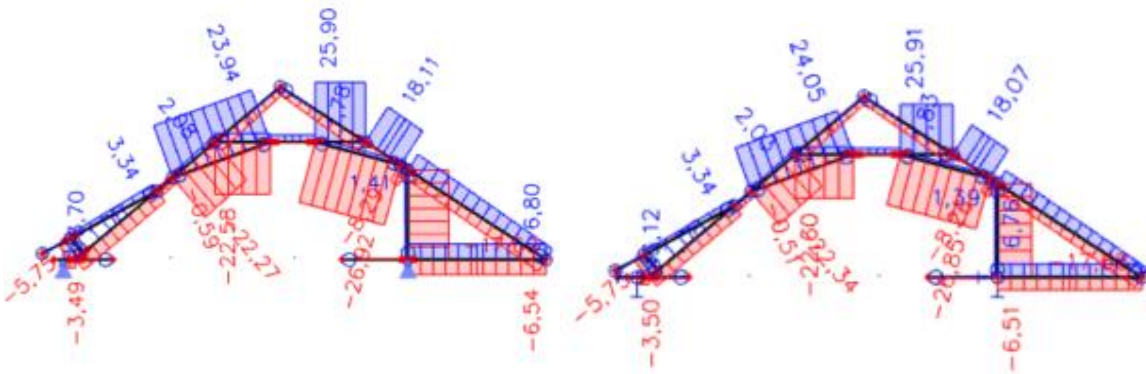
Opět budou porovnávány vnitřní síly a reakce z obálky všech MSÚ.

Reakce v JV



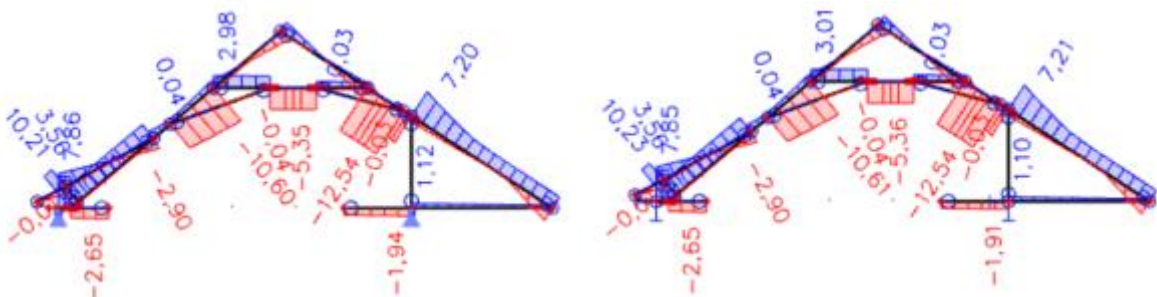
Obr. č. 110 Porovnání reakcí v jalové vazbě kloubového modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

Nx v JV



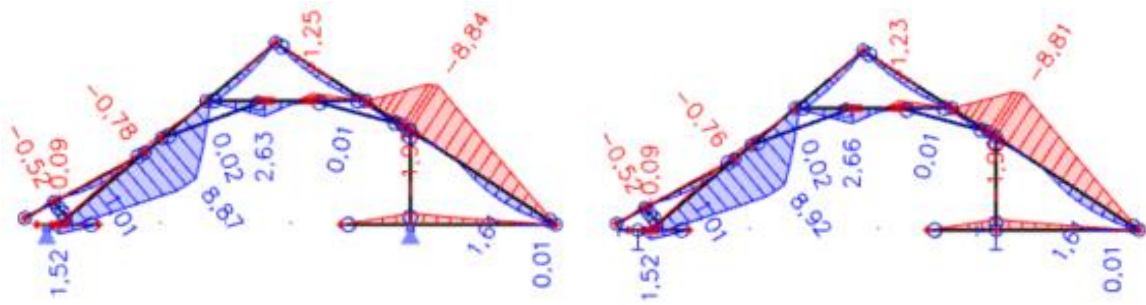
Obr. č. 111 Porovnání normálových sil v jalové vazbě v kloubovém modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

Vz v JV



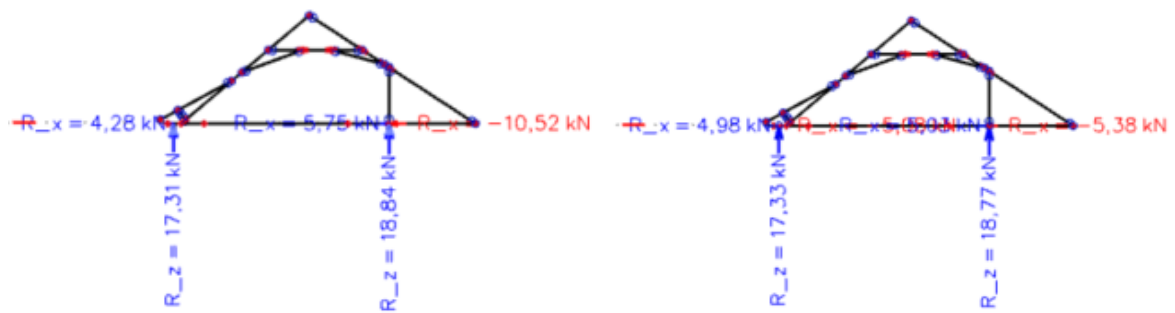
Obr. č. 112 Porovnání posouvajících sil v jalové vazbě v kloubovém modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

My v JV



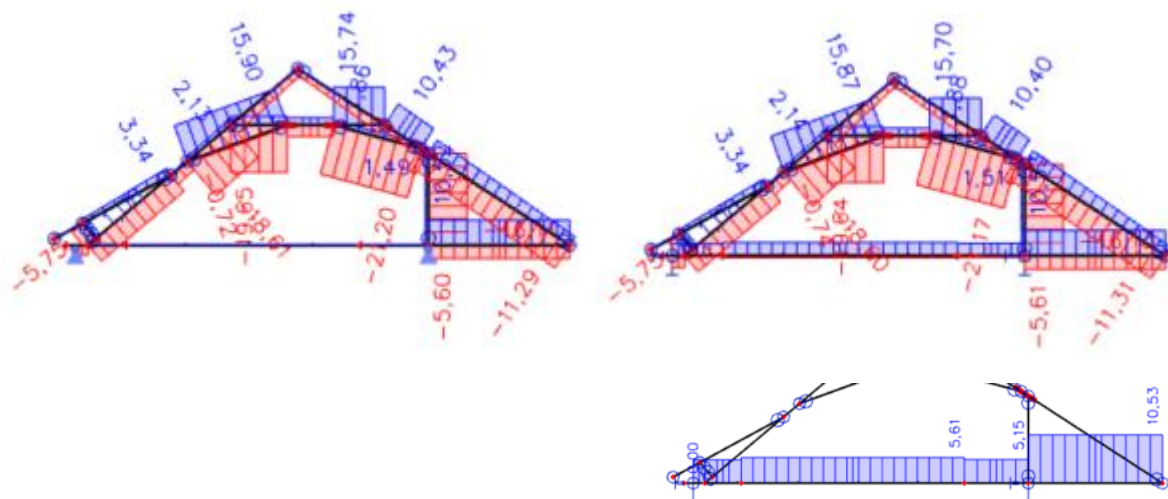
Obr. č. 113 Porovnání ohybových momentů v jalové vazbě v kloubovém modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

Reakce v PV



Obr. č. 114 Porovnání reakcí v plné vazbě kloubového modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

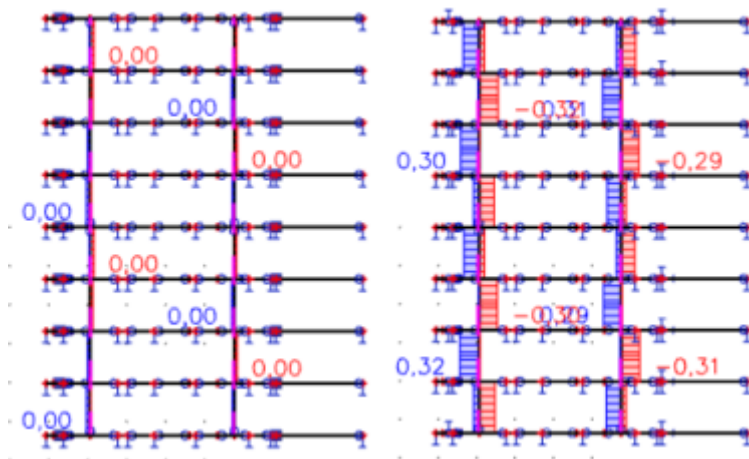
Nx v PV



Obr. č. 115 Porovnání normálových sil v plné vazbě v kloubovém modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

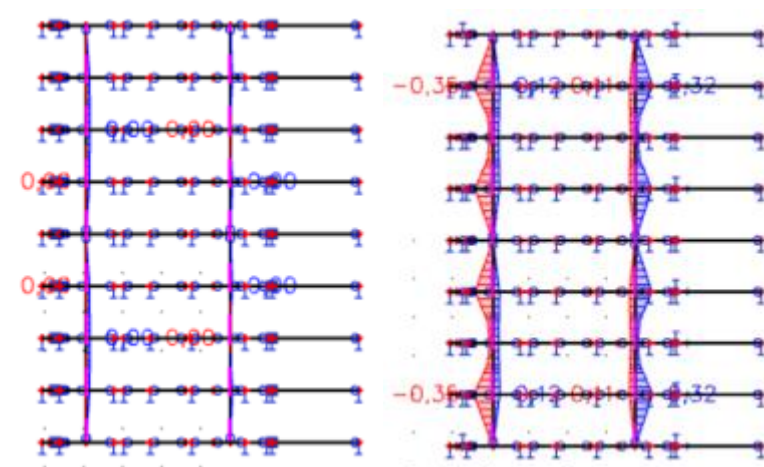
Posouvající síly a ohybové momenty jsou v plných vazbách mezi modely velmi podobné stejně jako u jalové vazby.

