

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Milan Podlena

Zpracování dřeva a technika v lesním hospodářství

Název práce

Porovnání pevnosti kolíkových a čepových spojů u dřevěných oken

Název anglicky

The strength of dowel and tenon joints used on wooden windows and their comparison

Cíle práce

Hlavním cílem disertační práce je staticky posoudit, zda se pevnost kolíkových spojů navržených v rohových spojech (v provedení dle výrobců oken), ve kterých jsou dřevěná okenní křídla silově zatěžována, může vyrovnat pevnosti čepového spoje a rozdíly mezi těmito dvěma spoji statisticky vyhodnotit.

Metodika

V rámci vypracování disertační práce bude řešeno několik dílčích cílů, ve kterých budou zjišťovány jednotlivé faktory na pevnost lepeného spoje. Na základě vyhodnocení pevnosti kolíků, ve srovnání s čepem a rozpořem, tak bude navržena optimalizace slabšího spoje z hlediska konstrukční a technologické stránky výrobců dřevěných oken. Jedním z faktorů bude například pevnost slepu použitých lepidel pro vyloučení vlivu lepidla na rozdílnou pevnost rohových spojů. Dále budou také testovány různé varianty kolíků při vytažení a zjišťován tak jejich vliv na pevnost lepeného spoje s použitím stejných lepidel.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 NS

Klíčová slova

dřevěné okno, rohový spoj, čep a rozpor, kolíkový spoj, pevnost, ohybový moment, tuhost

Doporučené zdroje informací

- ČSN EN 204. Klasifikace termoplastických lepidel na dřevo pro nekonstrukční aplikace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- ČSN EN 205. Lepidla na dřevo pro nekonstrukční aplikace: Stanovení pevnosti lepeného spojení ve smyku při tahovém namáhání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- ČSN EN 514. Profily z neměkčeného polyvinylchloridu (PVC-U) pro výrobu oken a dveří: Stanovení pevnosti svařených rohů a T-spojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- JOŠČÁK, P. Pevnostné navrhovanie nábytku. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1999. 246 s. ISBN 80-228-0921-7.
- JOŠČÁK, P. – KOLLÁR, P. Strength characteristics of Hoffmann-Schwalbe corner joints of window sash. In: Annals of Warsaw University of Life Sciences: Forestry and Wood Technology. Warsaw: University of Life Sciences, 2007, No 61, s. 291 – 295. ISSN 0208-5704.
- PANTALEO, A – FERRI, D. – PELLERANO, A. Tests for outdoor window profiles: 90° mortise tenon corner joints strength assessment. In: Wood Material Science & Engineering. Bari: University of Bari, 2014, s. 11. DOI: 10.1080/17480272.2014.939712.
- WARMBIER, K. – WILCZYŃSKI, A. Strength and stiffness of dowel corner joint – effect of joint dimensions. In: Folia forestalia polonica. Bydgoszcz: Pedagogical University in Bydgoszcz, 2000, series B, 31. s. 29 – 41.
-

Předběžný termín

2017/18 LS – FLD – Obhajoba DisP

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí

Elektronicky schváleno dne 9. 8. 2015

Ing. Jan Bomba, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 8. 2015

doc. Ing. Alois Skoupý, CSc.

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 9. 8. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 08. 07. 2018

Prohlášení

"Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma *Porovnání pevnosti kolíkových a čepových spojů u dřevěných oken* vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby."

V Praze dne 10. 07. 2018

Ing. Milan Podlena

Poděkování

Poděkování patří hlavně doc. Ing. Martinu Böhmovi, Ph.D., školiteli a vedoucímu předkládané závěrečné práce za jeho čas a rady. Velmi také děkuji Ing. Janu Bombovi, Ph.D. a ostatním členům Katedry dřevěných výrobků a konstrukcí, ale i Ing. Vlastimilovi Borůvkovi, Ph.D. z Katedry základního zpracování dřeva, Fakulty lesnické a dřevařské (FLD) na České zemědělské univerzitě (ČZU) v Praze. Děkuji i Ing. Milanu Součkovi z firmy Vereinigter Baubeschlag-Handel, s.r.o. za podnět k výzkumu a firmám, které poskytly vzorky rohových spojů k účelům testování a naplnění tak cílů této práce. K vypracování také napomohlo financování výzkumu z Interní grantové agentury (IGA) na FLD s registračními čísly projektů A11/15, B01/16 a B01/18.

