



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



Centrum Excellence Telč

Výzkumná zpráva

Zkoušení a evaluace výsledků devítikolíkového (9K) celodřevěného spoje určeného pro použití při rekonstrukcích historických památek

Ing. Jiří Kunecký, Ph.D.

Ing. Hana Hasníková

Ing. Michal Kloiber, Ph.D.



Praha
Říjen 2016

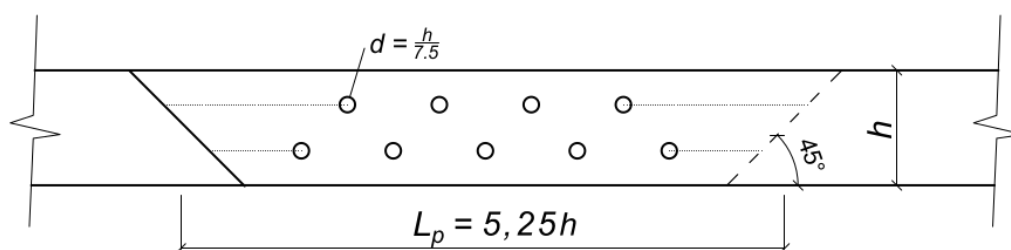


1. Úvod

V návaznosti na původní výzkum celodřevěných tesařských spojů, který byl úspěšně zakončen vydáním certifikované metodiky o jejich návrhu, byl vyvinut další spoj doplňující rozsah jejich aplikace. Hlavní motivací stále zůstává praktické použití spojů, tedy vytvoření návrhových diagramů únosnosti.

Předmětem studie je celodřevěný spoj určený pro protézování míst s **velkým tahem** a s nezanedbatelným ohybovým momentem. Spoj využívá efektu šikmých čel, které musí být pro jeho správné fungování v kontaktu. Ve spoji jsou použity kolíky z tvrdého dřeva. Výhodou devítikolíkoveho spoje (dále jen „9K“) jsou velké průměry kolíků, které umožňují použití v oblastech s velkým tahem. Namáhání spoje v konstrukci můžeme rozdělit na prostý tah, prostý tlak, ohyb v obou směrech a jejich kombinace, přičemž čela napomáhají v únosnosti při ohýbání na vhodnou stranu. 9K spoj se dle simulace lépe chová v krutu než čtyřkolíkový spoj. Kroucení profilu však není v rámci návrhových grafů únosnosti spoje podchyceno ani uvažováno. Vhodným místem použití spoje je vazný trám, popř. další místa s **převládajícími tahy**.

Tento dokument je volné pokračování metodiky pro navrhování celodřevěných plátových spojů pro historické konstrukce [1]. Výzkum pozůstával z experimentů, vytvoření numerického modelu, verifikace a vytvoření návrhových grafů, které jsou hlavním cílem a přímo použitelným výstupem pro praxi.

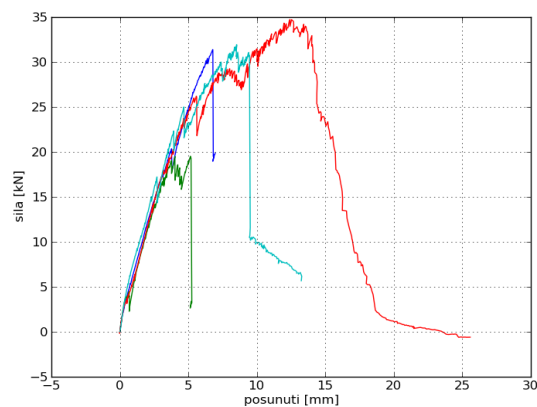


Obr. 1 Orientační vyobrazení 9K spoje

2. Experimenty

Vzhledem k limitovanému počtu dostupných vzorků, bylo možno testovat spoje pouze ve zmenšeném měřítku (1:2, profil 100×120 mm, délka 2,4 m). Zkoušeny byly celkem čtyři spoje na tah (zkrácené na 1,4 m) a čtyři spoje na ohyb, konzistentně s předchozími experimenty byl použit třibodový ohyb. Ohybové experimenty měly délku $L_p=600$ mm a pozice středu plátu na střednici byla $L_I=300$ mm.