Vy ve výměnách



Obr. č. 116 Porovnání posouvajících sil k ose Y ve výměnách v kloubovém modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

Mz ve výměnách



Obr. č. 117 Porovnání ohybových momentů k ose Z ve výměnách v kloubovém modelu s pevnými podporami (vlevo) a modelu s pružnými podporami o tuhosti 5 MN/m (vpravo)

Normálové síly, posouvající síly k ose Z a ohybové momenty k ose Y jsou ve výměnách mezi modely velmi podobné.

Z porovnání vnitřních sil v modelech s pevnými a pružnými podporami můžeme vidět, že hodnoty v nesených prvcích krovu (krokve, hambalek, pásky a sloupek) se prakticky nemění. Pro posouzení těchto prvků je tedy vhodný model podpor C. Ve vazném trámu v plné vazbě je ovšem viditelný rozdíl v hodnotách normálových sil, kdy v poli mezi podporami normálové síly v modelu C nevznikají, zatímco v modelu s pružnými podporami je vazný trám v poli namáhán kromě posouvajících sil a ohybových momentů také normálovými silami. Také ve výměnách vznikají oproti modelu s pevnými podporami posouvající síly k ose Y a ohybové momenty k ose Z. Nejvýraznější rozdíl je ve vodorovných reakcích v podporách plné vazby, kdy v modelu s pevnými podporami přebírá vodorovné síly téměř kompletně pravá podpora (levá 0,02 kN a pravá -10,52 kN v MSÚ6), zatímco v modelu s pružnými podporami jsou vodorovné reakce v plné vazbě rovnoměrně rozdělené mezi obě podpory (levá -5,08 kN a pravá -5,38 kN v MSÚ6). Naopak v podporách jalové vazby vznikají menší vodorovné síly v uložení v modelu s pevnými podporami (levá -3,7 kN a pravá -6,8 kN v MSÚ6)

než v modelu s podporami s tuhostí 5 MN/m (levá 3,5 kN v MSÚ8 a pravá -7,36 v MSÚ6). V hambalkových krovech obecně vznikají velké vodorovné síly, které zatěžují spodní zdivo, nebo dokonce v případě zazděných pozednic horní nadezdívku a často způsobují její porušení^[20]. Z tohoto důvodu a z důvodu vyšetření účinků normálových sil a ohybového momentu na vazný trám se může zdát, že zabývat se vyhodnocením skutečné pružnosti uložení vazných trámů přes pozednice kámpováním je žádoucí. Takový postup by byl exaktní, ale zároveň časově náročný, takže vzniká otázka, jak velký by byl jeho přínos v kontrastu s náročností. Druhou možností je využití výsledku reakcí z pevného modelu podpor pro posouzení kámpování a zdiva a vytvoření modelu pružných podpor dle maximální zvolené přípustné deformace pro získání normálové síly ve vazném trámu pro jeho posouzení na působení ohybu v kombinaci s normálovými silami. Tento postup by měl poskytnout hodnoty reakcí v podporách a hodnoty normálových sil ve vazném trámu větší, než jsou ve skutečnosti, a proto je na straně bezpečnosti.

7.4 Posouzení kloubového modelu

7.4.1 Materiálové charakteristiky a součinitele

Materiálovým modelem je normový^[18] transverzálně izotropní model konstrukčního dřeva.

rostlé dřevo C24

| | | |
|--------------------|---------------------------|--|
| $f_{m,k}$ | 24 000 000 [Pa] | pevnost v ohybu |
| $f_{t,0,k}$ | 14 000 000 [Pa] | pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny |
| $f_{t,90,k}$ | 400 000 [Pa] | pevnost v tahu kolmo na vlákna |
| $f_{c,0,k}$ | 21 000 000 [Pa] | pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny |
| $f_{c,90,k}$ | 2 500 000 [Pa] | pevnost v tlaku kolmo na vlákna |
| $f_{v,k}$ | 4 000 000 [Pa] | pevnost ve smyku |
| $E_{0,mean}$ | 11 000 000 000 [Pa] | modul pružnosti rovnoběžně s vlákny |
| $E_{0,05}$ | 7 400 000 000 [Pa] | modul pružnosti rovnoběžně s vlákny, 5 % kvantil |
| $E_{90,mean}$ | 370 000 000 [Pa] | průměr modulu pružnosti kolmo na vlákna |
| $G_{90,mean}$ | 690 000 000 [Pa] | průměr modulu ve smyku |
| ρ_k | 350 [kg.m ⁻³] | charakteristická objemová hmotnost |
| ρ_{mean} | 420 [kg.m ⁻³] | průměrná objemová hmotnost |
| <i>součinitele</i> | | |
| γ_M | 1,3 [-] | vlastnosti rostlého dřeva |
| $k_{mod,w}$ | 0,9 [-] | vliv trvání zat. a vlhkosti; tř. provozu 2, krátkodobé zat.; EC tab. 3.1 |
| $k_{mod,s}$ | 0,8 [-] | vliv trvání zat. a vlhkosti; tř. provozu 2, střednědobé zat.; EC tab. 3.1 |
| k_{cr} | 0,67 [-] | souč. trhlin pro ún. ve smyku rostlého dřeva |
| k_{def} | 0,6 [-] | součinitel dotvarování; tř. provozu 1; EC tab. 3.2 |
| β_c | 0,2 [-] | součinitel pro výpočet vzpěrnosti pro rostlé dřevo; EC (6.29) |
| k_m | 0,7 [-] | redistribuce napětí a vliv nehomogenit materiálu v průřezu; EC (6.1.6 (2)) |
| μ_0 | 0,353 [-] | součinitel tření v klidu dřeva po dřevě |

7.4.2 Posudek vybraných prvků

Vybrané prvky budou posouzeny dle Eurokódu na účinky maximálních zatížení.^[19]

Mezní stav únosnosti

Za návrhové hodnoty vnitřních sil pro posudek průřezů a stability prvků budou brány hodnoty z modelu podpor C, který nejlépe vystihuje chování zkoumaného hambalkového krovu.

| Dílec | Tlak a ohyb a vzpěr | | | |
|----------|---------------------|----------|---------------------|-------------------------|
| | x | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] |
| Krokev 1 | 2046,640 | 6 (vítr) | 22 270 | 8 870 |
| Krokev 2 | 2453,907 | 5 (sníh) | 7 600 | 8 840 |
| Hambalek | 892,155 | 6 (vítr) | 22 580 | 2 630 |
| Pásek 1 | - | - | 0 | 0 |
| Pásek 2 | 812,173 | 6 (vítr) | 26 910 | 10 |

| Dílec | Tah a ohyb | | | | Smyk | | |
|----------|------------|----------|---------------------|-------------------------|----------|----------|-----------------------|
| | x | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] | x | MSÚ | V _{z,d} [kN] |
| Krokev 1 | - | - | 0 | 0 | 2935,272 | 6 (vítr) | 10 600 |
| Krokev 2 | 2308,636 | 6 (vítr) | 17 460 | 8 220 | 2308,636 | 5 (sníh) | 12 540 |
| Hambalek | 1620,302 | 6 (vítr) | 25 900 | 1 250 | - | - | 0 |
| Pásek 1 | 836,476 | 6 (vítr) | 23 940 | 10 | - | - | 0 |
| Pásek 2 | - | - | 0 | 0 | - | - | 0 |

Tab. č. 23 Vnitřní síly v prvcích jalové vazby modelu 1 pro posudek průřezů a stability

V tabulce je za číslem kombinace pro posouzení mezního stavu únosnosti uveden řídicí zatěžovací stav pro určení příslušného součinitele zohledňujícího vliv trvání zatížení a vlhkosti. Vítr je zatížení krátkodobé, sníh střednědobé.

