



■ Navrhování celodřevěných tesařských spojů

Článek představuje novou metodiku, která se zabývá návrhem plátového nastavovacího spoje vhodného pro opravy cenných historických dřevěných konstrukcí pomocí protézování poškozených částí trámů. Spoj využívá pro přenos sil šikmých čel a dřevěných spojovacích prostředků. Metodika je prvním dokumentem, který návrh a chování spoje řeší dostatečně komplexně - obsahuje jak část návrhovou tak praktické informace pro výrobu a údržbu spojů.

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Představovaná práce shrnuje čtyřletý výzkum v rámci programu NAKI, který byl finančně podpořen Ministerstvem kultury ČR s cílem získat plnohodnotný podklad pro návrh spojů vhodných pro citlivé opravy historických dřevěných konstrukcí. Jeho výstupem je zde prezentovaná metodika nazvaná „Celodřevěné plátové spoje pro opravy historických konstrukcí“ (dále jen metodika). Na vývoji se podílel Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT a Lesnickou a dřevařskou fakultou Mendelovy univerzity v Brně.

Památková péče často vychází z paradigmatu zachování autenticity díla. To se neobejde bez zachování co největšího množství původního materiálu a historického rázu konstrukce, jež často dokládají jedinečnost a kulturní hodnotu stavby; mnohdy jsou ponechány části též zdrojem cenných informací. Dřevěné historické konstrukce vznikaly při jiné úrovni znalostí a řemeslného zpracování v různých časových obdobích, proto je třeba při návrhu oprav, které musí zajistit bezpečnou provozuschopnost a prodloužení životnosti, volit vhodné řešení. Nestačí uvažovat pouze statickou funkci, ale je nutné reagovat na stavebně-historický vývoj a výsledky diagnostiky současného stavu konstrukce. Špatná údržba a lokálně zvýšená vlhkost často vede k degradaci materiálu; opravy pak vyžadují výměnu celých konstrukčních prvků nebo alespoň jejich částí. V takovém případě je ideálním řešením pro napojení původního dřevěného prvku a nového dřeva (protézy) použití nastavovacího spoje. Nově vkládané části by měly zachovat tvar původního prvku a měly by být vyrobeny ze stejného druhu dřeva. Také vlhkost a další fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva by měly být kompatibilní se stávající konstrukcí. V dnešní době se opravy spojů většinou provádějí pomocí ocelových svorníků, v případě cenných historických dřevěných konstrukcí však může být estetičtější a citlivější variantou použití celodřevěného spoje, který více ctí historický charakter opravované konstrukce. Jeho návrh je však komplikovanější a chybí mu opora v normách.

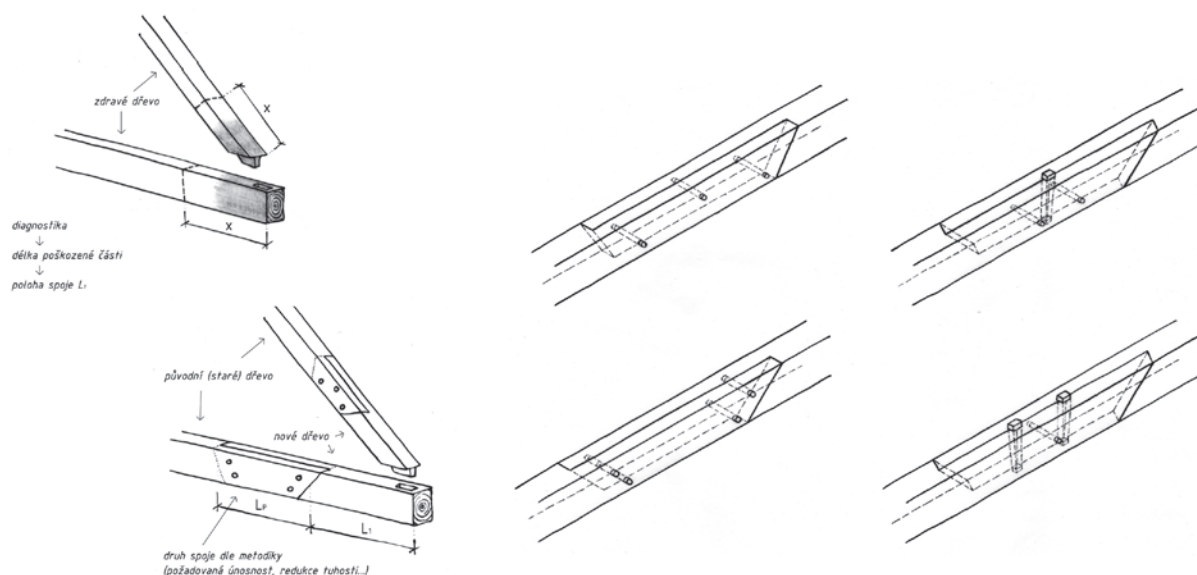
Jako základní dokument pro navrhování dřevěných konstrukcí slouží Eurokód 5, ve kterém však navrhování tesařských spojů není komplexně podchyceno. Spoje, které jsou namáhány na ohyb jako uváděný celodřevěný plátový spoj, však nemohou být správně navrženy, protože jejich mechanické chování (působící síly na čelech a ve spojovacích prostředcích, tuhost) není dostatečně známo.