Porovnání pevnosti kolíkových a čepových spojů u dřevěných oken

The strength of dowel joints and tenon joints used on wooden windows and their comparison

Anotace:

Disertační práce byla vypracována formou jednotícího komentáře ke třem publikovaným vědeckým článkům. Jejím hlavním cílem bylo určení pevnosti rohových spojů mezi čepem a rozporom oproti kolíkovým spojům na dřevěných okenních křídlech. Zároveň byl výzkum zaměřen na testování pevnosti slepu lepidel a pevnost při vytahování různých kolíků. Okenní profily byly vyrobeny ze smrkového lepeného hranolu (dle standardu výrobců) s nejčastěji používanými profily šířky 78 a 92 mm. Pro testování rohových spojů byl prvně navržen univerzální metodický postup (včetně návrhu upínacího přípravku) s postupem vyhodnocení výsledků. Navrženou metodou tak byla prokázána hypotéza o vyšší pevnosti trojitého čepu a rozporu na základě velikostí ohybových momentů. Trojitý čep a rozpor dosáhl statisticky významně vyšších maximálních ohybových momentů ($p < 0,05$) v tahu (344 Nm) a tlaku (325 Nm) oproti kolíkovým spojům v tahu (167 Nm) i tlaku (168 Nm). Rozdílnost byla způsobena především odlišnou velikostí lepených ploch, kterou měl trojitý čep a rozpor oproti kolíkům o 29 % větší. Při testování došlo ke kohezivnímu porušení ve spirálovitých kolicích z dubového dřeva. Individuálním testováním variant kolíků byla naměřena největší pevnost u spirálovitě rýhovaných kolíků (7,9 MPa). Navíc porovnáním dubových a bukových kolíků bylo prokázáno, že rozdíl ve dřevinách nebo mezi podélně a spirálovitě rýhovanými kolíky nemá statisticky významný vliv na pevnost lepeného spoje ($p > 0,05$). Na základě měření proto lze konstatovat, že u testovaného rohového spoje s kolíky bylo dosaženo maximální pevnosti.

Klíčová slova: dřevěné okno, rohový spoj, čep a rozpor, kolíkový spoj, pevnost, ohybový moment, tuhost

Porovnání pevnosti kolíkových a čepových spojů u dřevěných oken

The strength of dowel joints and tenon joints used on wooden windows and their comparison

Abstract:

This dissertation thesis was composed of a unifying comment to three published research articles. It aims to determine and compare the strength of mortise with tenon and dowels fabricated as corner joints on the wooden window sashes. Furthermore, the research also focused on the test of bond line strengths and the withdrawal strength of various dowels. Window profiles were manufactured from glue laminated timber made from spruce of the most commonly used frame depths of 78 and 92 mm. A universal methodology was developed firstly for testing of corner joints (including the fixing component) and secondly for the process of result evaluation. The proposed methodology thus confirmed the hypothesis of higher strength of triple mortise and tenon based on ascertained bending moments. The triple mortise and tenon achieved statistically significant higher maximum bending moments ($p < 0,05$) in tension (344 Nm) and compression (325 Nm), versus dowels in tension (167 Nm) and compression (168 Nm). This difference was mainly caused by the ratio of glued areas, which was 29% higher for triple mortise and tenon. During the testing, cohesive failures occurred in spiral dowels that were manufactured from the oak. By individual testing of various dowels, the highest withdrawal strength of the multi-grooved dowels with spiral patterns (7,9 MPa) were measured. Moreover, by comparison of oak and beech dowels, the difference in wood species or between multi-grooved dowels with the spiral and straight patterns, did not have a statistically significant effect on the withdrawal strength ($p > 0,05$). Therefore, it is possible to conclude that the tested corner joint in the manufacture standard with dowels had achieved maximum strength.

Key words: *wooden window, corner joint, tenon and mortise, dowel joint, strength, bending moment, stiffness*

OBSAH

1. Úvod	1
1.1. Okna.....	1
1.1.1. Dřevěná vs. plastová okna	2
1.1.2. Vývoj oken.....	3
2. Rozbor řešené problematiky	5
2.1. Normové požadavky na okna	5
2.2. Rohové spoje.....	6
2.2.1. Testování rohových spojů.....	7
3. Cíle a přínos práce	10
4. Metodika	11
4.1. Testování pevnosti rohových spojů	11
4.2. Testování pevnosti slepu použitých lepidel	13
4.3. Testování pevnosti spojů s vlepeným kolíkem	14
5. Výsledky a diskuze	17
5.1. Vliv použitých lepidel na pevnost spoje	17
5.2. Vliv typu spoje a velikosti profilu na pevnost rohového spoje.....	18
5.3. Vliv šířky letokruhů okenních hranolů	23
5.4. Vliv faktorů na pevnost spoje vlepeného kolíku	24
5.4.1. Struktura povrchu kolíku	24
5.4.2. Vliv dřeviny kolíku a účinnost rýhování	27
5.4.3. Průměr kolíku	29
5.4.4. Účinnosti předlepení kolíku a vliv použitých lepidel	31
6. Závěr	35
7. Doporučení	37
8. Seznam literatury a použitých zdrojů	39
9. Seznam příloh	47