Vzpěrné délky prutů je obtížné určit. Pro kroky byla jako vzpěrná délka pro vzpěr v rovině vazby zvolena polovina délky prvku, protože kroky je pevně uložena na krátkce v jednom vrcholu a v druhém se opírá o druhou krokev, ale zároveň je pevně spojena s páskem a hambalkem, čímž vzniká tuhý trojúhelník umožňující menší deformace. Proti vzpěru z roviny vazby jsou kroky zajištěné laťováním, případně by byly na základě stabilitního výpočtu zajištěny zavětrováním, proto je jako hodnota na straně bezpečnosti zvolena vzpěrná délka 1 m, ačkoliv rastr laťování je menší. Pro hambalek je vzpěrná délka pro vzpěr v rovině vazby daná spojením hambalku s kroky a pásky. Pro vzpěr z roviny je opět zvolena poloviční délka prutu kvůli spolupůsobení s pásky. Pásky mají pro vzpěr v rovině vazby i z její roviny vzpěrnou celou svou délku.

Oslabení prvků v místě tesařských spojů není při výpočtu vnitřních sil na konstrukci uvažováno, což do výpočtu vnáší jistou nepřesnost, předpokládáme ale, že rozdíl ve vnitřních silách nebude tak významný v poměru k jejich celkové velikosti. V posouzení prvků již oslabený průřez uvažován je.

Následující výpočet je ukázkovým výpočtem únosnosti dřevěného prutového prvku:

KROKEV 2

vlastnosti prvku

| | | | |
|----------------|------------|---|----------|
| L | 5,103 [m] | | |
| b | 0,120 [m] | | |
| h | 0,140 [m] | | |
| k _h | 1,0139 [-] | součinitel výšky min[(0,15/h) ^{0,2} ; 1,3] | EC (3.1) |

tlak rovnoběžně s vláknem

| | | | |
|------------------|--------------|-----|---------------------------------|
| x | 2453,907 [m] | MSÚ | 5 (sníh) |
| k _{mod} | 0,8 [-] | | |
| b | 0,075 [m] | | oslabený průřez, napojení pásky |
| N _d | 7 600 [N] | | |

| | | | |
|--|----------------------------|---|-----------|
| A | 0,0105 [m ²] | b*h | |
| $\sigma_{c,0,d}$ | 723 810 [Pa] | N_d/A | |
| $f_{c,0,d}$ | 12 923 077 [Pa] | $k_{mod}*(f_{c,0,k}/\gamma_M)$ | EC (2.14) |
| $\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d}$ | 0,06 vyhovuje | EC (6.2) | |
| <u>ohyb</u> | | | |
| $M_{y,d}$ | 8 840 [N.m] | | |
| W_y | 0,000245 [m ³] | $(1/6)*b*h^2$ | |
| $\sigma_{m,y,d}$ | 36 081 633 [Pa] | $M_{y,d}/W_y$ | |
| $f_{m,d}$ | 14 974 438 [Pa] | $k_h*k_{mod}*(f_{m,k}/\gamma_M)$ | |
| $\sigma_{m,y,d}/f_{m,d}$ | 2,41 nevyhovuje | EC (6.11) | |
| <u>kombinace ohybu a osového tlaku</u> | | | |
| $(\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2 + \sigma_{m,y,d}/f_{m,d}$ | 2,41 nevyhovuje | EC (6.19) | |
| <u>vzpěr sloupu za ohybu</u> - průhyb v rovině působení zatížení | | | |
| L | 2,552 [m] | | |
| $\beta_{L,y}$ | 1,0 [-] | | |
| $L_{cr,y}$ | 2,552 [m] | $\beta_{L,y} * L$ | |
| I_y | 0,000017 [m ⁴] | $(1/12)*b*h^3$ | |
| A | 0,0105 [m ²] | b*h | |
| i_y | 0,0404 [m] | $(I_y/A)^{1/2}$ | |
| λ_y | 63,13 [-] | $L_{cr,y}/i_y$ | |
| $\lambda_{rel,y}$ | 1,0705 [-] | $\lambda_y/\pi*(f_{c,0,k}/E_{0,05})^{1/2}$ | EC (6.21) |
| k_y | 1,21 [-] | $0,5*[1 + \beta_c*(\lambda_{rel,y} + 0,3) + \lambda_{rel,y}^2]$ | EC (6.27) |
| $k_{c,y}$ | 0,5636 [-] | $1/[k_y + (k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2)^{1/2}]$ | EC (6.25) |
| $\sigma_{c,0,d}$ | 723 810 [Pa] | | |
| $f_{c,0,d}$ | 12 923 077 [Pa] | $k_{mod}*(f_{c,0,k}/\gamma_M)$ | EC (2.14) |
| $\sigma_{m,y,d}$ | 36 081 633 [Pa] | | |
| $f_{m,d}$ | 14 974 438 [Pa] | $k_h*k_{mod}*(f_{m,k}/\gamma_M)$ | |
| $\sigma_{c,0,d}/(k_{c,y}*f_{c,0,d}) + \sigma_{m,y,d}/f_{m,d}$ | 2,51 nevyhovuje | EC (6.23) | |
| <u>vzpěr sloupu za ohybu</u> - průhyb ve směru menšího rozměru průřezu | | | |
| L | 1,000 [m] | | |
| $\beta_{L,z}$ | 1,0 [-] | | |
| $L_{cr,z}$ | 1,000 [m] | $\beta_{L,z} * L$ | |
| I_z | 0,000005 [m ⁴] | $(1/12)*b^3*h$ | |
| A | 0,0105 [m ²] | b*h | |
| i_z | 0,0217 [m] | $(I_z/A)^{1/2}$ | |
| λ_z | 46,188 [-] | $L_{cr,z}/i_z$ | |
| $\lambda_{rel,z}$ | 0,7832 [-] | $\lambda_z/\pi*(f_{c,0,k}/E_{0,05})^{1/2}$ | EC (6.22) |
| k_z | 0,9150 [-] | $0,5*[1 + \beta_c*(\lambda_{rel,z} + 0,3) + \lambda_{rel,z}^2]$ | EC (6.28) |
| $k_{c,z}$ | 0,7204 [-] | $1/[k_z + (k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2)^{1/2}]$ | EC (6.26) |
| $\sigma_{c,0,d}$ | 723 810 [Pa] | | |
| $f_{c,0,d}$ | 12 923 077 [Pa] | $k_{mod}*(f_{c,0,k}/\gamma_M)$ | |
| $\sigma_{m,y,d}$ | 36 081 633 [Pa] | | |
| $f_{m,d}$ | 14 974 438 [Pa] | $k_h*k_{mod}*(f_{m,k}/\gamma_M)$ | |
| $\sigma_{c,0,d}/(k_{c,z}*f_{c,0,d}) + k_m*\sigma_{m,y,d}/f_{m,d}$ | 1,76 nevyhovuje | EC (6.24) | |

tah rovnoběžně s vlákny

| | | | |
|----------------------------|--------------------------|--|----------|
| x | 2308,636 [m] | MSÚ | 6 (vítr) |
| b | 0,075 [m] | oslabený průřez, napojení pásku | |
| k_{mod} | 0,9 [-] | | |
| N_d | 17 800 [N] | | |
| A | 0,0105 [m ²] | b*h | |
| $\sigma_{t,0,d}$ | 1 695 238 [Pa] | N_d/A | |
| $f_{t,0,d}$ | 9 826 975 [Pa] | $k_h * k_{mod} * (f_{t,0,k}/\gamma_M)$ | |
| $\sigma_{t,0,d}/f_{t,0,d}$ | 0,17 | vyhovuje | EC (6.1) |

ohyb

| | | | |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------|
| $M_{y,d}$ | 8 670 [N.m] | | |
| W_y | 0,000245 [m ³] | $(1/6)*b*h^2$ | |
| $\sigma_{m,y,d}$ | 35 387 755 [Pa] | $M_{y,d}/W_y$ | |
| $f_{m,d}$ | 16 846 242 [Pa] | $k_h * k_{mod} * (f_{m,k}/\gamma_M)$ | |
| $\sigma_{m,y,d}/f_{m,d}$ | 2,10 | nevyhovuje | EC (6.11) |

kombinace ohybu a osového tahu

| | | | |
|---|------|------------|-----------|
| $\sigma_{t,0,d}/f_{t,0,d} + \sigma_{m,y,d}/f_{m,d}$ | 2,27 | nevyhovuje | EC (6.17) |
|---|------|------------|-----------|

smyk

| | | | |
|----------------------|--------------------------|--|-----------|
| x | 2308,636 [m] | MSÚ | 5 (sníh) |
| k_{mod} | 0,8 [-] | | |
| b | 0,075 [m] | oslabený průřez, napojení pásku | |
| $V_{z,D}$ | 12 540 [N] | | |
| A_{eff} | 0,0070 [m ²] | $k_{cr} * b * h$ | |
| $\tau_{z,d}$ | 2 673 774 [Pa] | $(3/2)*(V_{z,d}/A_{eff})$ | |
| $f_{v,d}$ | 2 461 538 [Pa] | $k_{mod} * (f_{v,k}/\gamma_M)$ EC (2.14) | |
| $\tau_{z,d}/f_{v,d}$ | 1,09 | nevyhovuje | EC (6.13) |

