

Návrh tesařských spojů pro opravy dřevěných konstrukcí

Jiří Kunecký, Hana Hasníková, Michal Kloiber

Dřevěné konstrukce mají svou nespornou historickou hodnotu: zdobené dřevěné stropní trámy či dřevěné konstrukce krovů mají kromě stavebně-historické i estetickou hodnotu a nesou v sobě navíc i cenné informace pro budoucnost. Z těchto důvodů je vhodné je i citlivě opravovat způsobem, který zachová maximální možnou část původní konstrukce a zároveň bude nenápadný, takže návštěvník nebude rušen novými prvky a dojem ze stavby splní svůj kulturní, estetický a edukativní účel.

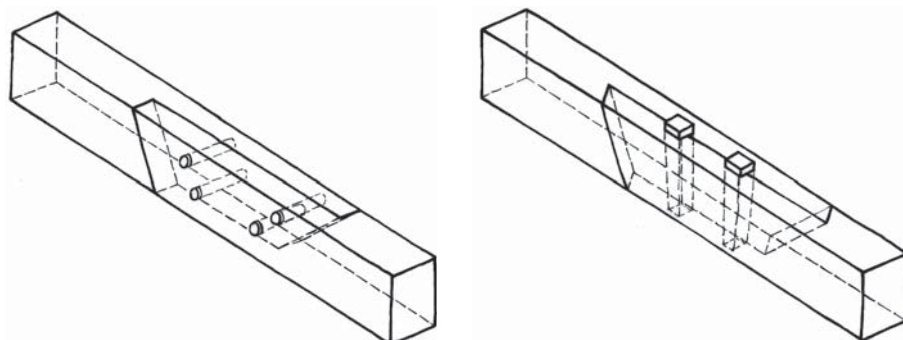
Stropní či vazné trámy nebo krokve jsou nejčastěji poškozeny vlivem hniloby či napadením houbou, které mají společného jmenovatele – přítomnost vlhkosti či přímo vody kvůli zatékání či kondenzaci vodních par v místě dotyku mezi zdívkem a dřevem. Dalším běžným poškozením střešních konstrukcí je napadení hmyzem. Všechna tato poškození vedou k typickému problému – část konstrukce je poškozená, zatímco zbývající místa jsou z pohledu materiálových vlastností dřeva zdravá. V drtivé většině případů se jedná o kraje nosníku blízko záhlaví trámu. Řešením je nahrazení poškozených částí novými, což ovšem vyžaduje kromě znalosti řemesla především **použití nového druhu spoje**, který dovoluje přenášení všech potřebných sil ve spoji a vykazuje rovněž estetickou kompatibilitu. V dnešní době jsou možnými řešeními použití příložek z boků poškozeného trámu či použití plátového svorníkového spoje (**obr. 139**), který může být navíc ještě modifikován podélně vloženou pásovou ocelí do místa prořezu. Ani jedno řešení však nenaplnuje estetické nároky. Triviální možností vždy zůstává výměna celého prvku, ale to je možnost náročná i příliš nákladná, často zbytečná, která snižuje historickou cenu konstrukce, která je připravena o původní materiál.

K řešení problému se nabízí technika plátování, která dovoluje napojit novou část trámu (protézu) na původní část pomocí různých dřevěných spojovacích prostředků. Taková oprava probíhá v několika krocích. Nejprve je zmapován stav poškození dřeva (viz kapitola Zkoušení kvality a zdraví historického dřeva). Konstrukční prvek je pak zkrácen tak, aby zůstalo pouze zdravé dřevo. Trám je následně v místě budoucího spoje opracován podélně a z nového zdravého dřeva je vyrobena kompatibilní protilehlá část (protéza). Pomocí dřevěných spojovacích prostředků (dřevěný kolík, hmoždík) jsou obě části k sobě připojeny. Spoj je nenápadný a splňuje estetické požadavky. Problémem při návrhu zůstává chybějící podpora použití dřevěných spojovacích prostředků v návrhových normách platných v ČR.