Metodika předpokládá znalost tématu historických dřevěných konstrukcí a také zkušenosti s navrhováním. Je určena statikům a projektantům. Vznikala současně s památkovým postupem „Využití celodřevěných tesařských spojů při opravách historických konstrukcí“ a oba texty tvoří provázaný celek, který rozšiřuje teoretické základy pro kvalitní opravy dřevěných konstrukcí. Cílí na správce památkových objektů, projektanty a pracovníky nebo organizace či firmy provádějící opravy.

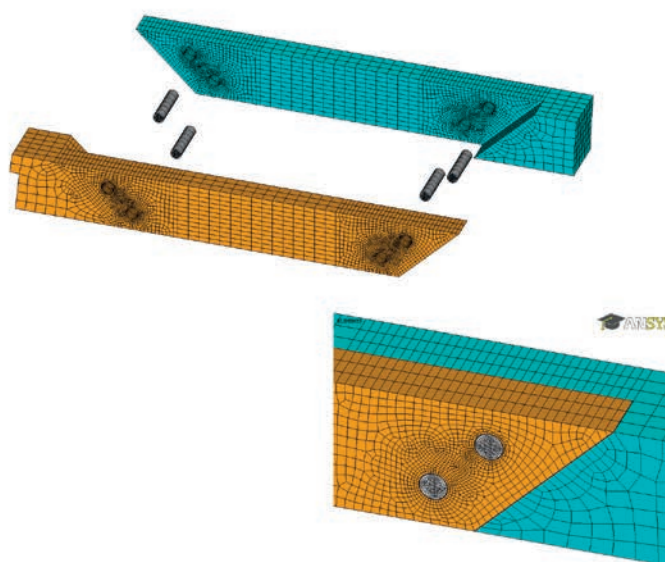
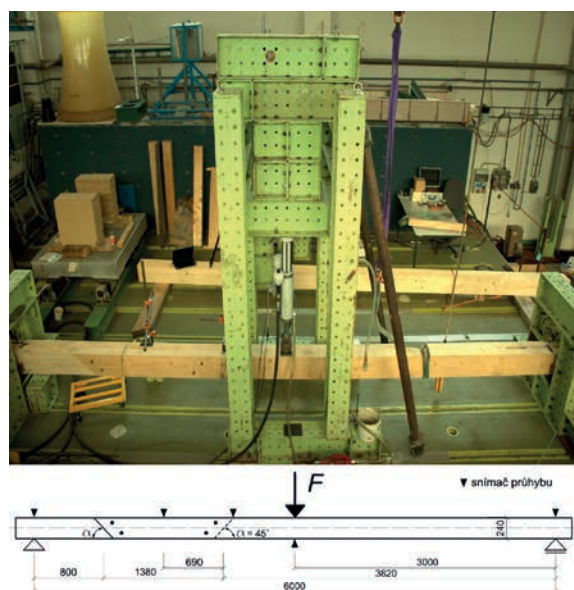
POPIS SPOJE

