

**David MIKOLÁŠEK<sup>1</sup>, Jiří BROŽOVSKÝ<sup>2</sup>**  
VÝPOČETNÍ ANALÝZA VODOROVNÉ TUHOSTI PLNÉ VAZBY KROVU

**Abstrakt**

Předmětem tohoto článku jsou tesařské konstrukce a zejména krovy a jejich chování. Důvodem pro detailnější rozbor spojů těchto konstrukcí je snaha o získání přesnější představy o deformacích a silách vznikajících v těchto spojích a vazbách. U tesařských konstrukcí je závislost přerozdělení vnitřních sil značně závislá na kvalitě provedených spojů. Článek ukazuje způsob teoretického určení tuhostí v uložení.

**Klíčová slova**

Tesařské konstrukce, tuhost, prokluz, ANSYS, krovová vazba, deformace, ortotropie.

## 1 ÚVOD

Tesařské konstrukce jsou a budou stále používány pro občanskou i pro průmyslovou výstavbu. Tyto konstrukce jsou prověřeny mnoha staletími a zdálo by se, že zde není prostor pro nové poznatky ohledně jejich chování. Skutečně, pokud bychom vzali do úvahy správně provedenou tesařsky svázanou konstrukci, se správně zvoleným materiálem a použitím pro správný typ stavební konstrukce, tak je lépe mnohdy konstrukci řešit na základě zkušeností než se pokoušet konstrukci převést na správný výpočtový model.



Obr.1: Konstrukce dřevěného krovu spojená se železobetonem a ocelovým sloupem

V současné době se však nároky na původní tesařské spoje a konstrukce značně změnily, jak je ilustrováno na obr.1. Původní typy krovů jsou používány na rozpory a zatížení, na které nebyly sestrojeny. Důležitou otázkou u těchto typů konstrukcí (dřevěné tesařské konstrukce) je jejich deformace, ta totiž velmi souvisí s kvalitou provedení spojů a s tuhostí v uložení (vnější vazby). Některé konstrukce krovu vyvozují velká vodorovná zatížení do spodních konstrukcí. Je to způsobeno více faktory.

Vyjmenujme si příčiny vzniku velkých vodorovných sil u kotvení některých typů krovů:

- zatížení větrem, standardní vnější zatížení mající vodorovný směr,

---

<sup>1</sup> Ing. D. Mikolášek, Ph.D. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky, Ludvíka Podéště 1875, CZ708 33, Ostrava-Poruba tel. (+420) 597 321 391, e-mail david.mikolasek@vsb.cz

<sup>2</sup> Doc. Ing. J. Brožovský Ph.D., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky, Ludvíka Podéště 1875, CZ708 33, Ostrava-Poruba tel. (+420) 597 321 321, e-mail jiri.brozovsky@vsb.cz

- přenos vodorovných sil z jiných částí konstrukce, není standardní, mělo by se řešit zvlášť přes výztužné pole,
- statické schéma je navrženo tak, že mohou vznikat vodorovné síly (krov se blíží ke trojkloubovému rámu),
- statické schéma je navrženo tak, že musí vznikat vodorovné síly (krov je trojkloubový nosník – vodorovné síly musí být vyvozeny, aby se zachovaly statické podmínky rovnováhy),

Toto jsou ve zkratce možnosti, kdy mohou vzniknout vodorovné síly, se kterými je nutné počítat a přenést je do spodní konstrukce. Popřípadě je možné umožnit konstrukci uvolněním vazeb (vnějších nebo vnitřních, klouby, prokluzy, kontakty) zmenšení vodorovných sil, ale za cenu nárůstu deformací a to především vodorovných deformací.

Dnes jsou krovy součástí stavby také svou vizuální stránkou. Krov je brán jako estetický prvek stavby a je součástí vnější a vnitřní architektury. Na krovu jako nosné konstrukci závisí další konstrukce, podhledy, vnější omítky, příčky. Pokud by krov nebyl dostatečně tuhý, tak by docházelo k přirozeným změnám jeho tvaru (vlivem změn zatížení sněhu a větru). Navazující konstrukce by mohly popraskat vlivem nadměrných deformací [1, 2, 3].