Tyto spoje (jednoduchý plát s kolmými čely) přenáší dobře namáhání tahem a tlakem, avšak pro přenos dalších namáhání – ohybu či kombinovaného namáhání nejsou vhodné vzhledem k nízké pevnosti dřeva v indukovaném namáhání – tahu kolmo na vlákna. V těchto



OBRÁZEK 139: Stávající esteticky nevhodné techniky oprav dřevěných konstrukcí – příložkování (vlevo) a použití ocelových svorníkových spojů (vpravo)

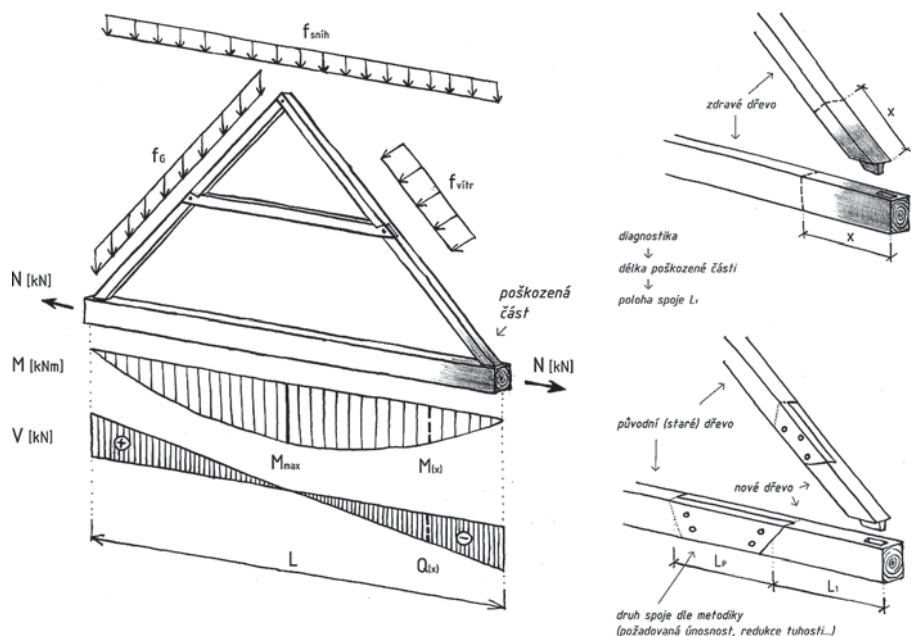


OBRÁZEK 140: Šikmočelný celodřevěný plát spojený pomocí kolíků (vlevo) a hmoždíků (vpravo)

případech je možné využít efektu šikmých čel (**obr. 140**), která rozkládají sílu na čelech a část sil přenášejí rozepřením do směru rovnoběžně s vlákny, čímž se výrazně zvýší jak tuhost, tak i únosnost spoje. Dalším výhodným efektem je distribuce sil na kolících, kterou umožňují poddajné dřevěné spojovací prostředky. Všechny tyto efekty do sebe integruje **šikmočelný celodřevěný plát**, jehož jednotlivé deriváty se staly výsledkem výzkumu.

Popisovaný inovativní spoj byl vyvinut v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT a dále s Lesnickou a dřevařskou fakultou Mendelovy univerzity v Brně. Vývoj byl podpořen z prostředků programu pro podporu národní a kulturní identity (NAKI) a probíhal v letech 2012–2015. Na vývoji spoje se podíleli i zainteresovaní projektanti, statici a tesaři, takže výsledek byl diskutován z různých hledisek.

V literatuře najdeme celou řadu publikací týkajících se kolíkových spojů, které jsou přehledně zpracovány v přehledovém článku Patton-Malloryho et al. (1997). Nicméně, samotný plátový spoj byl ve světě zkoumán jen okrajově, zejména hmoždíkový spoj v omezeném počtu vzorků zkoumal Sangree a Schafer (2009). V České republice ideu spoje načrtl a vyzkoušel v praxi Ing. Vít Mlázovský, což vedlo k experimentálnímu testování spojů a publikacím (Drdáček 2002; Drdáček et al. 2004). ČR právě díky výše zmíněnému projektu patří



OBRÁZEK 141: Opravovaná vazba (vlevo) spolu s typickým zatížením střechy a provedenou opravou