Přenos sil se v těchto spoji odehrává tlakem a třením na styčných plochách spojovaných částí. Spojovací dřevěné prostředky (kolíky a hmoždíky) jsou k přenosu sil využity – na rozdíl od kolíků ve spoji jako např. čep nebo rybinový plát, v nichž zajišťují pouze daný spoj ve správné poloze. Představovaná metodika popisuje síly působící ve spoji detailně a pro každý typ namáhání konstrukčního prvku uvádí nejvhodnější variantu, viz obr. 1. Jednotlivé varianty zahrnují tříkolíkový spoj, který má nejnižší únosnost a tuhost, nicméně pro použití na opravu krokví (tlak, ohybový moment) je použitelný a je zároveň rychlý na výrobu. Čtyřkolíkový a jednohmoždíkový spoj zajištěný dvěma kolíky jsou vhodné k většímu ohybovému namáhání při možnosti kombinovaného namáhání tahem či tlakem. Pro větší tahové namáhání v kombinaci s ohybem je vhodný zejména dvouhmoždíkový spoj zajištěný jedním kolíkem (poslední spoj na obrázku).

Cenné je na tomto místě uvést výhody a nevýhody spoje. Mezi výhody můžeme zařadit: a) spoj je možné provést přímo na stavbě s pomocí běžného tesařského vybavení; b) spoj je vysoce trvanlivý, a sice za předpokladu správných podmínek a údržby; c) plát dosa-



Obr. 1 – Provádění opravy (vlevo) a různé varianty optimalizovaného nastavovacího plátového spoje: spoje s kolíky a se šikmými čely, možná i varianta s šikmými podkosenými čely (uprostřed); hmoždíkové spoje se šikmými podkosenými čely zajištěné kolíkem (vpravo)



Obr. 2 – Experimentální testování vzorků pomocí hydraulického válce (vlevo), numerický model pro určení tuhostí (vpravo)

huje poměrně vysoké únosnosti; d) použití spoje kultivuje a podporuje tesařské řemeslo; e) spoj je z hlediska estetického kompatibilní s velkou většinou historických dřevěných konstrukcí. Naopak mezi nevýhody můžeme zařadit: a) nutnost dobře ovládat tesařské řemeslo – platí především pro prováděcí firmy; b) je vyžadováno pečlivé provedení a nízké tolerance; c) jsou nutné kontroly a údržba spojů. Z technického hlediska je třeba dbát faktu, že v místě spoje musí být zamezeno příčnému kroucení, dále spoj nelze umístit zcela na kraj, ale začínat musí ve vzdálenosti alespoň dvou výšek od kraje a v neposlední řadě je rovněž třeba dbát na správnou orientaci spoje. Více restrikcí je uvedeno v samotné metodice.

VÝVOJ – EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM A MODELOVÁNÍ

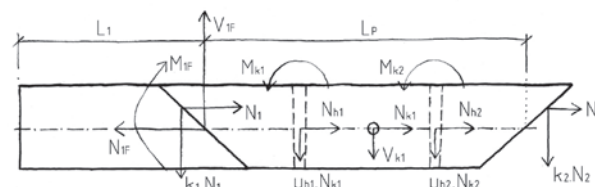
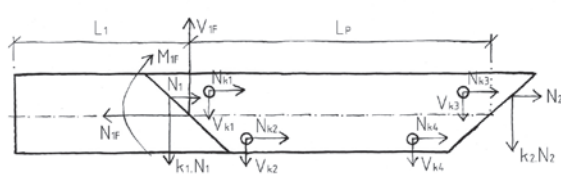
Šikmočelný plát byl detailně zkoumán jak experimentálně, tak pomocí analytického i numerického modelu. Výsledky experimentů sloužily k verifikaci statického a numerického modelu a k nastavení kritérií porušení v modelech použitých. Všechna kritéria (mez pevnosti dřeva, únosnosti systému kolík/otvor v různých směrech, únosnost šikmého čela, únosnost hmoždíku) byla vztažena ke konci lineární oblasti pracovních diagramů. Z modelů byly vygenerovány diagramy únosnosti M-N (viz níže např. obr. 4) a vztahy pro tuhost a průhyb prvku se spojem pro každou ze čtyř variant spoje.