10. Přílohy.....	48
Příloha 1: Shrnutí zkoumaných parametrů a výsledků rohových spojů dřevěných oken (Podlena et al. 2017).....	48
Příloha 2: Podklady k výrobě universálního přípravku k upnutí rohových spojů s 3D vizualizací návrhu a technickým výkresem s rozměry.....	49
Příloha 3: Varianty rohových spojů dřevěných okenních křídel	50
Příloha 4: Příklad objednávkového formuláře na výrobu rohových spojů určených k testování	51
Příloha 5: Příprava zkušebních těles rohových spojů – vrtání otvorů pro čepy na stojanové vrtačce (foto autor)	52
Příloha 6: Příprava zkušebních těles rohových spojů - klimatizace předvrtaných vzorků před testováním (foto autor)	52
Příloha 7: Upnutí rohových spojů s kolíky (IV 92) do upínacího přípravku v universálním trhacím stroji (foto autor).....	53
Příloha 8: Varianty testovaných kolíků a vzorek zkušebního tělesa určené k testování pevnosti kolíku při vytažení (foto autor).....	54
Příloha 9: Upnutí zkušebního tělesa s testovaným kolíkem do čelistí v universálním trhacím stroji (foto autor).....	55
Příloha 10: Výsledky testování rohových spojů v úhlové rovině tlaku rozdělené podle typu spoje (profilu).....	56
Příloha 11: Výsledky testování rohových spojů v úhlové rovině tahu rozdělené podle typu spoje (profilu).....	57
Příloha 12: Technický list k PVAc lepidlu GXL 4 (Rakoll)	58
Příloha 13: Technický list k PVAc lepidlu 1K Holzkaltleim D4 (Würth)	60
Příloha 14: Technický list k PVAc lepidlu D4-Leim 1K (GreenteQ)	63
Příloha 15: Technický list k PUR lepidlu Lear D4 (LEAR).....	65

SEZNAM PUBLIKOVANÝCH ČLÁNKŮ K DISERTAČNÍ PRÁCI

Článek 1: PODLENA, Milan; BORŮVKA, Vlastimil. **Stiffness Coefficients of Mortise and Tenon Joints used on Wooden Window Profiles.** *Bioresources*. 2016, roč. 11, č. 2, s. 4677-4687. DOI: 10.15376/biores.11.2.4677-4687.

Článek 2: PODLENA, Milan; BÖHM, Martin; MÚČKA, Martin; BOMBA, Jan. **Determination of the Bending Moment of a Dowel and Tenon Joint on Window Profile IV 92 of a Wooden Window.** *Bioresources*. 2017, roč. 12, č. 2, s. 4202-4213. DOI: 10.15376/biores.12.2.4202-4213.

Článek 3: PODLENA, Milan; HÝSEK, Štěpán; PROCHÁZKA, Jiří; BÖHM, Martin; BOMBA, Jan. **Axial Loading of Different Single-pin Dowels and Effect on Withdrawal Strength.** *Bioresources*. 2018, roč. 13, č. 3, s. 5179-5192. DOI: 10.15376/biores.13.3.5179-5192.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Výsledky FE modelování dřevěného okna při horizontálním zatížení (5000 N) s posunutím (a) a průběhem napětí ve vlysech v MPa (b) (Pantaleo et al. 2013)	8
Obr. 2: Metody zkoušení nábytkových rohových spojů v úhlové rovině tahu (a, b, d) a zkušební metody v úhlové rovině tlaku (c, e) (Prekrat a Španić 2009)	9
Obr. 3: Schématické znázornění zkušebního tělesa rohové spoje (a) a testování rohového spoje okenního křídla v úhlové rovině tlaku (b) a tahu (c).....	12
Obr. 4: Zkušební těleso pro testování smykové pevnosti lepeného spoje s kolíkem.....	15
Obr. 5: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 % - smyková pevnost použitých lepidel.....	18
Obr. 6: Typické porušení rohových spojů po zkoušce v úhlové rovině tlaku (foto autor): a. dvojitý čep a rozpor (IV 78); b. trojitý čep a rozpor (IV 92); c. kolíky (IV 92).....	19
Obr. 7: Závislost ohybového momentu na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tlaku	20
Obr. 8: Závislost ohybového momentu na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tahu.....	20
Obr. 9: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Vliv typu namáhání na maximální ohybový moment testovaných rohových spojů okenních křídel.....	21
Obr. 10: Závislost tuhosti na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tlaku.....	22
Obr. 11: Závislost tuhosti na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tahu	23
Obr. 12: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Průměrná šířka letokruhů měřená na testovaných okenních profilech	24
Obr. 13: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Vliv struktury povrchu kolíku na pevnost při vytahování (Podlena et al. 2018)	26
Obr. 14: Stav kolíků lepených PVAc lepidlem (GXL 4) po ukončení zkoušky (Podlena et al. 2018).....	27
Obr. 15: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Vliv dřeviny a struktury povrchu kolíku na pevnost při vytahování.....	28
Obr. 16: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Porovnání průměrů použitých kolíků před slepením.....	31