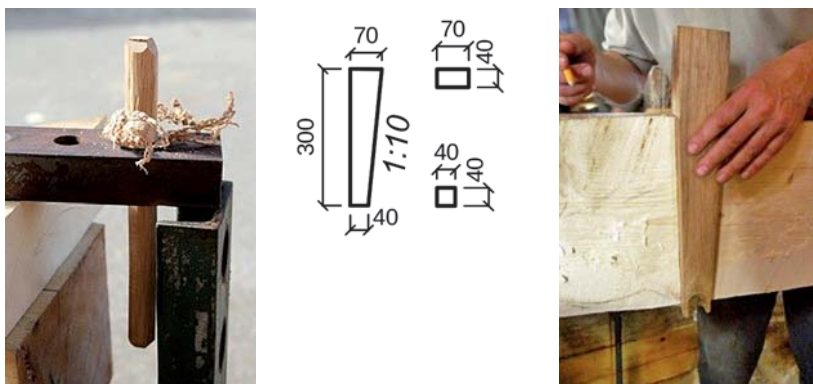
v této oblasti k průkopníkům i díky práci o numerickém a experimentálním zkoušení spojů Kuneckého et al. (2015a), Arciszewska-Kędzior (2015), a tak existuje dostatek dat pro verifikaci modelů chování spojů. Dovršením výzkumu na téma plátových spojů je práce Fajmana et al. (2014), který vyvinul analytický model chování spoje, do kterého je však nutno dosadit některé experimentálně zjištěné hodnoty, zejména tuhosti jednotlivých komponent spoje. Na základě těchto publikací bylo možno sestavit komplexní návod na navrhování dřevěných spojů (Kunecký et al. 2015b).

Spoj splňuje požadavky praxe, které vlastní výzkum iniciovaly – bylo vyžadováno navrhnout takový spoj, který bude schopen přenášet jednotlivé druhy namáhání (tah, tlak, ohyb a jejich kombinace), bude trvanlivý a v konstrukci nenápadný, aby zachoval její ráz. A to i přesto, že je inovativní a není tradiční, neboť sice z tradičního řemesla vychází, je jím umožněn a zpětně ho kultivuje, ale v konstrukcích se běžně nenachází a je v tomto smyslu nepůvodní.

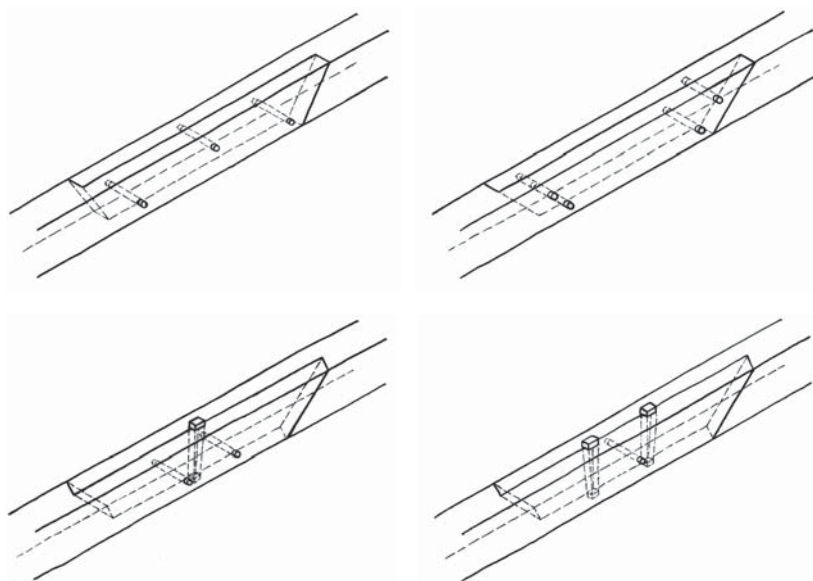
Návrh spoje

Vzhledem ke složitosti spoje a rozložení v něm působících sil je velice obtížné pro projektanta či statika tyto spoje rychle a spolehlivě navrhovat. V rámci výzkumu byla vytvořena již zmíněná metodika (Kunecký et al. 2015b), která tento postup razantně ulehčuje.