Z tohoto důvodu byla věnována pozornost především vodorovným tuhostem vybraných částí krovů, kde byla studována jejich tuhost a přerozdělení vnitřních sil, které jsou s touto tuhostí svázány [4, 5, 6, 7, 8]. Pro analýzu byly zvoleny dva programy na bázi konečných prvků NEXIS a ANSYS.

## 2 TYPY MODELŮ

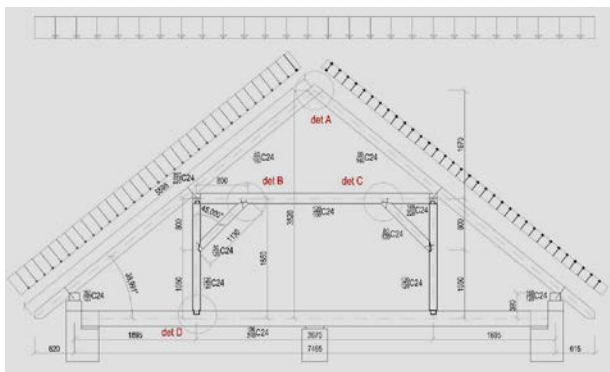
V této kapitole budou stručně popsány typy modelů použitých pro tuhostní analýzu tesařských konstrukcí, konkrétně krovů [9, 10, 11, 12, 13, 15, 16].

- a) Model konstrukce 3D krovu vytvořený z prutových konečných prvků. Tento model byl sestaven v programu NEXIS. Byly zde uváženy nelinearity v podobě jednostranných vazeb, fyzikální nelinearita (po dosažení mezní síly je prvek v „plastizaci“) a geometrická nelinearita výpočet s uvážením pro druhý řád. U této konstrukce byly společně s ostatními typy modelů měněny tuhosti ve spojích a byla sledována změna vnitřních sil, reakcí a deformací.
- b) 2D model plné vazby krovu vytvořený z prutových konečných prvků a zatěžován (s různými tuhostmi dochází také ke změně v zatížení plné vazby podle 3D prutového modelu). Také zde byl model počítán pro konstrukční (jednostranné vazby), fyzikální (po dosažení mezní síly je prvek v „plastizaci“) a geometrické nelinearity (druhý řád). Model byl laděn pro různé tuhosti ve spojích a ve vnějších vazbách.
- c) Na základě předešlých dvou kontrolních modelů byl vytvořen 3D objemový konečně prvkový model plné vazby v programu ANSYS. Tento model byl počítán jako geometricky a konstrukčně nelineární. Byly zde použity kontaktní prvky s uvážením třením ve spojích. Fyzikální nelinearita materiálu nebyla uvážována, model byl už tak poměrně rozsáhlý. S využitím materiálové nelinearity by výsledky mohly být přesnější, ale neočekával se zde výrazný projev fyzikální nelinearity a model by byl s fyzikální nelinearitou časově náročný na výpočet a stabilitu konvergence. Model v programu ANSYS se skládá z objemových konečných prvků SOLID45 a prutových prvků BEAM4. Prutové prvky byly použity pro vytvoření přípoje pro krokve a pro některé spoje simulující nahrazení objemového prvku SOLID45. Důvodem byl fakt, že na prutovém prvku lze přímo odečíst silové veličiny, oproti objemovému konečnému prvku.