Obr. 17: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Pevnost kolíků v závislosti na typu lepidla.....	32
Obr. 18: Stav a porušení předlepených kolíků po ukončení zkoušky s podélným řezem otvoru (Podlena et al. 2018).....	33

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Základní charakteristika a varianty testovaných zkušebních vzorků	11
Tab. 2: Varianty testovaných kolíků dostupných na trhu (Podlena et al. 2018).....	14
Tab. 3: Varianty testovaných bukových a dubových kolíků určené ke klimatizování ..	16
Tab. 4: Souhrnné výsledky smykové pevnosti použitých adheziv za normálních podmínek	18
Tab. 5: Souhrnné výsledky testování rohových spojů při zatěžování v úhlové rovině tlaku i tahu (Podlena et al. 2017; Podlena a Borůvka 2016).....	19
Tab. 6: Průměrná šířka letokruhů měřená na testovaných okenních profilech.....	24
Tab. 7: Výsledky testování lepených spojů s kolíky rozdělené podle struktury povrchu kolíku a použitého lepidla.....	25
Tab. 8: Výsledky testování lepených spojů s kolíky rozdělené podle dřeviny a struktury povrchu kolíku.....	28
Tab. 9: Průměry všech použitých kolíků naměřené před slepením	29

1. ÚVOD

Stavební otvorové výplně (tj. okna a dveře) jsou bezesporu důležitou součástí fasády budov, protože se svým vzhledem celkově podílí na estetickém vzhledu a svými funkcemi tvoří optimální prostředí uvnitř budovy.

Dřevěný rám, nebo stejně tak i uzavřenou konstrukci oken, není zatím možné efektivně vyrobit pouze z jednoho vlysu. Ke konstrukci se zpravidla používá spojení minimálně tří vlysů, které jsou na místech styku vždy spojeny některým z truhlářských spojů. V praxi existuje několik typů rohových spojení s rozdílnou pevností (bez ohledu na přesnost výroby).

V místě styku vlysů se průřez vždy oslabí, protože se zde přeruší průběh vláken. Tato spojení jsou proto velmi kritickými místy a je možné podpořit aplikací vhodných lepidel s dodržením správného procesu lepení. Nicméně výběr rohového spoje bude mít vždy zásadní vliv na pevnost spoje a tím pádem i tuhost celé konstrukce. Konstrukce oken navíc musí splňovat parametry vycházející z evropských norem (EN) a německých norem (DIN), avšak zkoušení rohových spojů dřevěných oken se žádná z norem nevěnuje.

Základní hypotézou je, že kolíkové spoje poskytují nižší pevnost, tzn. nižší ohybový moment či tuhost spoje ve srovnání s tradičními spoji jako např. čep a rozpor. Kolíkový spoj je ale v současnosti používán, a tak je pochopitelné, že existují důvody, proč jej výrobci oken používají. Musí přinášet výrobcům výhody a i proto mohl začít konkurovat osvědčenému čepu a rozporu.

Například v pravouhlém rámu jsou dva vlysy rámu vždy kratší o dvě šířky lepeného hranolu, protože nepotřebují materiál na vytvoření spoje, jako je tomu u čepu a rozporu. Vrtání kolíků je méně energeticky náročné oproti frézování a vzniká také méně odpadu. Sestavování rámu je přesnější díky vedení kolíků do lepeného spoje. Všechny potřebné profily (polodrážky, drážky, zakulacení, sražení hran, ...) a otvory (pro kolíky, kliky, ...) vytvoří jeden univerzální dřevoobráběcí stroj na jednom dílci na jedno upnutí. Celkově je takto zjednodušen a urychlen celý výrobní proces. Zvyšuje se produktivita výroby a snižují se náklady na výrobu.