Náčrt typického problému včetně zásahu je shrnut na **obr. 141**. Znehodnocené dřevo nacházející se obvykle na konci trámu bude odstraněno a nahrazeno protézami. Vzhledem k tomu, že profil protézy je dán profilem původního opravovaného prvku a vzdálenost zdravého dřeva od konce trámu x je určena diagnostikou dřeva, je třeba umět navrhnout a sladit tyto



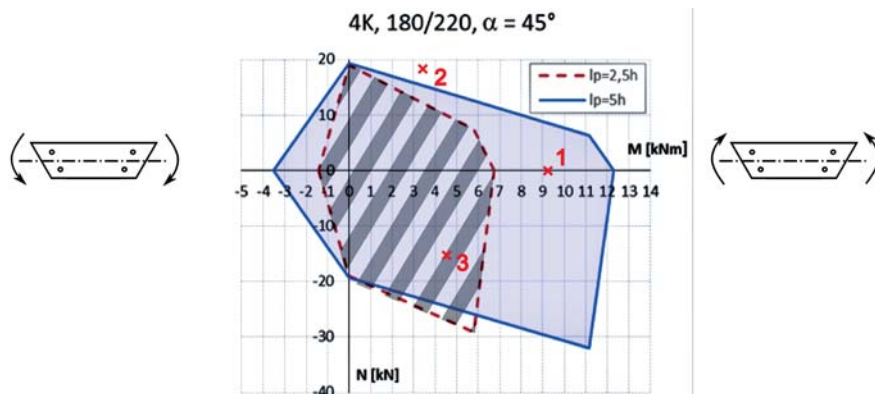
OBRÁZEK 142: Spojevací prostředky – vlevo dubový kolík, uprostřed a vpravo dubový hmoždík



OBRÁZEK 143: Základní typy spojů: vlevo nahoře tříkolíkový, vpravo nahoře čtyřkolíkový, vlevo dole jednohmoždíkový, vpravo dole dvouhmoždíkový spoj

parametry – délku L_1 a délku plátu L_p . Na základě vnějšího zatížení (stálé zatížení, sníh, vítr) se určí, zda spoj zatížení v daném místě unese (navrhování na mezní stav únosnosti) a zda se nezvětší příliš průhyb prvku (mezní stav použitelnosti). Pro návrh tedy známe všechny další potřebné informace – geometrii konstrukce a průběh vnitřních sil po konstrukci (normálová síla N , posouvající síla V , ohybový moment M).

Šikmočelný celodřevěný plát je schopen přenášet tah, tlak, ohyb a jejich kombinace. Na základě náročnosti výroby a vhodného použití v konstrukci byly vyvinuty čtyři varianty spoje, které odpovídají různým vhodným použitím v konstrukci (obr. 143). Rozdíl je dán kromě jejich geometrie zejména použitými spojevacími prostředky, které jsou schopny



OBRÁZEK 144: Návrhový diagram pro mezní stav únosnosti, příklad pro čtyřkolíkový spoj, profil $180 \times 200 \text{ mm}$ a úhel čel 45° . Bod 1 značí prostý ohyb, který krátký spoj neunes a delší ano. Bod 2 ukazuje kombinaci ohybového momentu a tahu, na který spoj nevyhoví a bod 3 ukazuje kombinaci ohybu a tlaku, který vydrží spoje s oběma délkami ($2,5h$ i $5h$).

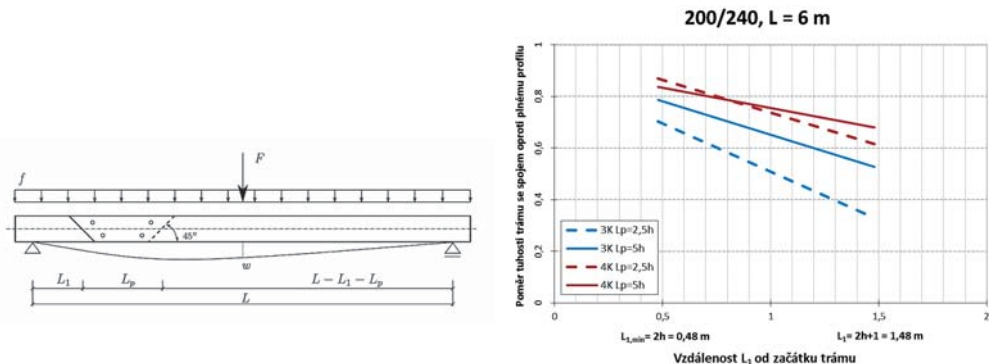
přenést rozdílné množství zatížení (obr. 142). Všechny spojovací prostředky by měly být vyrobeny z dubového dřeva. Dřevěný kolík má kromě nižší tuhosti i nižší únosnost, hmoždík má tyto hodnoty násobně vyšší, ale výroba spoje s hmoždíky je časově náročnější. Náročnost výroby spoje je jeden z aspektů, který může projektant vzít při návrhu v úvahu. Spoj pro opravu tlačných prvků by měly mít sklon šikmého čela 60° , ostatní 45° . Tříkolíkový spoj je nejjednodušší na výrobu, ale jeho únosnost je limitovaná, a je určen především pro použití na krokvicích. Zbytek spojů má univerzální použití a liší se zejména únosností. Ta je srovnatelná u spoje čtyřkolíkového a jednohmoždíkového, zatímco dvouhmoždíkový je nejúnosnějším spojením vůbec. Je ovšem vhodný především na velké profily a jeho výroba je nepracnější. U hmoždíkových spojů jsou nutná vždy i podkosená čela, neboť jinak hrozí při tahu pootočení hmoždíku a rozevření plátu.