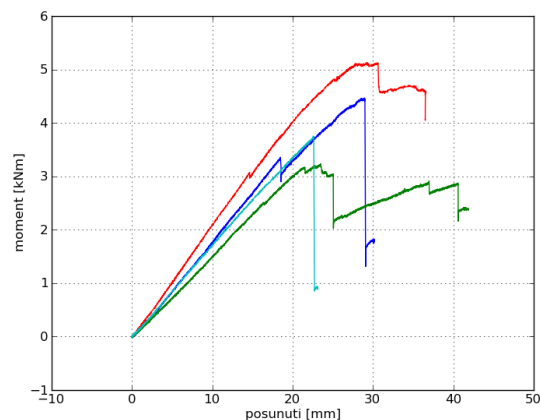
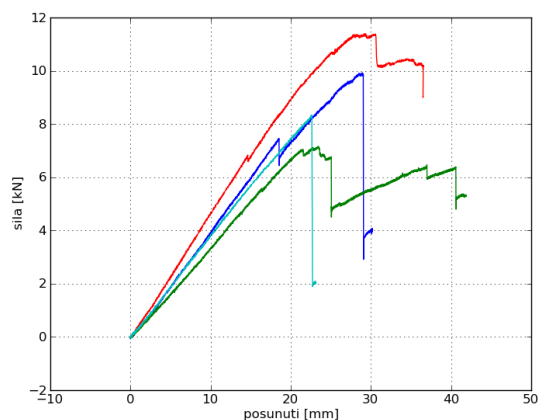
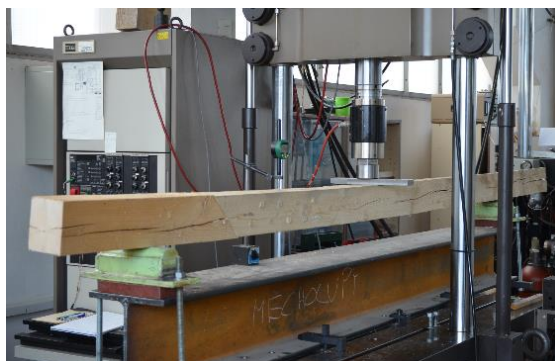
Kvalita smrkového dřeva vzorků byla na základě tvrzení dodavatele a vizuálního hodnocení určena jako třída C24 dle EN338 [2]. Kolíky byly zvoleny o průměru 16 mm. V experimentech byl použit buk lesní jako typický představitel lokálního tvrdého dřeva, v suchém stavu materiálově ekvivalentní se dřevem dubu letního. Vlhkost vzorků byla cca 11%. Ke zkoušení byl použit stroj MTS, řízen posunutím rychlostí 0,2 mm/min v případě tahových zkoušek a 5 mm/min v případě ohybových. V místě podpor byly aplikovány ocelové pláty pro distribuci napětí. Tahové experimenty byly nejdříve vyzkoušeny s dřevem beze spoje pro otestování vlivu čelistí, ve kterých bylo využito tří svorníků s velkým průměrem. Výsledky jsou shrnuty níže v tab. 1 a na obr. 1.



Obr. 1 Zkouška spoje v tahu (vlevo) a výsledky tahových zkoušek (vpravo)

test #	LIN_SILA F_lin kN	LIN_POS u_lin mm	LIN_TUH k_lin kN/m	MAX_F F_max kN	MAX_POS u_max mm
9Ktah_1	20	3,77	5305,0	31	6,8
9Ktah_2	14,3	2,57	5564,2	19	3,8
9Ktah_3	26,2	5,5	4763,6	34,8	12,5
9Ktah_4	17,2	2,7	6370,4	32	8,6
exp_prumer	17,2	3,2	5434,6	25,0	5,3

Tab. 1 Výsledky tahových zkoušek, zeleně označen vzorek vykazující odchylné hodnoty