1.1. OKNA

Jednotlivé typy oken se od sebe vzájemně liší rozměry, tvarem, povrchovou úpravou, použitým materiálem, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, kováním, typem zasklení a specifickými doplňky, což nám dává celkově širokou škálu výrobků.

Protože je rozhodnutí o koupi nových oken důležitou otázkou na desítky let, je potřebné při jejich výběru zvolit správný a kvalitní materiál, ze kterého je okno vyrobeno, aby mohlo dobře a dlouhodobě plnit svou funkci. V současnosti je na českém i zahraničním trhu možnost výběru z několika variant materiálů. Zákazníci si tak mohou vybrat mezi dřevem, plastem, hliníkem či kombinací těchto materiálů. Zásadní rozdíly mezi jednotlivými materiály jsou v technických vlastnostech a náročnosti na údržbu. Podle těchto kritérií se zákazníci nakonec rozhodují.

1.1.1. DŘEVĚNÁ VS. PLASTOVÁ OKNA

Zákazníci, kteří volí okna ze dřeva, se soustředí zejména na výhody dřevěných oken. Větší skupinu však tvoří lidé, kteří přihlíží k jejich nevýhodám. Oproti tomu plastová okna jsou v současnosti dlouhodobě nejžádanějšími okny na českém trhu. Kombinace nabízených tepelně-technických vlastností a nižší pořizovací ceny, která je spojená s menší pracností na výrobu, jsou momentálními příčinami vyššího odbytu plastových oken.

V neprospěch dřevěných oken hovoří zejména vyšší cena, jež je spojena s pracností výroby. Při výrobě je potřeba slepovat konstrukční spoje a provádět povrchovou úpravu v několika vrstvách, což jsou technologicky a časově náročné operace. Kromě dřeva je pro výrobu potřeba také silikon, lepidla a nátěrové hmoty, jež jsou zátěží pro životní prostředí. Dřevěná okna tak nejsou zcela přírodním výrobkem, jak někdy bývá prezentováno. Problémy s recyklací však nalezneme i u plastových oken. Neodbornou manipulací a nedostatečným větráním může vlivem vysoké vlhkosti dojít ke znehodnocení dřevěných oken, či poškození povrchové úpravy. Dřevo je hygroskopický materiál, který reaguje na změny vlhkosti vzduchu. Problematická je tak zejména vyšší relativní vlhkost vzduchu v novostavbách.

Obecně jsou výrobky ze dřeva pro většinu lidí pocitově příjemnější. Dřevěná okna jsou tradičně osvědčeným výrobkem a doposud žádná imitace nikdy dřevo plně nenahradila. Pevný a houževnatý materiál, kterým je dřevo, poskytuje rámu oken tuhou konstrukci. Velkou výhodou jsou stále mechanicko-fyzikální vlastnosti a vyšší požární odolnost. Dřevěná okna mohou také dosáhnout delší životnosti než plastová okna, pokud je povrchová úprava pravidelně obnovována. Nátěrové hmoty v sobě navíc obsahují insekticidní i pesticidní složky (proti biotickým činitelům) a pigmenty, které brání stárnutí dřeva. Variabilita profilů oken je snadno ovlivnitelná přístrojovým

a nástrojovým vybavením výrobců. Není proto problém plnit požadavky architektů na okna různých tvarů. Výrobci jsou také schopni rychle reagovat na nové normované požadavky s ohledem na únosnost rohových spojů rámu.

Plastová okna jsou pak vyráběna technologií extruze z granulátu polyvinylchloridu (PVC), který se pod tlakem vhnání do forem. Vzniká tak vícekomorový okenní profil s různými tvary a velikostmi profilů. Při srovnání procesu výroby dojdeme k závěru, že proces zasklívání je jednodušší, a tak je výrobek během pár hodin připraven na export. Nicméně PVC je materiál termoplastický, což je sice využíváno při svařování v rozích, ale znamená to, že působením slunečního záření je plastová okna potřeba častěji seřizovat (pomocí rektifikačního kování). Trvalé deformace tak můžou nastat obzvláště u oken větších dimenzí. Před svařením se proto často do největší komory profilu vkládá zpravidla ocelová výztuha (tvaru „C“, „U“, nebo „O“). Výztuha zpevňuje celou konstrukci po délce a skrz ni se zároveň také dotahují vruty ke kování. Z technologických důvodů je ovšem výztuha v rozích často přerušena, a tak pouze svár zajišťuje tuhost celé konstrukce rámu. V porovnání s ostatními typy oken je tak statická únosnost plastových oken nižší, a proto se plastová okna nevyrábí ve srovnatelných rozměrech s ostatními typy oken (Petrtýl a Šubrt 2012)