Návrh spoje na mezní stav únosnosti

Únosnost spoje byla výzkumem zjištěna a kodifikována pomocí diagramů ohybový moment – normálová síla ($M-N$), jehož didaktická varianta je na obr. 144. Diagram obsahuje dvě obálky odpovídající extrémním doporučeným délkám spoje L_p . Pro každý spoj existuje několik diagramů podle velikosti profilu opravovaného prvku a je možno mezi nimi lineárně interpolovat, pokud je profil či délka spoje odlišná. Pokud jsou vypočítány vnitřní síly v místě středu plánovaného spoje, je možno nahlédnout do diagramu, zda spoj na zatížení vyhoví. **Tyto diagramy zobrazují mezní namáhání, konec lineární oblasti pracovního diagramu zkoušených spojů a jsou uvedeny bez bezpečnosti, kterou při návrhu volí projektant/statik.** Určení výsledné bezpečnosti tak je na jeho straně.

Návrh spoje na mezní stav použitelnosti

Při návrhu sledujeme i maximální průhyb w opravovaného prvku konstrukce. Tuhost konstrukce k se mění dle typu použitého spoje, jeho geometrie, ale i geometrie celého trámu. Díky



OBRAZEK 145: Určení tuhosti prvku se spojem – schéma (vlevo); vpravo změna tuhosti celého trámu v případě posouvání spoje ve směru ke středu prvku s profilem 200 × 240 mm a rozpětím 6 m

numerickým modelům byli autoři schopni určit snížení tuhosti a zvětšení průhybu trámů se spojem. Na obr. 145 je schematicky vyobrazeno určení tuhosti prvku se spojem spolu s vlivem umístění spoje po délce trámu (L_1) na celkovou tuhost trámu. Pro každý spoj jsou uvedeny aproximační vzorce změny tuhosti a průhybu, jako např. pro čtyřkolíkový spoj (13, 14):

$$k = 870Eb \left(\frac{h}{L}\right)^{2,6} \quad (13)$$

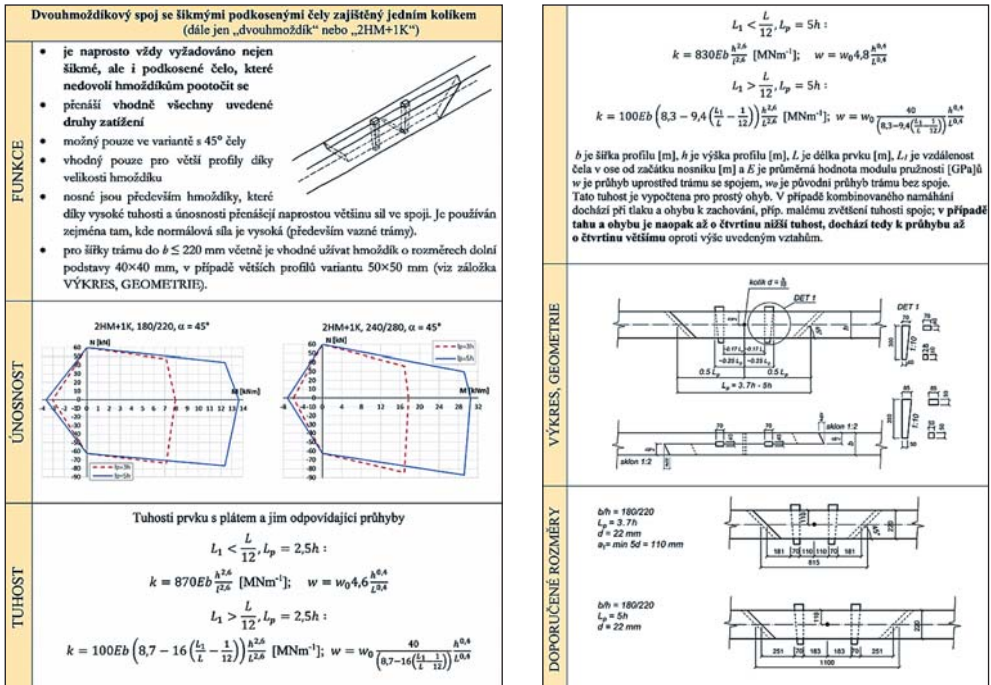
$$L_1 < \left(\frac{L}{12}\right), L_p = 2,5h : k = 870Eb \left(\frac{h}{L}\right)^{2,6} \left[\frac{\text{MN}}{12}\right]; w = w_0 \left(4,6 \left(\frac{h}{L}\right)^{0,4}\right) \quad (14)$$