Obr. 2 Ohybové experimenty prováděné pomocí MTS (nahoře) a výsledky ohybových zkoušek – síla (vlevo) a z ní odvozený ohybový moment uprostřed spoje (vpravo)

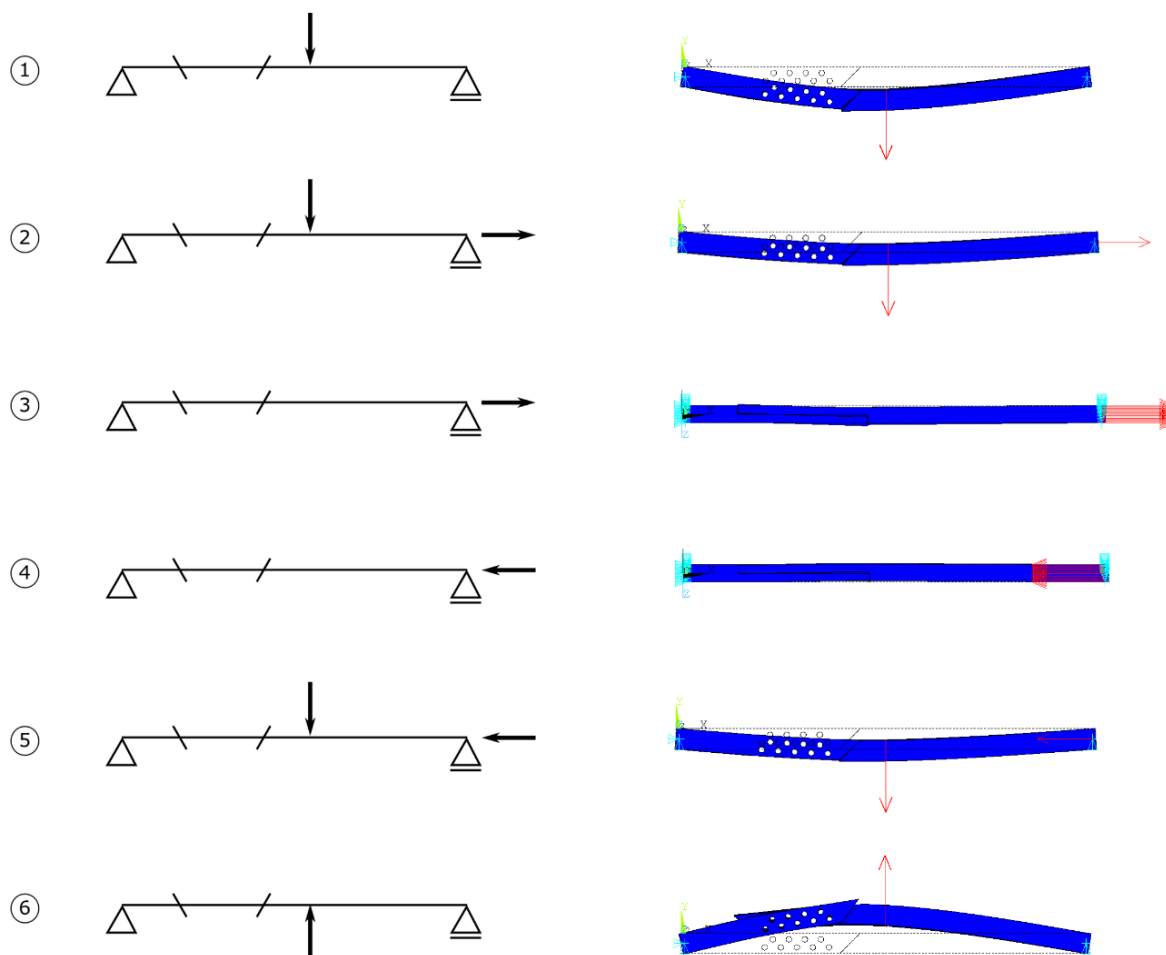


test #	LIN_SILA F_lin kN	LIN_POS u_lin mm	LIN_MOM M_lin kNm	LIN_TUH k_lin kN/m	MAX_F F_max kN	MAX_POS u_max mm
9Kohyb_1	7,4	18,34	2,2	403,5	9,9	28,95
9Kohyb_2	4,73	13,76	1,4	343,8	7,21	23,48
9Kohyb_3	6,82	14,6	2,0	467,1	11,38	27,84
9Kohyb_4	8,35	22,58	2,5	369,8	8,35	22,58
exp_prumer	6,1	16,1	1,8	373,6	8,6	26,2