Experimenty byly prováděny pomocí tříbodového ohybu, který maximalizuje zatížení (posouvající síla, ohybový moment) v místě plátu. Při zkouškách bylo obvykle využíváno prostého ohybu, k ověření výpočtů však bylo využito i kombinované namáhání (tah, ohyb). Vzorky se zkoušely většinou v reálné velikosti (šířka × výška × délka = 0,2 × 0,24 × 6 m), popř. ve zmenšenině 1:2 (0,1 × 0,12 × 3 m). Během experimentů se sledovala vlhkost dřeva a byly prováděny materiálové zkoušky testovaných trámů. Výsledkem experimentů byly zejména tuhosti trámů se spojem a jejich únosnost, tyto hodnoty byly přepočteny na stejnou vlhkost dřeva.

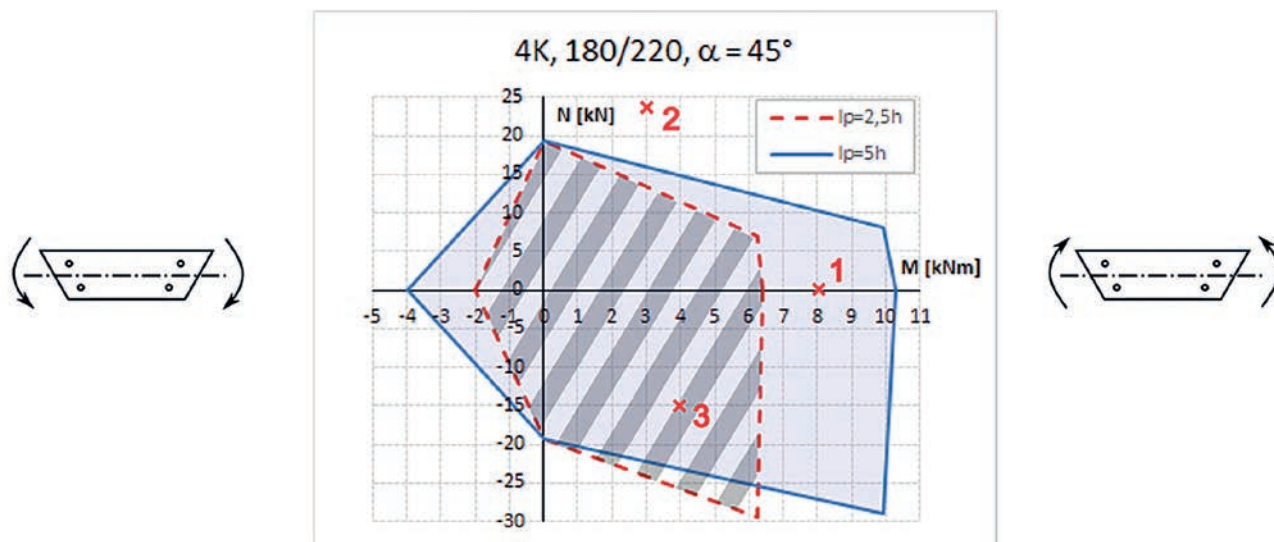
Numerické modelování spojů bylo provedeno pomocí MKP softwaru ANSYS především za účelem určení tuhostí trámů se spojem a k testování některých hypotéz (např. tuhosti kolíků a jejich vliv na chování spoje), viz obr. 2 vpravo.

K určení únosností byl vytvořen detailní statický model (viz obr. 3) pro všechny druhy spojů. Výsledkem modelu byly působící síly na jednotlivých spojovacích prostředcích a čelech. Ty byly použity pro návrh (viz níže) při různých geometriích a konfiguracích spoje za předpokladu kritérií porušení, které byly zjištěny experimentálně. Pro více informací o mechanickém modelu plátu je možno nahlédnout do literatury [1], [4].