kde b je šířka profilu [m], h je 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]; w je průhyb uprostřed trámu se spojem, w_0 je původní průhyb trámu bez spoje.

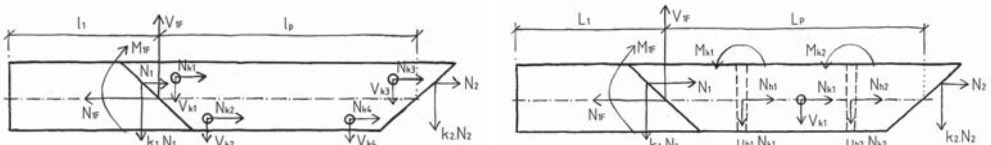
Vymezení hranic návrhu

Navrhování spojů na základě výsledků výzkumu je tedy elegantní a snadné, avšak je nutné přihlídnout k mantinelům návrhu spoje (obr. 146). Druhy namáhání, se kterými model neuvazuje (viz níže), je třeba eliminovat. Limitem jsou minimální a maximální rozměry opraveného prvku, které jsou, stejně jako níže uvedené skutečnosti, v detailu uvedeny v metodice (Kunecký et al. 2015b). Dále je to místo použití – je třeba se vyvarovat míst, kde se mění ohybový moment (podpory), příliš blízko ke koncům trámů apod. Obě čela musí být dosazena na styk minimálně ve dvou třetinách své plochy, aby měla možnost začít fungovat. Výrobce – tesař musí počítat s objemovými změnami dřeva způsobenými změnami vlhkosti a vůle mezi spojovacími prostředky a okolním materiálem se nepřipouští. Kvalita dřeva hraje velkou roli. Řemeslnému zpracování byla ve výzkumu věnována zvláštní péče a ve výsledku je uvedena celá jedna kapitola o technologickém provedení spojů.

Zvláštní důležitost má i kontrola během stavby (zejména správná orientace spojů!) či kontrola spojů po realizaci stavby, kdy v pravidelných intervalech tří let by stav spojů měl být kontrolován a monitorován.



OBRÁZEK 146: Karta spoje shrnuje jeho přednosti a nevýhody; obsahuje všechny zmíněné technické informace, vhodné použití, ukazuje detailní geometrii spoje i s minimální a maximální povolenou variantou pro interpolaci



OBRÁZEK 147: Silové působení uvnitř spojů – vlevo čtyřkolíkový, vpravo dvouhmoždíkový spoj

Princip mechanického chování spoje

Po představení základních typů spojů, druhů namáhání a principu bude přiblížen princip fungování spoje, což zpětně osvětlí rozdílnou únosnost spojů (**obr. 147**).

Pokud je spoj tažen, síly se distribuuji na kolících a hmoždíčkách dle tuhosti jednotlivých komponent. Ne všechny spojovací prostředky jsou tedy vždy nosné, někdy mají prvotně pouze zajišťovací funkci. V hmoždíkových spojích jsou nosné zejména hmoždíky, zatímco v kolíkových kolíky. V případě tlaku se zapojují především šikmá čela. Při namáhání ohybem dochází (v případě ohybání na správnou stranu) k opírání čel, což díky rozkladu sil do složek jednak snižuje sílu ve směru kolmo na vlákna na jednotlivých kolících (nevhodné namáhání), jednak otáčí část sil do směru rovnoběžně s vlákny, ve kterém je dřevo únosnější. V případě ohybu na opačnou stranu čela se vůbec nezapojují a spoj funguje jako kdyby měl čela kolmá a nosnou funkci mají pouze spojovací prostředky.