1.1.2. VÝVOJ OKEN

Historicky se na nejmenších profilech z masivu s jednoduchým zasklením používalo v rohovém spoji zprvu jen přeplátování, jež bylo klížené přírodními lepidly. Postupně se přeplátování vyvinulo do podoby jednoduchého čepu a rozporu. Oba rohové spoje byly v rozích fixovány z pohledové strany dřevěnými hřeby, aby se dosáhlo vyšší tuhosti spoje. Později sice byly dřevěné hřeby nahrazeny okenními hřeby z hliníku, ale s rozvojem syntetických lepidel již tyto způsoby zajišťování nebyly potřebné.

Lepších tepelně-izolačních i zvukově-izolačních vlastností bylo dosaženo použitím dvou jednoduchých oken oddělených špaletou v ostění. Dalším vývojovým stupněm pak byla okna zdvojená, kdy se dvě jednoduchá křídla spojila šroubem a osadila se do jednoho rámu. Do té doby se profily oken vyráběly z masivu. Se zvětšujícími se profily oken a rostoucími požadavky byl pak jednoduchý čep nahrazen dvojitým a následně i trojitým čepem, který byl vyfrézován na lepeném hranolu (Hochberg et al. 2010).

Použitím lepeného hranolu s několika vrstvami lamel se zajistila vyšší tvarová a rozměrová stálost okenních profilů. Nesprávně začala být tato jednoduchá dřevěná okna s izolačním sklem nazývána jako „eurookna“ z lepených vícevrstvých hranolů (také označovaných jako „eurohranol“).

Podle německé normy DIN 68 121-1 (1993) začaly být profily označovány písmeny „IV“ s číslem odpovídajícím velikosti profilu okna (nebo i dveří) ve směru teplotního gradientu v milimetrech. Velikost okenních profilů se tak postupně rozšířila z 68 mm, přes 72 mm, 78 mm, 88 mm na velikost 92 mm a více (např. 112 mm). Větší profily je totiž možné osadit trojskly. Kromě běžně používaných hranolů lepených ze smrkového (*Picea*) dřeva, se také mimo jiné používají i hranoly z lamel dubu (*Quercus*), modřínu (*Larix*), nebo borovice (*Pinus*). Z exotických dřevin je to pak obzvláště meranti (*Shorea*) a eukalyptus (*Plantae*).

S ohledem na poměrně rychlou genezi oken je potřeba se zabývat tuhostí rámu oken a dveří. Nové materiály, nové konstrukce a přizpůsobování se současným normám změnilo požadavky na zatížení, kladené na rohová spojení oken. Například se zvětšují profily oken a zároveň se zvětšují i prosklené plochy budov. Tuhost konstrukce se již ovlivňuje na začátku výrobního procesu, a to samotným výběrem rohového spojení, přičemž výběr má být vždy prováděn s ohledem na dimenze okenního křídla a velikost profilu společně s výplní. Svou vahou výplň staticky namáhá rám, resp. rohové spoje okenního křídla. Následkem nedostatečně vybraného nebo provedeného spoje v kombinaci s těžkou výplní a postupem času vzniká nevratné svěšení okenního křídla směrem dolů. Výjimkou jsou fixní křídla, která jsou nepohyblivá a pevně připevněna do ostění. Případ se týká hlavně otvíracích křídel, kdy deformací rámu dojde k omezení plnění jedné ze základních funkcí okna (např. otevírání/zavírání). Sami výrobci ale nedisponují kapacitně (ale i časově) laboratořemi k testování vlastností.

Momentálně jsou na trhu okna s několika typy rohových spojů (zejména dvojité nebo trojitý čep a rozpor, kolíky, případně Hoffmannovy spojky). V současnosti jsou profily IV 78 a IV 92 momentálně nejpoužívanějšími, přičemž na 92mm profilu se nejčastěji uplatňuje právě trojitý čep. Zahraniční výrobci v poslední době začali nahrazovat čepy s rozpory za kolíková spojení jak u okenních rámu, tak i okenních křídel. Někteří čeští výrobci dřevěných oken a dveří (např. Slavona, s.r.o.) trendy zahraničních výrobců následovali a rozšířili své portfolio také o kolíky.

2. ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1. NORMOVÉ POŽADAVKY NA OKNA

Protože je konstrukce vyrobena z lepeného lamelového dřeva, musí být hranoly v souladu s normou ČSN EN 14080 (2013). Všechna základní ustanovení oken (a balkónových dveří) jsou dále stanovena v ČSN 74 6101 (2015) společně s jejich názvoslovím, označováním, tříděním, tvary, rozměry, používanými součástmi, povrchovou úpravou, vzhledem, provedením a nakládáním s výrobky.

Dle nařízení vlády č. 190/2002 Sb. musí také výrobce okna potvrdit technické parametry prohlášením o shodě výrobku s označením CE. Označení CE potvrzuje, že výrobek splňuje požadavky stanovené v harmonizovaných právních předpisech Evropské unie. Zároveň s prohlášením musí výrobce doložit odkazy na zkoušky a výpočty provedené akreditovanou laboratoří (Petřtyl a Šubrt 2012).

Technické požadavky s ohledem na ověřování stálosti vlastností otvorových výplní a zkoušení jsou stanovené v ČSN EN 14351-1+A2 (2018), které musí všechna okna dodaná na český trh bezpodmínečně splňovat (ČSN 73 0540-2, 2011). Zkušebními postupy se pak testují následující vlastnosti oken: součinitel prostupu tepla (ČSN EN ISO 10077-1, 2018; ČSN EN ISO 10077-2, 2018; ČSN EN ISO 12567-1, 2011), vzduchová neprůzvučnost (ČSN EN ISO 717-1, 2013), odolnost proti zatížení větrem (ČSN EN 12211, 2017), průvzdušnost (ČSN EN 1026, 2017), vodotěsnost (ČSN EN 1027, 2017) a únosnost bezpečnostních zařízení (ČSN EN 14351-1+A2, 2018; ČSN EN 14609, 2004).

Kromě výběru vhodného materiálu na konstrukci okna je důležité také správně osadit okno přípojovací spáru (ČSN 74 6077, 2018). Protože jsou okenní rámy připevněny v ostění, nejsou tolik staticky namáhány jako okenní křídla, která se volně pohybují vůči rámu díky závěsům. Z tohoto pohledu je důležité řešit především pevnost rohových spojů u okenních křídel. Spoje jsou pak namáhány pevnostně vahou, zejména svou výplní či vahou svých prvků, ale také klimatickými činiteli (vítr, vlhkost, voda, teplota atd.). Proto řádně dimenzovaný a provedený tuhý spoj musí poskytnout správnou funkci (např. okennímu křídlu), aby nedocházelo ke svěšování křídla a omezení jeho základních funkcí (např. otevírání a zavírání za účelem přirozeného větrání), nebo stavebně-fyzikálních funkcí (tj. izolace).

Na samotné zkoušení pevnosti rohových spojů dřevěných oken nicméně neexistuje žádná norma, která by popisovala metodický postup s výpočtem pevnosti rohových spojů dřevěných oken, či jen stanovovala minimální požadavky na pevnost rohových spojů. O nejednotnosti postupu zkoušení rohových spojů se zmiňuje i Pantaleo et al. (2014). Existuje zatím pouze evropská norma ČSN EN 514 (2001), která se zabývá testováním rohových spojů u plastových oken vyrobených z neměkčeného polyvinylchloridu (PVC-U). Norma stanovuje požadavky na zkušební vzorky, zkušební metody při tahovém nebo tlakovém zatížení za ohybu a jednoduchý postup výpočtu pevnosti spoje.

2.2. ROHOVÉ SPOJE

V praxi existuje několik typů truhlářských rohových spojů, včetně jejich odvozených variant (zejména pro čep a rozpor, čep dlab, přeplátování, rybinové ozuby apod.), nebo dalších spojovacích prostředků (např. kolíky, vruty, šrouby, šrouby s válcovou maticí, konfirmáty, Hofmannovy spojky, pera, lamely atd.) a jejich kombinace. Použití v konstrukci je vždy závislé na konstrukci rámu (rámové či krabicové) a požadavku na rozebíratelnost spoje (rozebíratelné či nerozebíratelné). Disertační práce se zabývá pouze nejčastějšími spoji na nerozebíratelných rámových konstrukcích dřevěných oken, jimiž jsou bezpochyby zejména čep a rozpor s kolíky.