- d) V programu ANSYS byly otestovány tři podobné numerické modely příčné vazby krovu (bylo měněno statické schéma a vazby) **KLsV**, **KLbV** a **KbLsV**.
- První byl model krovu **KLsV** s neposuvnými (polotuhými) vazbami v patách a hambálkem s prokluzem vlivem svorníku. Na každé straně je jeden svorník oceli 5.8, průměru  $\varnothing 20$  mm s tuhostí proti prokluzu na jeden stříh cca  $K_{ser,1} = 10 \text{ MNm}^{-1}$ . Tedy na jeden spoj pro dva stříhy máme celkem  $K_{ser,2} = 20 \text{ MNm}^{-1}$ . V patách byl sepnut krov (krokev k pozednici) pomocí jednoho vrutu s celým závitem vnějšího průměru  $\varnothing 9$  mm, 8.8 třída oceli o délce cca 320 mm. Síla na vytažení vrutu je cca  $F_x = 14,4$  kN podle DIN 1052 a střížná síla je podle té samé normy cca  $F_s = 6,8$  kN. Tuhost proti posunutí vrutu je na jeden stříh cca  $K_{ser,v} = 3,4 \text{ MNm}^{-1}$ . Tuhost proti vytažení tohoto vrutu pro tento typ spoje je cca  $K_{ser,h} = 4,49 \text{ MNm}^{-1}$ . Hodnoty prokluzů a pevností jsou bez uvážení korekčních součinitelů, jde o orientační horní hodnoty.
  - Druhý model **KLbV** byl podobný model jako první, pouze není uvažováno se spolupůsobením vrutu. Vodorovnou reakci a její přenos zabezpečuje pouze tření mezi krovky a pozednicí pro součinitel tření v klidu (dřevo – dřevo) cca  $\zeta = 0,65$ .
  - Třetí model **KbLsV** je stejný jako první, ale není uvažováno se spolupůsobením kleštín. Kleštiny jsou z modelu odstraněny a krov působí jako čistý trojkloubový nosník.

## 2.1 GEOMETRIE A ZATÍŽENÍ PRO NUMERICKÉ MODELKY KROVU

V tomto oddíle se seznámíme s řešenou konstrukcí. Všechny numerické modely představené v této práci jsou počítány pro zde uvedenou geometrii a zatížení. Odlišné jsou pouze volbou konečných prvků nebo stupněm složitosti (geometrie a okrajové podmínky).



Obr. 2: Geometrie a profily plné vazby

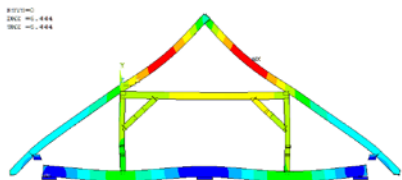
Na obrázku 2 je znázorněn příčný řez plnou vazbou krovu s vyznačenými detaily a působícím zatížením. Zatížení je pouze schématické. Na obrázku je vidět hlavní konstrukce, kterou tvoří ve spodní části dřevěný průvlak vynášející plnou vazbu krovu. Dřevěný průvlak je prostě uložen na obvodovou zděnou konstrukci a uprostřed je položen na středovou zeď. Na tento průvlak jsou kotveny dva sloupy. Sloupy jsou dále spojeny dvěma šikmými dřevěnými pásky s hambálkem plné vazby. Pásky jsou se sloupy a příčným vodorovným prvkem spojeny tesařským spojem se zapuštěním. Pásky jsou spojeny se dvěma zmíněnými prvky také vrutem s celým závitem průměru  $\varnothing 9$  mm třídy oceli 8.8. I přes spojení vrutem je tento spoj (polotuhý rámový roh) považován za jednostranný. Pásek působí vždy jenom v tlaku, vrut není uvažován pro přenos vodorovných sil.

U objemového modelu bylo hlavním cílem zjistit deformaci v uložení krovky a pozednice. A zjistit jaká část síly (reakce) se v tomto uložení přerozdělí z vnějšího zatížení.

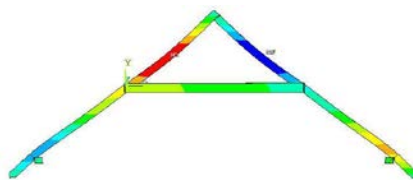
Po zjištění těchto dvou geometricko-fyzikálních veličin z matematického modelu v ANSYS, lze jednoduchým způsobem určit vodorovnou tuhost proti posunutí pro tento případ numerického modelu a jeho zatížení a okrajových podmínek [17, 18, 19, 20].

## 2.2 3D OBJEMOVÝ MODEL V ANSYS

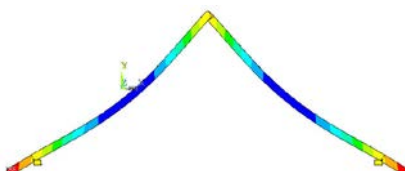
V tomto odstavci přecházíme k modelům vytvořeným v programu ANSYS jako 3D objemové konečněprvkové modely. Byly vytvořeny dva základní typy modelů, plná vazba a její varianty.