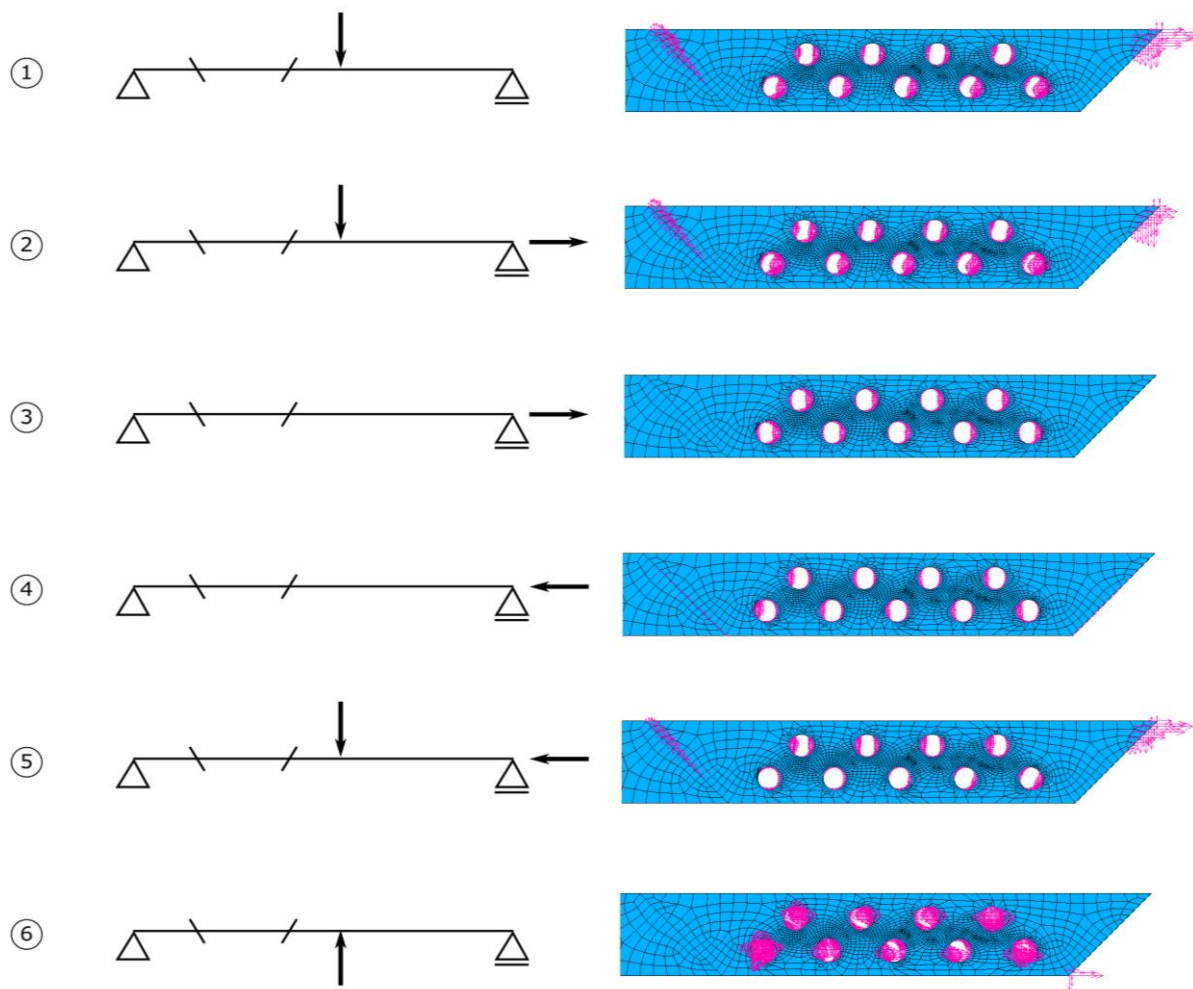
Tab. 2 Výsledky ohybových zkoušek, zeleně označen vzorek vykazující odchylné hodnoty