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky posouzení vzorového prvku a dalších vybraných prvků:

| Dílec | Ohyb a tlak | Vzpěr XZ | Vzpěr XY | Ohyb a tah | Smyk |
|----------|-------------|----------|----------|------------|------|
| Krokev 1 | 2,17 | 2,37 | 1,71 | 0,00 | 0,87 |
| Krokev 2 | 2,41 | 2,51 | 1,76 | 2,16 | 1,09 |
| Hambalek | 1,24 | 1,46 | 1,36 | 0,95 | 0,00 |
| Pásek 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,52 | 0,00 |
| Pásek 2 | 0,05 | 0,30 | 0,32 | 0,00 | 0,00 |

Tab. č. 24 Výsledky posouzení vybraných prvků modelu 1 v jalové vazbě

Výsledky ukazují, že v jalové vazbě krovu při výpočtu dle Eurokódu nevyhoví průřezy krokví a hambalku. V případě zvětšení průřezů nevyhovujících prvků je třeba provést nový výpočet konstrukce – vzhledem ke statické neurčitosti konstrukce je rozložení vnitřních sil závislé na tuhosti jednotlivých prvků, tedy i na obsahu jejich průřezu. Výsledky vnitřních sil by pro konstrukci s jinými průřezy byly jiné, proto nelze na základě výsledků nevyhovující konstrukce vhodně určit vyhovující průřezy bez zopakování celého procesu s novými vstupními hodnotami rozměrů průřezů. Tento proces se nazývá iterace a slouží k přibližování výpočtu správnému výsledku. V prvním kroku iterační proces používá pro neznámou libovolnou proměnnou počáteční hodnotu a řeší levou i pravou stranu rovnice. Pokud rovnice nevychází, proces se opakuje s upravenou počáteční hodnotou. Takto iterační proces

pokračuje až do splnění rovnice. V takovém případě se jedná o konvergenci a poslední použitá hodnota je řešení (rozměry průřezů prvků splňující následný statický posudek).

Při návrhu změny průřezu krokví ze 120x140 mm na 160x200 mm dostáváme následující výsledky:

| Dílec | Tlak a ohyb a vzpěr | | | |
|----------|---------------------|----------|---------------------|-------------------------|
| | model | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] |
| Krokev 1 | model 1c | 6 (vítr) | 13 930 | 9 180 |
| Krokev 2 | model 1b | 5 (sníh) | 7 660 | 9 900 |
| Hambalek | model 1c | 6 (vítr) | 13 390 | 1 600 |
| Pásek 1 | - | - | 0 | 0 |
| Pásek 2 | model 1b | 6 (vítr) | 18 970 | 10 |

| Dílec | Tah a ohyb | | | | Smyk | | |
|----------|------------|----------|---------------------|-------------------------|----------|----------|-----------------------|
| | x | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] | x | MSÚ | V _{z,d} [kN] |
| Krokev 1 | - | - | 0 | 0 | 2935,272 | 6 (vítr) | 7 650 |
| Krokev 2 | 2308,636 | 6 (vítr) | 9 890 | 9 210 | 2308,636 | 5 (sníh) | 11 190 |
| Hambalek | 1620,302 | 6 (vítr) | 19 440 | 1 000 | - | - | 0 |
| Pásek 1 | 836,476 | 6 (vítr) | 15 440 | 20 | - | - | 0 |
| Pásek 2 | - | - | 0 | 0 | - | - | 0 |

Tab. č. 25 Vnitřní síly v prvcích jalové vazby při navržených změnách průřezu krokví pro posudek průřezů a stability

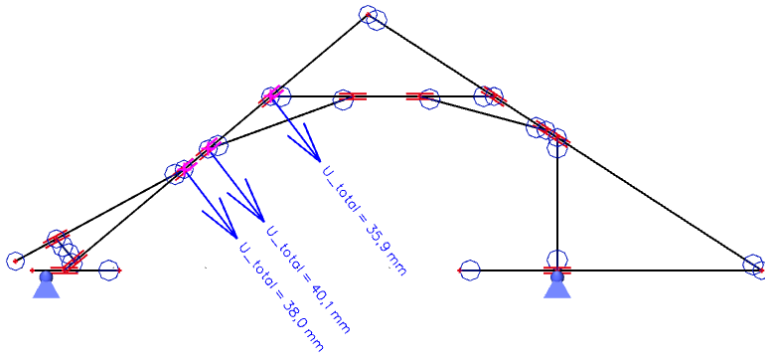
| Dílec | Ohyb a tlak | Vzpěr XZ | Vzpěr XY | Ohyb a tah | Smyk |
|----------|-------------|----------|----------|------------|------|
| Krokev 1 | 0,77 | 0,82 | 0,58 | 0,00 | 0,28 |
| Krokev 2 | 0,93 | 0,96 | 0,68 | 0,81 | 0,44 |
| Hambalek | 0,79 | 0,94 | 0,86 | 0,77 | 0,00 |
| Pásek 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,34 | 0,00 |
| Pásek 2 | 0,03 | 0,21 | 0,23 | 0,00 | 0,00 |

Tab. č. 26 Výsledky posouzení vybraných prvků v jalové vazbě při navržených změnách průřezu krokví

Při zvětšení průřezu krokví na 160x200 mm vyhoví na posouzení dle Eurokódu všechny zkoumané prvky.

Mezní stav použitelnosti

Nejvíce deformovaným prvkem je levá krokev (krokev 1) v jalové vazbě v mezním stavu 6 – zatížení vlastní tíhou, krytinou, sněhem a větrem zleva. Výpočetní program určil celkový průhyb krokeve na 40,1 mm v místě napojení pásku na krokev. Krokev uvažujeme pro mezní stav použitelnosti jako prostý nosník o délce 4317 mm, což je celková délka krove od uložení na krátče po spojení s pravou kroví.



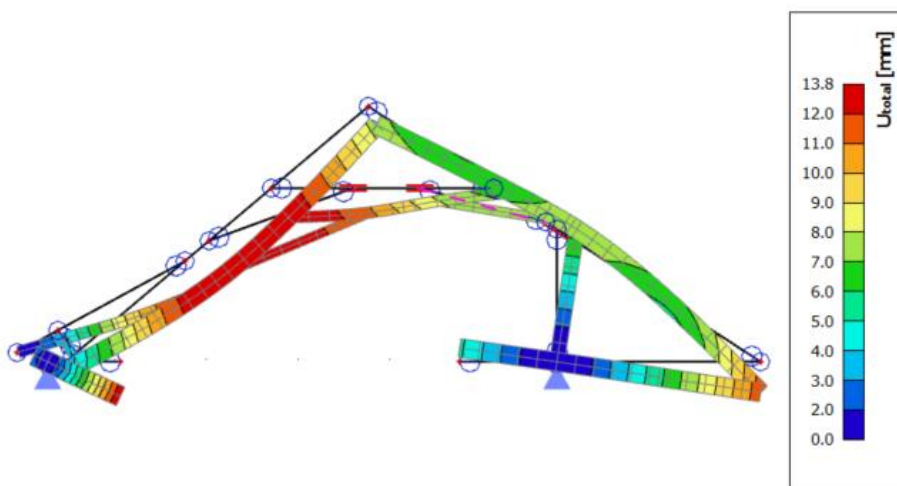
Obr. č. 118 Hodnota průhybu krokeve pro mezní stav použitelnosti

Povolený průhyb w_{fin} je dle Eurokódu v rozmezí

$$L/150 = 4317/150 = 28,78 \text{ mm} < 40,1 \text{ mm}$$
$$\text{až } L/300 = 4317/300 = 14,39 \text{ mm} < 40,1 \text{ mm}.$$

Průhyb krokeve nevyhovuje na mezní stav použitelnosti ani při zvolení méně konzervativní meze průhybu $L/150$, která je pro střešní konstrukci použitelná.