Obr.4: Deformace plné vazby krovu



Obr.5: Deformace typu **KLSV** a **KLbV**



Obr.6: Deformace typ **KbLsV**

Na této stránce si můžeme prohlédnout výstupy z programu ANSYS. Na obrázku 4 až 6 jsou vidět deformace různých typů příčných vazeb. Obrázek 4 je plná vazba krovu, tedy základní typ příčné vazby uvažovaný taky v prutových modelech. Na obrázku 5 je vyobrazena vazba typu **KLSV** a **KLbV**, tento typ vazby se běžně používá, ale vyvoluje velké vodorovné síly. Obrázek 6 je poslední varianta příčné vazby krovu typ **KbLsV**. Tento typ vazby je nejméně vhodný pro krovky běžných staveb, protože jde o trojkloubový nosník, u kterého je vznik velkých vodorovných reakcí nutný.

## 3 VÝSLEDKY A VSTUPNÍ DATA

Tab.1: Ortotropní vlastnosti dřeva GL24h alternativně C24

Moduly pružnosti	[MPa]	Moduly pružnosti	[MPa]	Poisson konstanty	[ - ]
$E_x$	11600	$G_{xy}$	720	$\nu_{xy}$	0,470
$E_y$	900	$G_{yz}$	39	$\nu_{yz}$	0,250
$E_z$	500	$G_{xz}$	750	$\nu_{xz}$	0,370

Tento odstavec je věnován popisu vstupních dat a shrnutí získaných výsledků. Tabulka vlastností materiálu tab. 1 je použita v matici tuhosti v programu ANSYS pro dřevěnou část konstrukce. Hodnoty v tabulce 1 jsou převzaty ze [4] a [12]. Pomocí numerických modelů byly odladěny tak, aby vypočtené hodnoty deformací odpovídaly naměřeným hodnotám na fyzikálních srovnávacích testech. Dřevo bylo v objemovém modelu uvažováno jako ortotropní a lineárně pružné.

Tab. 2: Tuhosti ve spoji pozednice + železobetonový věnec (zjednodušený výpočet)

[MNm <sup>-1</sup> ]	ANSYS plná vazba	ANSYS <i>KLbV</i>	ANSYS <i>KLsV</i>	ANSYS <i>KbLsV</i>
Tuhost $K_{ANSYS}$	8,00	6,77	12,92	27,48
Tuhost $K_{\Sigma}$	<b>4,97</b>	<b>4,46</b>	<b>6,50</b>	<b>8,87</b>

Tabulka 2 představuje zjednodušený přehled tuhostí proti posunutí. V rámci možných tuhostí pro běžné krovy není reálné dosáhnout vyšších vodorovných tuhostí vlivem limitující tuhosti mezi spojem krokve a pozednice. Spodní řádek v tabulce 2 je sečtení tuhosti prokluzu spoje svorníku a pozednice spolu s železobetonovým věncem a tuhosti mezi krokví a pozednicí.

## 4 ZÁVĚR

V programu NEXIS byl sestaven 3D prutový model krovu tak, aby byly získány reálné síly a zatížení do modelu pro ANSYS. Nejprve bylo nutné získat odhad pružinových konstant pro vazbu v ose x (vodorovná reakce) v programu NEXIS. Model krovu byl dále počítán jako 3D konstrukce sestavená z objemových 8 uzlových konečných prvků SOLID45, doplněných prutovými prvky BEAM4. Objemové modely byly sestaveny v programu ANSYS a srovnávány s prutovými modely v programu NEXIS (3D a 2D prutové modely).

Krovy jsou velmi citlivé na tuhost ve vodorovných vazbách. V realitě, pokud by tato vazba byla dost tuhá (cca nad 5 MNm<sup>-1</sup>) a krokve by byly ve vrcholu sepnuty dokonale, bez významných prokluzů, tak se konstrukce bude chovat jak trojkloubový nosník. Tento statický model, což prutový model v NEXIS potvrzuje, způsobí zmenšení momentů na krovkách a zvýšení normálové síly na krovkách a značný nárůst vodorovných sil cca na hodnotu rovnající se svislé reakci.