Pro rámcové pochopení rozložení sil ve spoji je nutno porozumět základním principům chování spoje, jímž je zapojení šikmých čel do mechanického působení. Čela přenášejí posouvající sílu, a tím zmenšují sílu na kolíku ve směru kolmo na vlákna. Zároveň vlivem rozpírání čel síla v plátu (a tedy i spojovacích prostředcích) otáčí směr svého působení ze sil kolmých na vlákna na síly rovnoběžné s vlákny a může tak být využita vyšší únosnost dřeva v tomto směru. Dřevěné spojovací prostředky díky své podobné tuhosti jako okolní materiál umožňují rovnoměrnější distribuci namáhání kolem otvoru než ty ocelové. Spoj je osazen relativně nízkým počtem spojovacích prostředků, protože jeho tuhost musí být vhodně naladěna. Při vysokém počtu je plát sám o sobě velmi tuhý a dochází k porušení v oslabeném průřezu opraveného trámu. Plát nikdy není vhodný pro místa s vysokým momentem (zejména uprostřed rozpětí), protože kontaktní délka dosedání šikmých čel se výrazně zkracuje, a tím dochází ke koncentraci sil (posouvající, tlaková, síla indukovaná ohybem). Ideální z hlediska teorie i praxe jsou nejvhodnější co nejkratší spoje co nejbližší podpoře – spoj by měl být nejvíce užíván v místech zhlaví trámů, kde svými vlastnostmi exceluje a kde také často dochází ke kontaktu s vlhkostí a kde je dřevo i nejvíce poškozeno.



Obr. 3 – Rozložení sil ve čtyřkolíkovém spoji (vlevo) a ve spoji se dvěma hmoždíky zajištěným jedním kolíkem (vpravo)



Obr. 4 – Příkladů užítí návrhového diagramu M-N; bod 1 odpovídá stropnímu trámu s převažujícím namáháním ohybovým momentem (vyhovuje spoj s délkou L_p větší než $2,5h$), bod 2 představuje prvek namáhaný především tahem a je mimo návrhové diagramy (plát by selhal), bod 3 ilustruje kombinované namáhání prvku vyskytující se např. u krokvi (lze použít spoj minimální délky $2,5h$ s dostatečnou bezpečností). Levá část grafu se záporným ohybovým momentem ukazuje ohýbání spoje na nevhodnou stranu.

NAVRHOVÁNÍ DLE METODIKY

Vzhledem k faktu, že profil opravovaného prvku je předem daný (vyhovuje spoj s délkou L_p větší než $2,5h$), snažíme se při návrhu určit jednotlivé parametry spoje (variantu spoje, úhel šikmých čel, délku plátu L_p , vzdálenost od kraje trámu L_1).

Návrh na mezní stav únosnosti

Statikem vypočítané hodnoty vnitřních sil s nejvýraznějším účinkem, tedy ohybový moment M a normálová síla N z návrhového zatížení, které působí na konstrukci a opravovaný dřevěný prvek, se porovnají s diagramem únosnosti M-N, viz obr. 4. V metodice jsou uvedeny diagramy pro běžné profily vyskytující se v konstrukcích. V tomto článku je uveden pouze jeden diagram, více viz metodika samotná. Mezi jednotlivými rozměry, délkou plátu L_p i různými profily trámů, je možno lineárně interpolovat. Zvolení návrhové bezpečnosti je na straně statika, diagramy ukazují konec lineární oblasti namáhání spoje. V případě, že spoj v daných rozmezích na únosnost či tuhost nevyhovuje z důvodu chybějících návrhových grafů v metodice (např. prvek výjimečných rozměrů), je třeba jeho použití konzultovat s autory metodiky.