OBRÁZEK 148: Vlevo krov na zámku v Lanškrouně s aplikovaným dvouhmoždíkovým spojem, vpravo krov kostela v Červené Vodě



OBRÁZEK 149: Výsledek – aplikace vyvinutých spojů v krovu

V případě kombinace jednotlivých namáhání je působení komplexnější. Ve zkratce je možné poznamenat, že při kombinaci ohybu a tlaku se síly na spojovacích prostředcích snižují, a proto je spoj na tento druh zatížení velice vhodný. Pokud se jedná o tah v kombinaci s ohybem, pak spoj je naopak více náchylný k porušení a hrozí i ztráta kontaktu na čelech, což může vést k přerozdělení sil na kolících. Proto je vhodný jednohmoždíkový spoj spíše než čtyřkolíkový pro případy vyšších tahů, protože hmoždík je velice tuhý a nedovolí oddálení i při mezním zatížení. Ostatní druhy namáhání jsou ve spoji zanedbány.

Praktické použití

Spoje byly v rámci testování použity na některých památkově chráněných objektech, pro které je jejich používání primárně doporučeno. Realizace proběhla na krovu zámku v Lanškrouně či kostela v Červené Vodě. Spoje byly umístěny v konstrukci především na místa, kde převažovalo tahové zatížení (**obr. 148, 149**).

Kapitola využívá výsledků výzkumu, který probíhal v letech 2012–2015 v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., v rámci programu NAKI. Výsledkem je aplikovaný výstup v podobě metodiky návrhu plátových celodřevěných spojů se šikmými čely, který umožní projektantům opřít se při návrhu o výsledky, které do té doby nebyly dostupné.

V případě dalšího zájmu o téma, o samotnou metodiku či v případě potřeby konzultace aplikace spojů je možné autory kontaktovat na adrese spoje@itam.cas.cz.

Poděkování

Práce vznikla za finanční podpory grantu NAKI DF12P01OVV004 Ministerstva kultury ČR.

Použitá literatura

- Arciszewska-Kędzior, A., J. Kunecký, H. Hasníková a V. Sebera. Lapped scarf joint with inclined faces and wooden dowels: experimental and numerical analysis. *Engineering Structures*. 2015, 94, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.036>
- Drdáček, M. Zkoušky historických tesařských spojů. In: Kotlíková, O. (ed.). *Sborník odborného semináře. Křivoklát 2002 - Netradiční způsoby oprav historických tesařských konstrukcí*. Praha: STOP, 2002, 22-23.
- Drdáček, M., V. Mlázovský, V. a P. Růžička. Historic carpentry in Europe: discoveries and potential. *APT Bulletin*. 2004, 35(2-3), 33-41. <http://dx.doi.org/10.2307/4126403>
- Fajman, P. Vliv tuhosti svorníku na síly v plátovém spoji. *Stavební obzor*. 2014, 7/8, 115–120. ISSN 1210-4027.
- Kunecký, J., P. Fajman, H. Hasníková, P. Kuklík, M. Kloiber, V. Sebera a J. Tippner. *Celodřevěné plátové spoje pro opravy historických konstrukcí*. Certifikovaná metodika, Ministerstvo kultury ČR, Osvědčení č. 113, 2015.
- Kunecký, J., V. Sebera, H. Hasníková, A. Arciszewska-Kedzior, J. Tippner a M. Kloiber. Experimental assessment of a full-scale lap scarf timber joint accompanied by a finite element analysis and digital image correlation. *Construction and Building Materials*. 2015, 76, 24-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.034>
- Patton-Mallory, M., P. J. Pellicane a F. W. Smith. Modeling bolted connections in wood: review. *Journal of Structural Engineering*. 1997, 123(8), 1054–1062.) [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:8\(1054\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:8(1054))
- Sangree, R. H. a B. W. Schafer. Experimental and numerical analysis of a stop-splayed traditional timber scarf joint with key. *Construction and Building Materials*. 2009, 23(1), 376–385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.004>