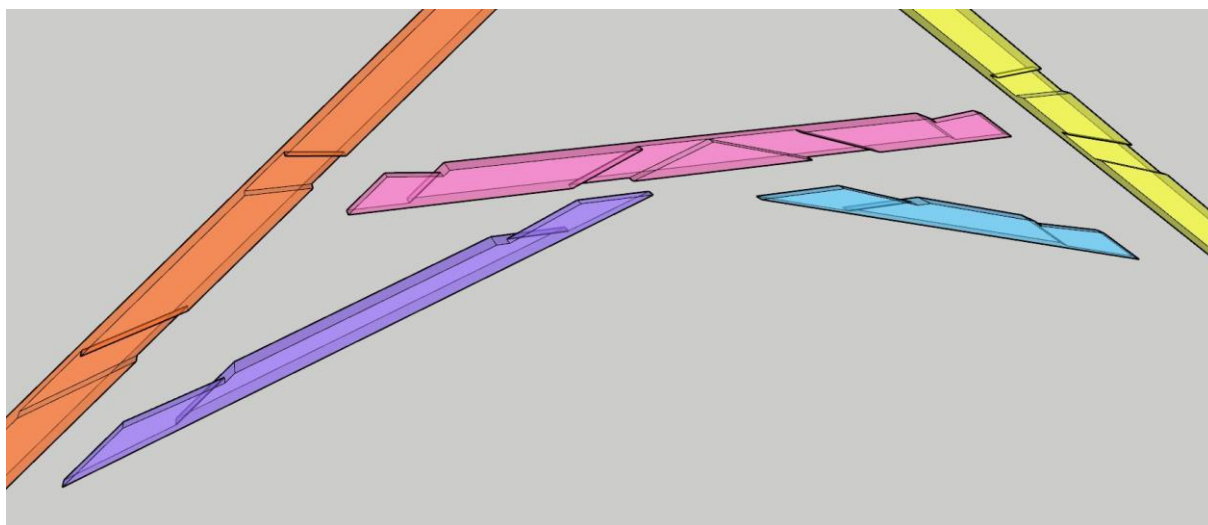
V případě zvětšení průřezu krokeve ze 120x140 mm na 160x200 mm se sníží její průhyb na 13,8 mm, což je už přijatelná hodnota i v rámci konzervativní meze průhybu $L/300$.



Obr. č. 119 Deformace jalové vazby s navrženým zvětšeným průřezem krokeve

7.4.3 Posudek rybinového přeplátování jako kloubového spoje

Spoj umožňuje přenos tlakové i tahové síly. Tento spoj je realizován mezi hambalkem a krokviemi a mezi pásky a hambalkem a krokviemi.



Obr. č. 120 Vizualizace rybinových plátů ve zkoumaném krovu. Oranžová krokev 1, žlutá krokev 2, růžový hambalek, fialový pásek 1, modrý pásek 2.

Vybrané spoje budou posouzeny dle Eurokódu na účinky maximálních zatížení.

Za návrhové hodnoty vnitřních sil pro posudek průřezů a stability prvků budou brány hodnoty z modelu podpor C:

| Dílec | tlak | | tah | |
|---------|----------|---------------------|----------|---------------------|
| | MSÚ | N _d [kN] | MSÚ | N _d [kN] |
| HAM/KR1 | 6 (vítr) | 22 580 | 4 (vítr) | 3 730 |
| HAM/KR2 | - | 0 | 6 (vítr) | 25 900 |
| PS1/KR1 | 4 (vítr) | 590 | 6 (vítr) | 23 910 |
| PS1/HAM | 4 (vítr) | 570 | 6 (vítr) | 23 940 |
| PS2/KR2 | 6 (vítr) | 26 920 | 4 (vítr) | 1 760 |
| PS2/HAM | 6 (vítr) | 26 900 | 4 (vítr) | 1 780 |

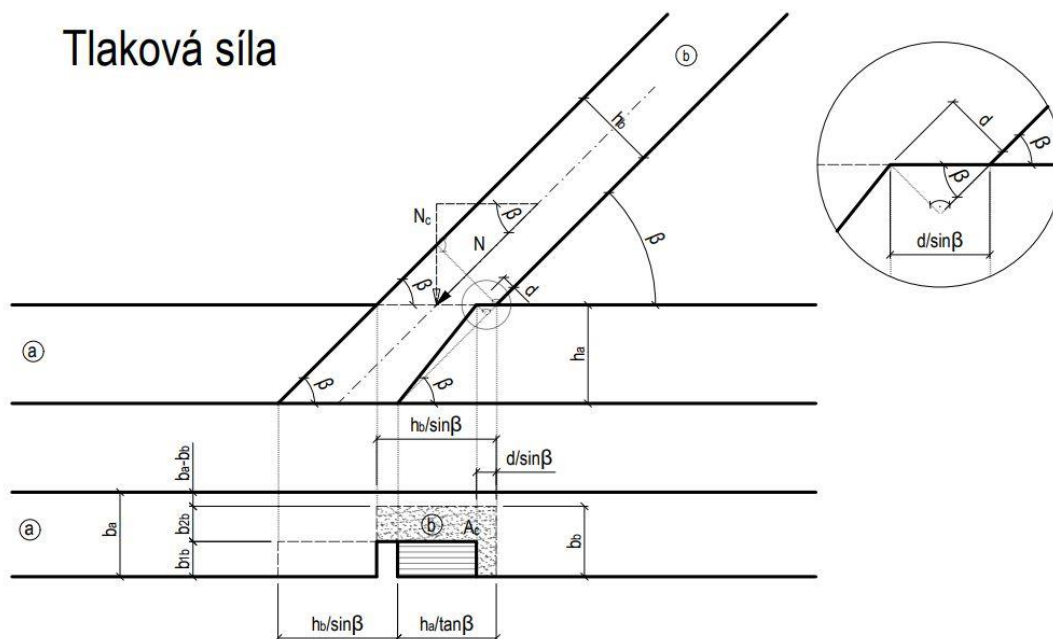
Tab. č. 27 Vnitřní síly v prvcích jalové vazby modelu 1 pro posudek jejich spojů

Výpočet napětí na příslušných plochách spoje je proveden dle postupu v publikaci Historické krovy od Jana Vinaře^[6, str. 258].

Následující výpočet je ukázkovým výpočtem únosnosti rybinově plátovaného spoje.

Výpočet otláčovaných ploch vlivem tlaku neseného dřeva:

Tlaková síla



Obr. č. 121 Geometrický model pro výpočet otláčaných ploch vlivem tlaku neseného dřeva

HAM/KR1

vlastnosti prvků

| | | |
|-----------|----------|-------------|
| a | krokov 1 | |
| b | hambalek | |
| β | | 40,1 [°] |
| β | | 0,70 [rad] |
| b_a | | 0,12 [m] |
| h_a | | 0,14 [m] |
| b_b | | 0,1 [m] |
| h_b | | 0,12 [m] |
| $b_{b,1}$ | | 0,05 [m] |
| $b_{b,2}$ | | 0,05 [m] |
| d | | 0,02 [m] |
| | | $1/6 * b_b$ |

výpočet geometrie

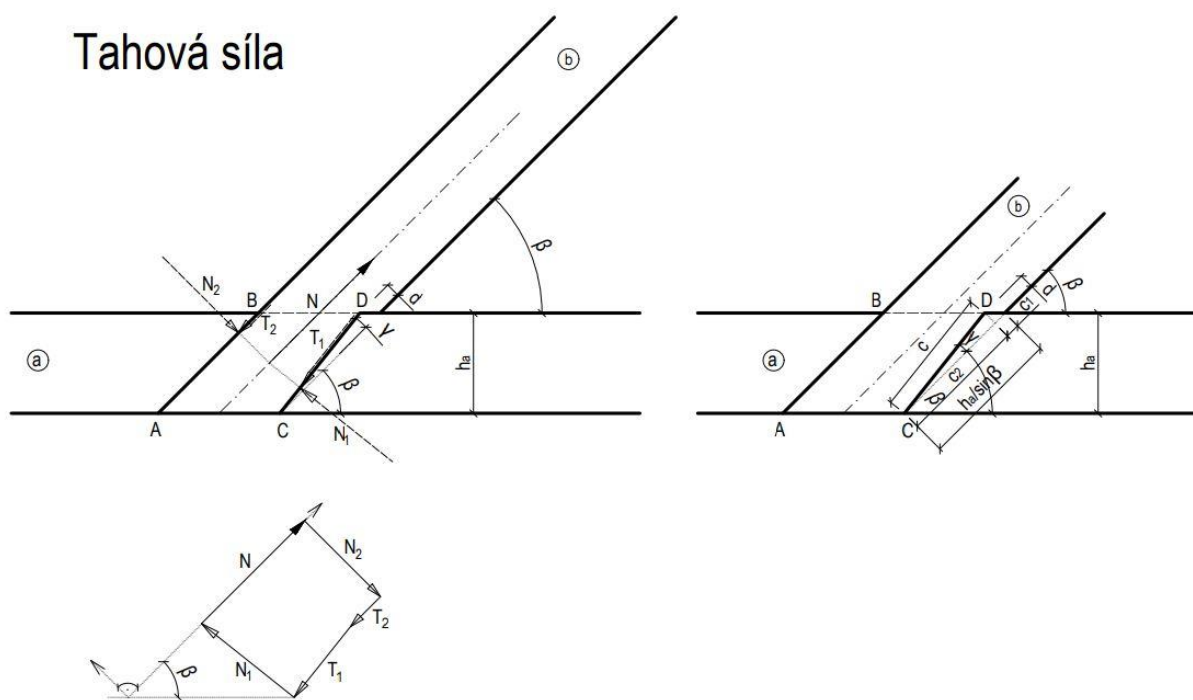
| | | |
|----------|--------------------------|--|
| A_c | 0,0109 [m ²] | $(b_{b,2} * h_b + b_{b,1} * d) / \sin \beta$ |
| A_{AB} | 0,0109 [m ²] | $b_{b,1} * h_a / \sin \beta$ |
| c_1 | 0,024 [m] | $d / \tan \beta$ |
| c_2 | 0,194 [m] | $(h_a / \sin \beta) - c_1$ |
| c | 0,195 [m] | $(c_2^2 + d^2)^{1/2}$ |
| γ | 0,1029 [rad] | $\arcsin(d/c)$ |
| γ | 5,90 [°] | |
| A_{CD} | 0,0097 [m ²] | $b_{b,1} * d / \sin \gamma$ |