3. Numerický model

Byl vytvořen pomocí MKP v prostředí ANSYS, materiálové vlastnosti byly definovány ortotropně dle [3]. Model byl třídimenzionální s kontaktem na čelech a kolících. Bylo simulováno šest zátěžových stavů tak, aby bylo možno na základě sil indukovaných na jednotlivých kolících a čelech určit velikost maximální možné síly pro zatížení. Síly na jednotlivých kontaktních místech a napětí v kritických průřezích byly porovnány s kritérii porušení, stejně jako v metodice [1], a na základě těchto hodnot byly zkonstruovány přehledné návrhové grafy pro mezní stav únosnosti.



Obr. 2 Jednotlivé zátěžové stavy a jim odpovídající průhyby prvku s 9K spojem



Obr. 3 Jednotlivé zátěžové stavy a typické distribuce reakčních sil na levé části spoje (protěza u podpory)

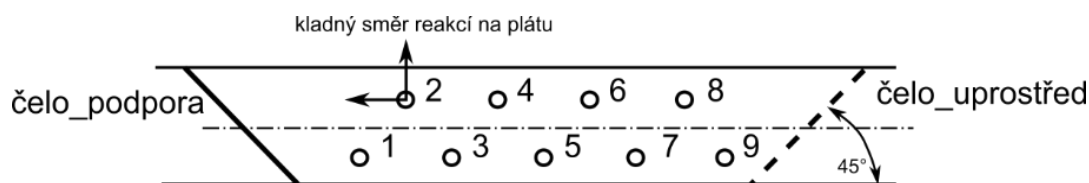
Výsledné tahové síly byly dále sníženy tak, aby původně platná kritéria porušení pro jednotlivé kolíky odpovídala chování skupiny spojovacích prostředků dle EC5 [4] dle:

$$N_{max} = n_{ef} \cdot F_{kolik,0,max} = n^{0,9} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \cdot F_{kolik,0,max} = (4^{0,9} + 5^{0,9})^4 \sqrt{\frac{6d}{13d}} \cdot F_{kolik,0,max} \text{ [N]}.$$

Únosnost kolíku byla převzata z literatury [4]:

$$F_{kolik,0,max} = 9.5d^2 \text{ [N]} ,$$

kde d je průměr kolíku. Důvodem byl fakt, že pro velké průměry kolíků je tento vztah pesimističtější (na straně bezpečnosti) než testovaný původní vztah z metodiky $F_{kolik,0,max} = 12.5d^2 - 54d \text{ [N]}$.





F _x [N]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CELO POD	CELO UPR
konfig 1	1704	605	1399	357	1465	124	1750	-205	2343	-3839	-5703
konfig 2	1298	643	1021	424	1023	269	1184	172	1560	-1443	-1150
konfig 3	1236	1207	972	1056	937	1022	1018	1305	1247	0	0
konfig 4	-1297	-933	-823	-634	-763	-620	-874	-1066	-1335	-810	-846
konfig 5	219	-505	249	-364	311	-434	399	-925	517	-1505	-2963
konfig 6	-2356	3200	-1966	2837	-2023	2885	-2233	3778	-3093	0	-1029
F _y [N]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CELO POD	CELO UPR
konfig 1	-520	-350	-145	-255	-277	-346	-461	-444	-512	-4822	3134
konfig 2	-413	-248	-98	-148	-146	-188	-226	-203	-181	-2343	1695
konfig 3	31	15	16	2	-4	5	-20	0	-45	0	0
konfig 4	378	167	92	31	-3	-34	-99	-183	-386	-505	540
konfig 5	-3	-72	-2	-112	-119	-201	-261	-323	-433	-2698	1725
konfig 6	5698	2967	1326	650	391	-137	-396	-2264	-3787	0	554