Návrh na mezní stav použitelnosti

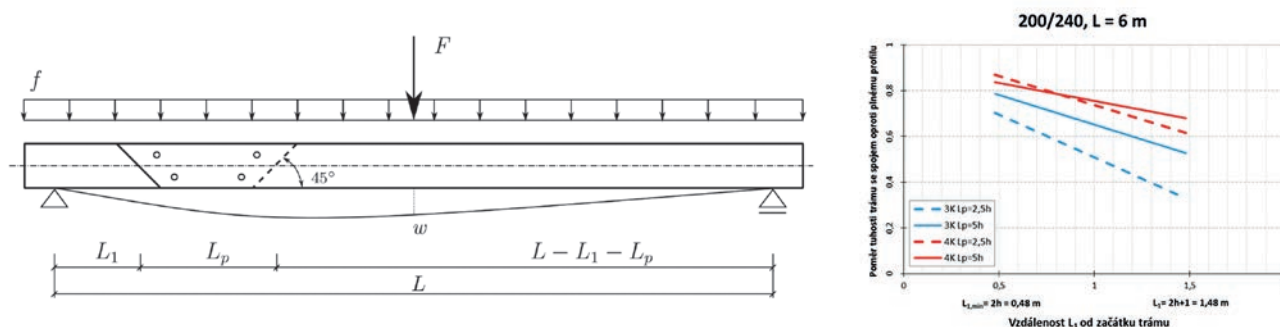
Pro každý z druhů spojů je uveden vzorec pro výpočet tuhosti k z daných parametrů trámu. Je zde uveden i vzorec pro výpočet zvětšení průhybu prvku uprostřed rozpětí – se spojem je označen w oproti průhybu plného trámu w_0 . Výpočet tuhosti je nasnadě, geometrie a závislost tuhosti na parametrech jsou naznačeny na obr. 5. Jako příklad jsou zde uvedené vztahy pro výpočet tuhosti spoje platné pro čtyřkolíkový spoj a pro podmínky $L_1 < L/12$, $L_p < 2,5h$.

$$k = 870 Eb h^{2,6} / l^{2,6} [MNm^{-1}]; w = w_0 4,6 h^{0,4} / L^{0,4}$$

kde b a h je šířka a výška profilu [m], L je délka prvku [m], L_1 je vzdálenost čela v ose od začátku nosníku [m] a E je průměrná hodnota modulu pružnosti [GPa] dle [2]; w je průhyb uprostřed trámu se spojem, w_0 je původní průhyb trámu bez spoje. Závislost tuhosti spojovaného trámu na pozici spoje je vyobrazena na obr. 5 vpravo.

PROVEDENÍ OPRAVY

Metodika sdílí celou část o praktickém provedení spoje s památkovým postupem [5], kde jsou navíc uvedeny např. informace o možné diagnostice vlastností původního dřeva. Jsou zde popsány



Obr. 5 – Rozměry konstrukce a průhyb nosníku (vlevo), závislost tuhosti trámu se spojem při posunu podél střednice trámu (vpravo)



Obr. 6 – Dvouhmoždíkový spoj zajištěný kolíkem použitý při opravě na zámku v Lanškrouně (vlevo) a tentýž spoj použitý na krovu kostela v Červené vodě (vpravo)

výběr dřeva, výroba kolíků či hmoždíků a výroba (vyměření, příprava, sesazení) spoje. Dále uvádíme pouze zkratkovitě některé body důležité pro utvoření názoru na popisované spoje z hlediska praxe: a) suky snižují pevnost spojů, mohou bránit řádnému zasunutí spojovacího materiálu; b) výsušné trhliny ve spojované oblasti mohou vážně ovlivnit ušnosnost spoje a celého prvku; c) nebezpečné je biotické poškození dřeva ve spojích, jelikož i povrchová degradace může mít velký vliv na celkovou pevnost; d) sesychání dřeva může mít vliv na chování spoje a může v některých případech změnit celkové chování konstrukce. Z uvedeného je jasné, že úroveň řemesla a porozumění materiálu je zásadní, je tedy třeba buď spolupracovat se specializovanou firmou či s firmou, která je schopna vyrobit spoje dle postupu a metodiky zde prezentované.