tlak neseného prvku kolmo na vlákna nosného prvku

| | | |
|------------------------|-----------|--|
| MSÚ | 6 (vítr) | |
| k_{mod} | 0,9 [-] | |
| $l = h_b / \sin \beta$ | 0,186 [m] | dotyková délka, podpora v poli nosníku |
| $k_{c,90}$ | 1,810 [-] | $(2,38 - l/0,25) * (1 + h_b / (6 * l))$ nebo min. 1 a max. 4; EC (6.5) |

| | | | |
|---|----------------|---------------------------------------|-----------|
| N_d | 22 580 [N] | | |
| $N_{c,d}$ | 14 544 [N] | $N_d \cdot \sin\beta$ | |
| $\sigma_{c,90,d}$ | 1 338 334 [Pa] | $N_{c,d}/A_c$ | |
| $f_{c,90,d}$ | 1 730 769 [Pa] | $k_{mod} \cdot (f_{c,90,k}/\gamma_M)$ | EC (2.14) |
| $k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$ | 3 133 218 [Pa] | | |
| $\sigma_{c,90,d}/(k_{c,90} \cdot f_{c,90,d})$ | 0,43 | vyhovuje | EC (6.3) |

Výpočet otláčovaných ploch vlivem tahu neseného dřeva:



Obr. č. 122 Geometrický model pro výpočet otláčovaných ploch vlivem tahu neseného dřeva

napětí v otláčení na bočních klínových plochách

MSÚ 4 (vítr)

k_{mod} 0,9 [-]

N_d 3 730 [N]

$\uparrow N_d - T_{2,d} - T_{1,d} \cdot \cos\gamma - N_{1,d} \cdot \sin\gamma = 0$

kontrola: OK

$\leftarrow N_{2,d} - N_{1,d} \cdot \cos\gamma - T_{1,d} \cdot \sin\gamma = 0$

kontrola: OK

$T_{1,d} = \mu_0 \cdot N_{1,d}$

$T_{2,d} = \mu_0 \cdot N_{2,d}$

$N_{1,d}$ 4 561 [N]

$N_d / (2 \cdot \mu_0 \cdot \cos\gamma + \mu_0^2 \cdot \sin\gamma + \sin\gamma)$

$N_{2,d}$ 4 702 [N]

$N_d \cdot (\cos\gamma + \mu_0 \cdot \sin\gamma) / (2 \cdot \mu_0 \cdot \cos\gamma + \mu_0^2 \cdot \sin\gamma + \sin\gamma)$

plocha A_{AB} neseného dřeva je otláčována napětím v tlaku kolmo k vláknům

$l = h_a / \sin\beta$ 0,217 [m]

dotyková délka, podpěra na konci nosníku

$k_{c,90}$ 1,580 [-]

$(2,38 - l/0,25) \cdot (1 + h_b/(12 \cdot l))$ nebo min. 1 a max. 4; EC (6.4)

$\sigma_{c,90,d}$ 432 682 [Pa]

$N_{2,d}/A_{AB}$

$f_{c,90,d}$ 1 730 769 [Pa]

$k_{mod} \cdot (f_{c,90,k}/\gamma_M)$

$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$ 2 734 793 [Pa]

| | | | |
|--|------------|----------|---|
| $\sigma_{c,90,d}/(k_{c,90} * f_{c,90,d})$ | 0,16 | vyhovuje | EC (6.3) |
| plocha A_{CD} neseného dřeva je otláčována napětím v tlaku šikmo k vláknům | | | |
| $l = c$ | 0,195 | [m] | dotyková délka, podpěra na konci nosníku |
| $k_{c,90}$ | 1,684 | [-] | $(2,38 - l/0,25) * (1 + h_b/(12 * l))$ nebo min. 1 a max. 4; EC (6.4) |
| $\sigma_{c,90-y,d}$ | 468 673 | [Pa] | $N_{1,d}/A_{CD}$ |
| $f_{c,0,d}$ | 14 538 462 | [Pa] | $k_{mod} * (f_{c,0,k}/\gamma_M)$ EC (2.14) |
| $f_{c,90,d}$ | 1 730 769 | [Pa] | $k_{mod} * (f_{c,90,k}/\gamma_M)$ |
| $f_{c,90-y,d}$ | 2 939 026 | [Pa] | $f_{c,0,d}/(f_{c,0,d} * \sin^2 90 - \gamma / (k_{c,90} * f_{c,90,d}) + \cos^2 90 - \gamma)$; EC (6.16) |
| $\sigma_{c,90-y,d}/f_{c,90-y,d}$ | 0,16 | vyhovuje | EC (6.16) |

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky posouzení vzorového spoje a ostatních rybinových spojů:

| Spoj | Účinky tlaku | Účinky tahu A_{AB} | Účinky tahu A_{CD} |
|---------|--------------|----------------------|----------------------|
| HAM/KR1 | 0,43 | 0,16 | 0,16 |
| HAM/KR2 | 0,00 | 1,06 | 1,06 |
| PS1/KR1 | 0,01 | 1,00 | 1,13 |
| PS1/HAM | 0,01 | 1,15 | 1,08 |
| PS2/KR2 | 0,24 | 0,07 | 0,08 |
| PS2/HAM | 0,19 | 0,07 | 0,08 |

Tab. č. 28 Výsledky posudků spojů prvků modelu 1 v jalové vazbě

Z výsledků je patrné, že při výpočtu dle Eurokódu nevyhoví v jalové vazbě vyšetřované části krovu hradu Krásná Hôrka na účinky tahu spoje HAM/KR2, PS1/KR1 a PS1/HAM. Přetížení nad únosnou hranici je ale poměrně malé (max 15 %), zvláště v porovnání s posudkem průřezů prvků, kde dle výpočtu dochází k velmi výraznému přetížení (až 151 %).

V případě zvětšení průřezu krokví ze 120x140 mm na 160x200 mm dostáváme následující výsledky:

| Dílec | tlak | | tah | |
|---------|----------|------------|----------|------------|
| | MSÚ | N_d [kN] | MSÚ | N_d [kN] |
| HAM/KR1 | 6 (vítr) | 13 390 | 4 (vítr) | 3 470 |
| HAM/KR2 | - | 0 | 6 (vítr) | 19 440 |
| PS1/KR1 | 4 (vítr) | 280 | 6 (vítr) | 15 420 |
| PS1/HAM | 4 (vítr) | 250 | 6 (vítr) | 15 450 |
| PS2/KR2 | 6 (vítr) | 18 980 | 4 (vítr) | 400 |
| PS2/HAM | 6 (vítr) | 18 960 | 4 (vítr) | 420 |

Tab. č. 29 Vnitřní síly v prvcích jalové vazby při návrhu změny průřezu krokví pro posudek spojů

| Spoj | Účinky tlaku | Účinky tahu A_{AB} | Účinky tahu A_{CD} |
|---------|--------------|----------------------|----------------------|
| HAM/KR1 | 0,25 | 0,14 | 0,14 |
| HAM/KR2 | 0,00 | 0,81 | 0,81 |
| PS1/KR1 | 0,00 | 0,46 | 0,50 |
| PS1/HAM | 0,00 | 0,74 | 0,70 |
| PS2/KR2 | 0,17 | 0,01 | 0,01 |
| PS2/HAM | 0,14 | 0,02 | 0,02 |

Tab. č. 30 Výsledky posudků spojů prvků v jalové vazbě při návrhu změny průřezu krokví

Při zvětšení průřezu krokví na 160x200 mm vyhoví na posouzení dle Eurokódu všechny zkoumané spoje.

7.5 Porovnání výsledků posudků průřezů v modelech krovu s kloubovými a tuhými spoji

V této kapitole budou porovnány výsledky posudků průřezů modelů spojů 2 a 3 s modelem 1.