Tab. 3 Reakční síly na levé straně spoje a čelech dle notace načrtnuté na předchozí straně; není uvedena reakce podpory a proto součet se nerovná nule, ale zatěžovací síle

4. Verifikace

Každý model je třeba validovat experimentálními výsledky, ačkoliv právě v tomto případě jsou možnosti omezené – síly na kolících se zjistit nedají a vychází se z limitovaného počtu vzorků. Výsledky jsou v tab. 4 níže. Pokud porovnáme výsledky bez extrémně odlišných výsledků (viz experimenty – tab.1 a 2 bez zelených řádků), dostáváme se s odhadnutými hodnotami porušení ještě níže.

namáhání	LIN_MOM	LIN_SILA
	M_lin	F_lin
	kNm	kN
ohyb - experiment	1,8	
ohyb - model	1,5	
tah - experiment		17,2
tah - model		15,4

Tab. 4 Verifikace numerického modelu pomocí experimentálních dat

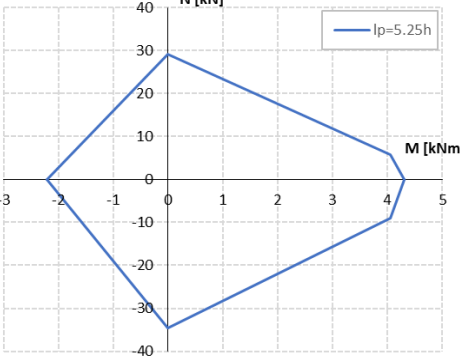
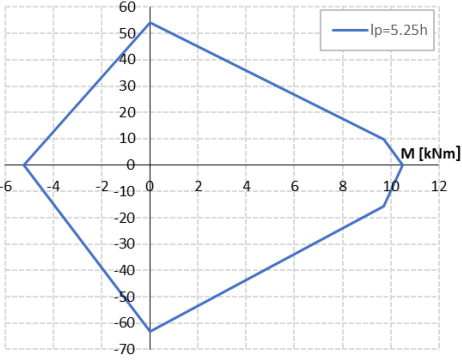
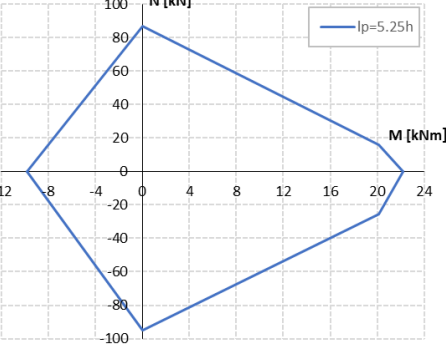
Verifikace tuhosti byly provedeny pomocí porovnání průhybu vypočteného dle modelu 4K spoje z metodiky [1] a ohybových zkoušek, výsledná chyba byla do 10%.

Ukazuje se, že devítikolíkový spoj má při ohybovém namáhání podobné vlastnosti jako spoje osazené menším počtem kolíků, což potvrzují i předešlé experimenty srovnávající únosnost a tuhost spojů se dvěma, třemi či čtyřmi kolíky.

5. Návrhové hodnoty a proces

Na základě modelu byly vygenerovány návrhové grafy únosnosti a vytvořena celá „karta spoje“, které se mohou použít stejným způsobem a za stejných podmínek platnosti jako metodika navrhování [1]. Návrhové hodnoty jsou opět zcela bez bezpečnosti a udávají obálku, která vyjadřuje stav porušení (konec lineární oblasti, který u dřeva může, ale nemusí, být v případě křehkého lomu nebo imperfekce stavem limitním).