Co se týče údržby, spoje vyžadují správné provozní podmínky, zejména zamezení přístupu vody. Konstrukce by měla být vizuálně zkontrolována při předávání stavby, dále v určených intervalech. Při pravidelné kontrole spoje se provádí i jeho údržba, která zahrnuje především dotažení hmoždíků; kolíkové spoje není nutné speciálně udržovat. Případné havárie spoje zjištěné při prohlídce musí být neprodleně konzultovány se statikem.

Spoje byly již během projektu testovány v praxi a aplikovány při opravě krovu zámku v Lanškrouně či kostela v Červené vodě (obr. 6).

ZÁVĚR

V uvedené stati byly ve zkratce načrtnuty principy metodiky, principy fungování spoje, jeho výhody a nevýhody, informace o jeho výzkumu a vývoji, principy navrhování dle metodiky a na závěr něco praktických informací a aplikací. V metodice samé jsou pak tyto skutečnosti bohatě rozvedené a navíc v ní na konci nechybí cenné přílohy jako tři vyřešené příklady výpočtů či slovníček pojmů.

V době vydání tohoto článku dochází k její certifikaci na základě recenzního řízení, poté bude volně k dispozici na Ministerstvu kultury. Autoři rádi zašlou na žádost elektronickou nebo tištěnou verzi dokumentu. Zároveň jsou pro autory jakékoliv dotazy, připomínky či prak-

tické zkušenosti cennou referencí a zpětnou vazbou. V případě zájmu je autory možné kontaktovat mailem na adrese spoje@itam.cas.cz. Mnohé o výzkumu lze taktéž najít (dočasně) na webové adrese <http://www.itam.cas.cz/spoje>.

Výzkum proběhl za finanční podpory grantu Ministerstva kultury NAKI DF12P010VV004 Návrh a posuzování dřevěných tesařských spojů historických konstrukcí, na jehož řešení se podílel ÚTAM AV ČR, v. v. i., Stavební fakulta ČVUT v Praze a Lesnická a dřevařská fakulta (Ústav nauky o dřevě) Mendelovy univerzity v Brně.

Ing. Jiří Kunecký PhD.,
kunecky@itam.cas.cz,

Ing. Hana Hasníková,
doc. Ing. Petr Fajman CSc.

Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i.

Literatura:

- [1] Arciszewska-Kedzior, A., Kunecký, J., Hasníková, H., Sebera, V.: Lapped scarf joint with inclined faces and wooden dowels: experimental and numerical analysis. In: Engineering Structures, 94:2015, s. 1-8. ISSN 0141-0296.
- [2] ČSN EN 338: Konstrukční dřevo ≤ Třídí pevnosti. 2010.
- [3] Fajman, P.: Rozložení sil v plátovém spoji od ohybového momentu. In: Stavební obzor, 4/2013, s. 101-104. ISSN 1210-4027.
- [4] Fajman, P.: Vliv tuhosti svorníku na síly v plátovém spoji. In: Stavební obzor, 7,8/2014, s. 115-120. ISSN 1210-4027.
- [5] Kloiber, M., Kunecký, J., Hasníková, H., Sebera, V., Tippner, J., Fajman, P., Růžička, P., Stejskal, D.: Využití celodřevěných tesařských spojů při opravách historických konstrukcí. Památkový postup, 2015.
- [6] Kunecký, J., Sebera, V., Hasníková, H., Arciszewska-Kedzior, A., Tippner, J., Kloiber, M.: Experimental assessment of a full-scale lap scarf timber joint accompanied by a finite element analysis and digital image correlation. In: Construction and Building Materials, 76:2015, s. 24-33. ISSN 0950-0618.

Navrhování celodřevěných tesařských spojů

The article outlines new guidelines developed to design half lap scarf joints. These joints are intended for replacement of decayed parts of timber beams (tie beams, ceiling joists, rafters). The joint uses oblique faces and wooden dowels and is able to transfer shear, tension, compression and bending moment. Advantages of the connection feature high stiffness and bearing capacity, esthetic values (if required) and ability to manufacture everything onsite using only a few tools. The presented guide consists of description of the mechanical response of joints, includes nomograms for carrying capacity and equations for computing the resultant stiffness of the repaired beam. Also, recommended steps to successfully craft the joints are shown.