Následující tabulky obsahují vstupní hodnoty výpočtu pro modely 2 a 3:

| Dílec | Tlak a ohyb a vzpěr | | | |
|----------|---------------------|----------|---------------------|-------------------------|
| | x | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] |
| Krokev 1 | 2046,640 | 6 (vítr) | 26 010 | 9 030 |
| Krokev 2 | 2453,907 | 5 (sníh) | 7 500 | 8 700 |
| Hambalek | 892,155 | 6 (vítr) | 26 030 | 2 580 |
| Pásek 1 | - | - | 0 | 0 |
| Pásek 2 | 812,173 | 6 (vítr) | 25 300 | 10 |

| Dílec | Tah a ohyb | | | | Smyk | | |
|----------|------------|----------|---------------------|-------------------------|----------|----------|-----------------------|
| | x | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] | x | MSÚ | V _{z,d} [kN] |
| Krokev 1 | - | - | 0 | 0 | 2935,272 | 6 (vítr) | 11 920 |
| Krokev 2 | 2308,636 | 6 (vítr) | 16 030 | 8 070 | 2308,636 | 5 (sníh) | 12 140 |
| Hambalek | 1620,302 | 6 (vítr) | 24 720 | 1 160 | - | - | 0 |
| Pásek 1 | 836,476 | 6 (vítr) | 28 030 | 20 | - | - | 0 |
| Pásek 2 | - | - | 0 | 0 | - | - | 0 |

Tab. č. 31 Vnitřní síly v prvcích jalové vazby modelu 2 pro posudek průřezů a stability

| Dílec | Tlak a ohyb a vzpěr | | | |
|----------|---------------------|----------|---------------------|-------------------------|
| | x | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] |
| Krokev 1 | 2046,640 | 6 (vítr) | 23 730 | 7 680 |
| Krokev 2 | 2453,907 | 5 (sníh) | 7 480 | 8 720 |
| Hambalek | 892,155 | 6 (vítr) | 23 190 | 2 510 |
| Pásek 1 | - | - | 0 | 0 |
| Pásek 2 | 812,173 | 6 (vítr) | 22 100 | 1 280 |

| Dílec | Tah a ohyb | | | | Smyk | | |
|----------|------------|----------|---------------------|-------------------------|----------|----------|-----------------------|
| | x | MSÚ | N _d [kN] | M _{y,d} [kN.m] | x | MSÚ | V _{z,d} [kN] |
| Krokev 1 | - | - | 0 | 0 | 2935,272 | 6 (vítr) | 10 260 |
| Krokev 2 | 2308,636 | 6 (vítr) | 13 290 | 6 800 | 2308,636 | 5 (sníh) | 10 340 |
| Hambalek | 1620,302 | 6 (vítr) | 21 470 | 1 180 | - | - | 0 |
| Pásek 1 | 836,476 | 6 (vítr) | 25 340 | 1 380 | - | - | 0 |
| Pásek 2 | - | - | 0 | 0 | - | - | 0 |

Tab. č. 32 Vnitřní síly v prvcích jalové vazby modelu 3 pro posudek průřezů a stability

V následující tabulce jsou porovnány hodnoty posudků průřezů modelů spojů 1 – 3. Z nich lze vyčíst, že největší rozdíly nastávají u posudku páseků, ve kterých v modelu 3 vznikají malé momenty, které jsou ale výrazně vyšší než momenty v modelech 1 a 2, tudíž rozdíl mezi posudky je velký. U páseků je i

poměrně velký rozdíl mezi modely 1 a 2 kvůli výraznému zvýšení tahu pásku 1 a snížení tlaku pásku 2, ale vzhledem k vysoké pevnosti dřeva v těchto namáháních není tento rozdíl tak významný. U hlavních nosných prvků, kterými jsou krokve a hambalek, nedochází mezi modely 1 a 2 k výrazným rozdílům ve statických posudcích (max. 6 % ohyb a tah hambalku), proto je možné konstatovat, že ztužení spoje hambalku s krokvemi nemá významný vliv na vnitřní síly v nejvíce namáhaných prvcích krovu. Větší rozdíly (až 18 % ohyb a tah a smyk u krokve 2) nastávají mezi modely 1 a 3. Při ztužení připojení pásků dochází ke skokovému snížení momentu na krokvích a menšímu normálovému namáhání krokví. 13 % a 18 % snížení namáhání krokví v ohybu je už poměrně významný jev, který otvírá diskusi o možnostech tuhého napojování pásků.

| Dílec | Ohyb a tlak | | | | | Vzpěr XZ | | | | | Vzpěr XY | | | | |
|----------|-------------|------|---------|------|---------|----------|------|---------|------|---------|----------|------|---------|------|---------|
| | 1 | 2 | 2/1 [%] | 3 | 3/1 [%] | 1 | 2 | 2/1 [%] | 3 | 3/1 [%] | 1 | 2 | 2/1 [%] | 3 | 3/1 [%] |
| Krokev 1 | 2,17 | 2,22 | 102% | 1,88 | 87% | 2,37 | 2,45 | 103% | 2,10 | 88% | 1,71 | 1,77 | 104% | 1,52 | 89% |
| Krokev 2 | 2,41 | 2,37 | 98% | 2,38 | 99% | 2,51 | 2,47 | 98% | 2,47 | 99% | 1,76 | 1,74 | 98% | 1,74 | 99% |
| Hambalek | 1,24 | 1,23 | 100% | 1,19 | 96% | 1,46 | 1,48 | 101% | 1,41 | 97% | 1,36 | 1,42 | 105% | 1,33 | 98% |
| Pásek 1 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - |
| Pásek 2 | 0,05 | 0,04 | 89% | 0,54 | 1157% | 0,30 | 0,28 | 94% | 0,75 | 250% | 0,32 | 0,30 | 94% | 0,62 | 192% |

| Dílec | Ohyb a tah | | | | | Smyk | | | | |
|----------|------------|------|---------|------|---------|------|------|---------|------|---------|
| | 1 | 2 | 2/1 [%] | 3 | 3/1 [%] | 1 | 2 | 2/1 [%] | 3 | 3/1 [%] |
| Krokev 1 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,87 | 0,98 | 112% | 0,85 | 97% |
| Krokev 2 | 2,16 | 2,11 | 98% | 1,78 | 82% | 1,09 | 1,05 | 97% | 0,90 | 82% |
| Hambalek | 0,95 | 0,89 | 94% | 0,85 | 90% | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - |
| Pásek 1 | 0,52 | 0,61 | 117% | 1,63 | 312% | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - |
| Pásek 2 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - |

Tab. č. 33 Porovnání výsledků posudků průřezů v modelech 1-3

8 Závěr

Práce zkoumá vliv modelování rybinově plátovaných spojů jako kloubů nebo vetknutí pro rozložení vnitřních sil v prvcích krovu, řeší porovnání různých modelů podpor krovu a zabývá se statickým posudkem vybraných prvků a spojů v konstrukci historického krovu.

Porovnání modelů podpor

Byly vytvořeny tři modely podpor krovu, dva modely s posuvnými podporami s opačným umístěním a jeden model s pevnými podporami. U modelů s volnými podporami dochází k velkým vodorovným posunům, které nejsou v konstrukci reálné. Model s pevnými podporami je u krovu s vaznými trámy a krátkaty kámpovanými přes pozednice vhodný pro určení vnitřních sil v nesených prvcích krovu, kterými jsou krokve, hambalek, pásky a sloupek. Tento model může být při návrhu konstrukce vhodný také pro určení maximální vodorovné síly působící v kámpování a na spodní zdivo a nadezdívku, návrh tak bude na straně bezpečnosti. Pro určení normálových sil ve vazném trámu a posouvajících sil (k ose prvku Y) a ohybových momentů (k ose prvku Z) ve výměnách je možné využít model podpor, kde dochází k menšímu vodorovnému posunu podpory, nebo model s pružnými podporami, kdy pružnost podpor je určena na základě zvoleného maximálního vodorovného posunu v podporách, jehož hodnota musí být zvolena na straně bezpečnosti. Pro zjištění skutečných vodorovných reakcí v podporách a vnitřních sil ve vazných trámech a výměnách např. při podrobné analýze již stojícího historického krovu by bylo vhodné vytvořit numerický a experimentální model kámpování pro zjištění skutečné tuhosti podpor.

Porovnání modelů spojů

Pro zjištění rozdílů v reakcích, vnitřních silách a posunech jsou vytvořeny tři extrémní modely konstrukce: v prvním modelu jsou všechny spoje modelovány jako kloubové, v druhém modelu je připojení hambalku ke krokví uvažováno jako tuhé vetknutí a ostatní spoje jsou kloubové, ve třetím modelu jsou kromě připojení hambalku uvažována jako tuhá vetknutí také připojení pásků ke krokví a hambalkům.