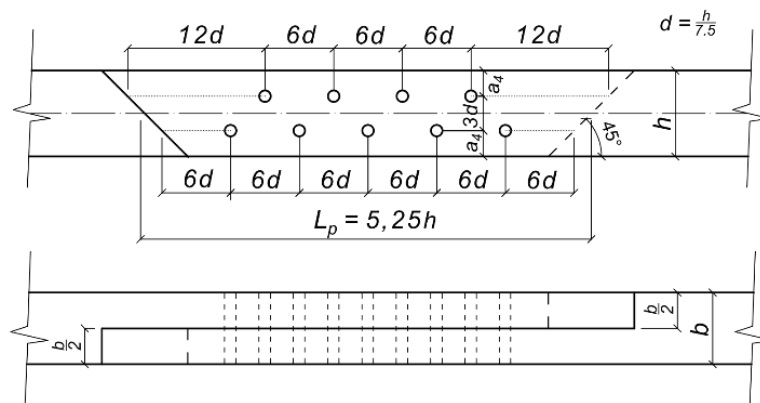
Bezpečnost návrhu určuje statik. Všechny ostatní informace o spoji jsou uvedeny v metodice, přístupy, navrhování, údržba i výroba jsou analogicky popsány v metodice pro 4K spoj.

	Devítikolíkový spoj se šikmými čely (dále jako „devítikolík“ nebo „9K“), Varianta s pouze šikmými (A) nebo s šikmými podkosenými (B) čely
FUNKCE	• přenáší vhodně především tah, lze použít i pro kombinaci většího tahu s ohybem • pouze v alternativě se 45° čely • vhodný pro větší profily • nosné jsou všechny kolíky • v případě kroucení profilu, možné točivosti nového či starého dřeva, příp. tvarové změny vlivem sesychání je vhodné použít variantu B s podkosenými čely (viz VÝKRES, GEOMETRIE - varianta B)
ÚNOSNOST	9K, 140/160, $\alpha = 45^\circ$  9K, 180/220, $\alpha = 45^\circ$  9K, 240/280, $\alpha = 45^\circ$ 
TUHOST	$L_1 < \frac{L}{12}, L_p = 5,25h :$ $k = 830Eb \frac{h^{2,6}}{l^{2,6}} \text{ [MNm}^{-1}\text{]}; \quad w = w_0 4,8 \frac{h^{0,4}}{L^{0,4}}$ $L_1 > \frac{L}{12}, L_p = 5,25h :$ $k = 100Eb \left(8,3 - 9,4 \left(\frac{L_1}{L} - \frac{1}{12} \right) \right) \frac{h^{2,6}}{L^{2,6}} \text{ [MNm}^{-1}\text{]}; \quad w = w_0 \frac{40}{\left(8,3 - 9,4 \left(\frac{L_1}{L} - \frac{1}{12} \right) \right)} \frac{h^{0,4}}{L^{0,4}}$ 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] dle [1]; w je průhyb uprostřed trámu se spojem, w_0 je původní průhyb trámu bez spoje. Tato tuhost je vypočtena pro prostý ohyb.