Pokud by, ale podklad byl dostatečně tuhý, může se tuhost proti posunutí ve vodorovném směru pohybovat na hodnotě cca  $K_{ser} = 4 - 10 \text{ MNm}^{-1}$ , podle typu krovu a okrajových podmínek. Krovy je obecně výpočtově složité vystihnout právě pro různorodost jejich spojů (každý spoj je originál).

## LITERATURA

- [1] BECKER, K., RAUTENSTRAUCH, K. Ingenieurholzbau nach Eurocode 5, Konstruktion, Berechnung, Ausführung. Ernst & Sohn, 400 s., 2012, ISBN 978-3-433-03013-4.
- [2] BECKER, K., BLAß, H., J. Ingenieurholzbau nach DIN 1052: Einführung mit Beispielen. Ernst & Sohn, 486 s., 2006, ISBN 978-3-433-02855-1.
- [3] Ceccotti, A. Timber–concrete composite structures. H. Blass (Ed.), Timber engineering-step 2, Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- [4] ČSN 73 1702 mod DIN 1052:2004 Navrhování, výpočet a posouzení dřevěných stavebních konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI. 2007.
- [5] ČSN EN 1995-1-1 73 1701 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI. 2006. 114 s.
- [6] ČSN EN 1991-1-1 73 0035 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha: ČNI. 2004. 44s.

- [7] ČSN EN 1991-1-3 73 0035 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem. Praha: ČNI. 2005. 52+s.
- [8] ČSN EN 1991-1-4 73 0035 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. Praha: ČNI. 2007. 124+s.
- [9] Dias Alfredo M. P. G.; Jorge Luis F. C. The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams. *Engineering Structures*, Vol. 33, Iss. 11, Special Issue: SI, pp. 3033-3042 DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.014, 2011.
- [10] GERNER, M. Tesařské spoje. Grada Publishing a.s., 2003. ISBN 80-247-0076-X.
- [11] Görlacher, R. Historische Holztragwerke; Untersuchungen, Berechnen und Instandsetzen. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe (TH), ISBN 3-345540-01-5.
- [12] Guan, Z.W., Zhu, E.,C. Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings, *Engineering Structure*, 31, 2009, 394-403.
- [13] Johansen, K. W. Theory of Timber Connections. International Association of Bridge and Structural Engineering, Publication 9, p. 249-262, 1949.
- [14] JOHANSSON, H. Plug Shear Failure in Nailed Timber Connections - Avoiding Brittle and Promoting Ductile Failures. Doctoral thesis, Div. of Timber Structures, Luleå University of Technology, 2004:03.
- [15] KOŽELOUH, B. Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí, Obecná pravidla pro pozemní stavby, Komentář k ČSN 73 1702:2007, Praha: ČKAIT, 228 s, 2008, ISBN 978-80-87093-73-3 .
- [16] Kuklík, P., Kuklíková, A. Methods for evaluation of structural timber. *Dřevařský Výzkum/Wood Research*, Vol. 46, 2001, Iss. 1, pp. 1-10, ISSN 0012-6136.
- [17] Lokaj, A. Timber Beam Reliability Assessment. In *Konference Euro-SIBRAM 2002 Colloquium*. Praha : ITAM CAS, 2002, s. 1-8.
- [18] RELEASE 11 DOCUMENTATION FOR ANSYS, SAS IP, INC., 2007.
- [19] Scia Engineer [online]. 2012 [cit. 2012-01-01]. Dostupný z WWW: < <http://www.scia-online.com>>.
- [20] Zienkiewicz, O. C. The Finite Element Methode in Engineering Science. McGraw-Hill: London, 1971.

## COMPUTATIONAL ANALYSIS OF FULL TRUSS HORIZONTAL STIFFNESS

### Keywords

Carpentry construction, stiffness, slip, ANSYS, truss binding, deformation, orthotropy.

### Summary

The main aim of this study are stiffness properties of carpentry construction and their dependence on the stiffness of frames. The reason for a more detailed analysis of these structures is an influence of joints behaviour on the structural frame behaviour. The more detailed computational analysis can offer a deeper view to the real behavior of these structures.