V reakcích nevzniká mezi modely výrazný rozdíl (max. 5 % v jalové vazbě). Ani ve vodorovných a svislých posunech uzlů nejsou mezi třemi modely spojů velké rozdíly (max. 5 % v modelu s pevnými podporami, který je nevhodnějším modelem podpor, a max. 10 % u modelu s volnou podporou). Stejně tak nevznikají rozdíly v ohybových momentech k ose Y prvků (max. 5 % u výměn). Výraznější rozdíly nastávají u normálových a posouvajících sil v nesených částech krovu. V modelech s pevnými podporami vznikají až 18 % rozdíly v hodnotách normálových i posouvajících sil, v modelech s posuvnými podporami jsou rozdíly ještě větší. V nesoucích částech krovu (vazné trámy, krátkata a výměny) výrazné rozdíly v hodnotách vnitřních sil mezi modely spojů nevznikají. Vybrané prvky krovu jsou staticky posouzeny na vnitřní síly ze všech 3 modelů spojů. V krokví a hambalku nevzniká výrazný rozdíl v posudku mezi modelem 1 a 2 (max. 6 % při kombinaci ohybu a tahu u hambalku), protože únosnost krokví a hambalku je ovlivněna převážně velikostí ohybového momentu, která se mezi modely spojů téměř nemění, a jeho kombinací s normálovým namáháním, přičemž tato kombinace má v obou modelech spojů obdobné hodnoty. V páscích v modelech 1 a 2 vznikají pouze zanedbatelné momenty a únosnost je ovlivněna pouze hodnotami tahu a tlaku, které se mezi modely mění o něco výrazněji, proto je rozdíl v posudcích až 17 %, ale vzhledem k velké únosnosti dřeva při namáhání normálovými silami nemá tento rozdíl velký vliv na celkovou únosnost. V modelu spojů 3 s tuhým vetknutím pásků už registrujeme větší rozdíly v posudcích krokví. Ačkoliv hodnoty ohybových momentů jsou podobné a rozdíly v hodnotách normálových sil by neměly hrát takovou roli, tak vetknutí pásků způsobuje změnu v kombinacích těchto vnitřních sil v jednotlivých bodech konstrukce.

V místě s největším normálovým namáháním tedy nevzniká i největší moment jako v modelech 1 a 2, ale moment se v napojení pásku skokově zmenšuje pro pole s velkým normálovým namáháním. Naopak se zde výrazně zmenšuje normálové namáhání pro pole s největším momentem. Zároveň v modelu 3 vznikají ohybové momenty na páscích, které výrazně ovlivňují jejich posudek. Vetknutí v připojení pásků může snížit namáhání krokve 1 v ohybu a tlaku až o 13 % a namáhání krokve 2 v ohybu a tahu o 18 %. Problémem ale může být realizace takového spoje. Sice kvůli momentovému namáhání bude třeba zvětšit průřez pásků, což zvýší tuhost spoje, ale i vysoká profilace plátování nemusí stačit ke kompenzaci malého úhlu, který pásek s krokví a hambalkem svírá. Zároveň takový spoj nebude dokonale tuhý, tudíž zmenšení namáhání krokví nebude tak výrazné. Z posudků je také patrné, že rozdílné modelování spojů nemá žádný vliv na posudek krokve 2 v ohybu a tlaku (2 %), která je v této kombinaci vnitřních sil nejvíce namáhaným neseným prvkem krovu. Pokud tato krokev splní podmínky únosnosti a bude ve stejném profilu navržena i krokev 1, tak i tato krokev pravděpodobně následně vyhoví na posudek průřezu. Závěrem lze tedy konstatovat, že tuhé vetknutí hambalku nemá vliv na namáhání průřezů prvků krovu a tuhé vetknutí pásků neovlivňuje výsledný návrh průřezů prvků krovu, pokud je navrženo stejné profilování pravé i levé krokve.

Statický posudek vybraných prvků krovu

Ze statického posudku navržených prvků krovu vyplývá, že na posudek únosnosti dle Eurokódu nevyhoví průřezy krokví a hambalku a spoje HAM/KR2, PS1/KR1 a PS1/HAM. Při navrženém průřezu krokví 120x140 mm je využití krokve 2 až 251 % v kombinaci ohybu a tlaku a spoje PS1/HAM 115 % v tahu. Při zvětšení průřezu krokví na 160x200 mm vyhoví všechny zkoumané prvky a spoje. Navržený krov je tedy silně podhodnocený a existuje velká hrozba, že při kombinaci zatížení sněhem a větrem dojde k vážnému porušení krovu a jeho havárii.

9 Zdroje/seznam použité literatury

- [1] ŠTEFKO, Jozef, Ladislav REINPRECHT a Petr KUKLÍK. *Dřevěné stavby: konstrukce, ochrana a údržba*. 2. české vyd. Bratislava: JAGA, 2009. Home. ISBN 978-80-8076-080-9.
- [2] GERNER, Manfred. *Tesařské spoje*. Praha: Grada, 2003. ISBN 978-80-247-0076-2.
- [3] *Dřevo&Stavby*. 1. PRO VOBIS, 2/2009. ISSN 1803-6996.
- [4] JELÍNEK, Lubomír a Petr ČERVENÝ. *Tesařské konstrukce*. 3. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2012. Technická knihovna autorizovaného inženýra a technika. ISBN 978-80-87438-34-3.
- [5] HATAJ, Martin. *Numerické a analytické modely tesařských spojů*. Praha, 2019. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.
- [6] VINAŘ, Jan a Václav KUFNER. *Historické krovky*. Praha: Grada, 2004. Stavitel. ISBN 80-7169-575-0.
- [7] *Krov*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Krov>
- [8] *Krovky* [online]. [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps4/8.html>
- [9] URICH, Jan. *Vývoj střešních konstrukcí od antiky po 20. století*. Praha, 2018. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce PhDr. Mgr. Markéta Jarošová, Ph.D.
- [10] VINAŘ, Jan. *Historické krovky*. Praha: Grada, 2005. Stavitel. ISBN 80-247-1111-7.
- [11] ČSN EN 1991-1-1 (730035). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [12] ČSN EN 1991-1-3 (730035). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [13] ČSN EN 1991-1-4 (730035). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [14] *Zatížení stavebních konstrukcí: Úvod* [online]. In: . s. 1-7 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: [http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B\)%20TEORIE/Uvod.pdf](http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B)%20TEORIE/Uvod.pdf)
- [15] BARCZI, Július. *Hrad Krásna Hôrka*. *hradkrasnahorka.sk* [online]. 2006 [cit. 2021-06-29]. Dostupné z: <http://www.hradkrasnahorka.sk/index.php?page=hrad&lng=sk>
- [16] *Krásna Hôrka*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-06-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kr%C3%A1sna_H%C3%B4rka
- [17] MUSÍLEK, Josef a Jan PLACHÝ. *Výpočetní modely vaznicového krovu*. *Tzb-info.cz* [online]. 3.6.2013 [cit. 2021-07-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9982-vypocetni-modely-vaznicoveho-krovu>
- [18] ČSN EN 338 (731711). *Konstrukční dřevo: Třídy pevnosti*. Biskupský dvůr 1148/5, 110 00 Praha 1: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2016.

- [19] ČSN EN 1995-1-1 (731701). *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Biskupský dvůr 1148/5, 110 00 Praha 1: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, leden 2007.
- [20] MUSÍLEK, Josef a Jan PLACHÝ. *Příčné vodorovné síly na pozednice krovů* [online]. In: VŠTE v Českých Budějovicích, katedra stavebnictví, s. 1-9 [cit. 2021-08-12]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/47234715-Pricne-vodorovne-sily-na-pozednice-krovu.html>
- [21] MIKOLÁŠEK, David, Oldřich SUCHARDA a Jiří BROŽOVSKÝ. *NUMERICKÁ ANALÝZA PLNÉ VAZBY KROVU*. In: Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava [online]. Vysoká škola báňská, 2012, s. 1-11 [cit. 2021-08-12]. Dostupné z: <https://adoc.pub/numericka-analyza-plne-vazby-krovu.html>
- [22] Mapa historických krovů [online]. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <http://www.mapakrovu.cz/>
- [23] KOHOUT, Jaroslav, Antonín TOBEK a Pavel MÜLLER. *Tesařství: tradice z pohledu dneška*. 8. upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 1996. Stavitel. ISBN 80-7169-413-4.
- [24] MATĚJKA, Libor. *Pozemní stavitelství III: šikmé a strmé střechy*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-540-2.
- [25] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03310-4.
- [26] KUNECKÝ, Jiří, Anna ARCISZEWSKA-KĘDZIOR, Václav SEBERA a Hana HASNÍKOVÁ. *Mechanical performance of dovetail joint related to the global stiffness of timber roof structures*. Materials and Structures [online]. 2016, 49(6), 2315-2327 [cit. 2022-03-22]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-015-0651-1