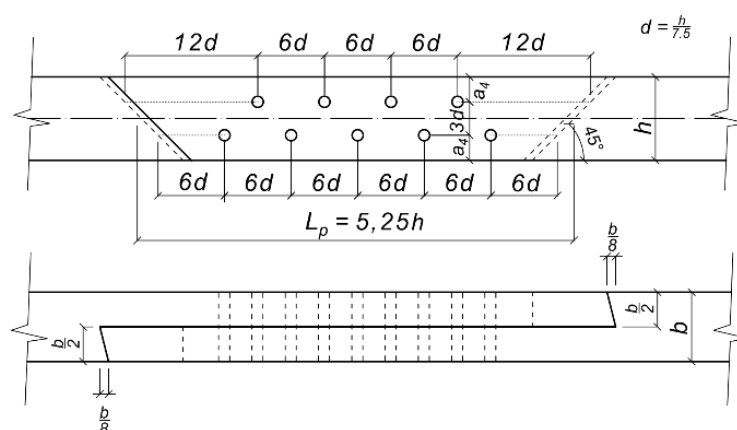
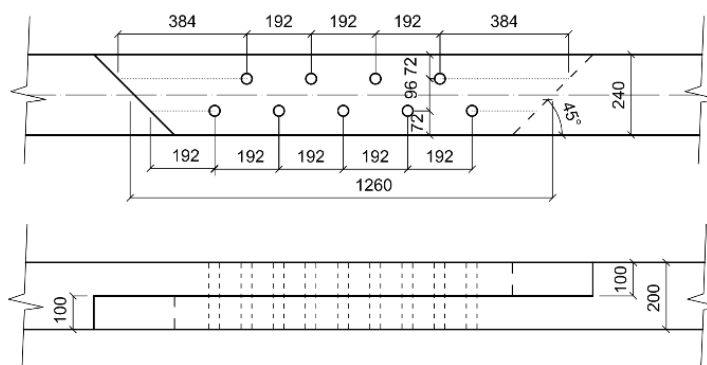
VÝKRES, GEOMETRIE

DOPORUČENÉ ROZMĚRY

Varianța A



Varianța B


$$h = 240 \text{ mm}, b = 200 \text{ mm}$$
$$d = \frac{h}{7.5} = 32 \text{ mm}$$
$$L_p = 5.25h = 1260 \text{ mm}$$
$$a_1 = a_3 = 6d = 192 \text{ mm}$$




6. Diskuse

Jak je možno porovnat s metodikou, ohybová únosnost spoje je velice podobná pro 4K i 9K spoj, je ale nutné podotknout, že je to v jistém smyslu souhra okolností, neboť oproti 4K dochází k porušení často v minimálním průřezu na straně většího momentu, což je logické, když se více zapojují tužší a únosnější kolíky. Nicméně, únosnost je dostatečná a hlavní je pro tento spoj únosnost tahová, která je výrazně větší. Tvar návrhových grafů je poněkud jiný (chybí tak rozsáhlý nárůst únosnosti v kombinaci ohyb-tlak jako u 4K), to je dáno nejen jiným mechanickým fungováním spoje, ale i jiným modelem, který byl použit pro jejich generování, neboť složitost 9K spoje již analytickým modelem není efektivní postihnout skrze náročnost analytického modelu.

Zajímavé je porovnat v rámci experimentů s 16 mm kolíky (tab. 1), jak působí víc kolíků na tah dle redukce $N_{skup} = n_{ef} \cdot F_{kolik,0,max} = 15,4 \text{ kN}$ a jak by působily, kdyby neformovaly skupinu, tedy $N_{max} = n \cdot F_{kolik,0,max} = 21,9 \text{ kN}$. Experimentální hodnota 17,2 kN sice není příliš optimistická, avšak pokud přihlídneme k maximálním silám dosaženým během testování, získáváme 25 kN, a to včetně výjimečně odlišného vzorku. Skupinové fungování dřevěných kolíků oproti ocelovým svorníkům by mohlo být zajímavým tématem další studie.

Laboratorní testování je prvním krokem k aplikaci, rádi bychom proto měli další data z monitoringu jasně předpověditelných částí rekonstrukcí a tuto službu rovněž v rámci výzkumu nabízíme. V případě jakéhokoli dotazu je možné autory kontaktovat na emailu spoj@itam.cas.cz.

7. Literatura

- [1] Kunecký J., Hasníková H., Kloiber M., Fajman P., Kuklík P., Sebera V., Tippner J.: Celodřevěné plátová spoje pro opravy historických konstrukcí. Metodika MK ČR, Praha, 2016, 72 s.
- [2] ČSN EN 338: Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti. 2010.
- [3] Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M.: Štruktúra a vlastnosti dreva. Príroda Bratislava, 1997, 473 s.
- [4] ČSN EN 1995-1-1 *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2006. (včetně změn).
- [5] ČSN 73 1702 *Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí - Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2007.

8. Přílohy