Díky dlouholeté genezi, kterou si čep a rozpor prošel, se stal osvědčeným truhlářským spojem a tím pádem i jedním z nejvíce používaných rohových spojů v rámových konstrukcích obecně. Výroba spoje probíhá úpravou vlysů odstraněním vnější třetiny (tj. rozpor) u klasického jednoduchého čepu a odstraněním obou krajních třetin na protilehlém vlysu (tj. čep). Oba díly se zpravidla slepují lepidlem a vytváří tak nerozebíratelné spojení.

Kvůli častému použití byl tak i čep a rozpor subjektem několika různých výzkumů. Mnoho článků se zabývá hodnocením mechanických vlastností čepu a rozporu zejména pro nábytkové aplikace na rámových konstrukcích (zejména židle a stoly). Tímto způsobem se již zkoumala pevnost spoje v závislosti na: rozměrech čepu (Wilczyński a Warmbier 2003; Erdil et al. 2005; Hajdarević a Martinović 2014), tvaru čepu (Tankut a Tankut 2005), typu lepidla a vlhkosti dřeva (Tankut 2007), tloušťce lepené spáry (Ratnasingam a Ioras 2013; Hajdarević a Šorn 2012), druhu použitého dřeva (Kasal et al. 2013; Smardzewski 2008), nebo teploty a relativní vlhkosti vzduchu (Jivkov et al. 2008).

Vidíme tedy, že na výslednou pevnost spoje působí buď vnitřní (druh spoje s jeho geometrií, dřevinu, vlhkost dřeva, lepidlo), anebo vnější faktory (typ zatěžující síly, teplotu, abiotické vlivy, ...).

Kolíky jsou dalším z typů spojení dřevěných konstrukcí. Tentokrát se ale jedná o typ vloženého spojovacího prostředku s rotačním válcovitým tvarem se zkosenými hranami na koncích, které usnadňují vkládání do předvrtaných otvorů. Díky tomuto jednoduchému použití jsou kolíky tolik oblíbené. Využívají se především ke spojení konstrukčních desek (např. korpus nábytku) s lepidlem (jako nerozebíratelná spojení), nebo jen jako vložené, kde slouží jako vodící prvky a pevnost spoje je vytvořena za spoluúčasti dalšího spojovacího prostředku.

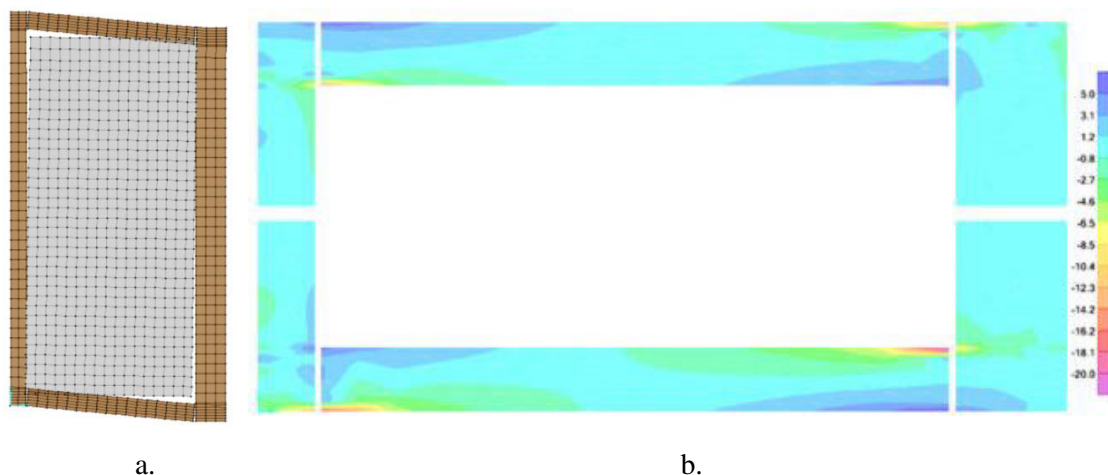
Za účelem zjištění jednotlivých vlivů na pevnost kolíkového spoje byly již realizovány některé výzkumy, které se zaměřily na následující vlivy: materiál (adherend) nebo dřevinu kolíků (Seref et al. 2009; Uysal a Ayhan Özçifçi 2003; Yapici et al. 2011; Eckelman et al. 2002; Tankut 2005; Özcan et al. 2013), použité lepidlo (Seref et al. 2009; Uysal a Ayhan Özçifçi 2003; Yapici et al. 2011; Taş et al. 2014), průměr kolíků (Seref et al. 2009; Yapici et al. 2011; Eckelman et al. 2002; Özcan et al. 2013; Warmbier a Wilczyński 2000), délku kolíků nebo hloubku penetrace (Warmbier a Wilczyński 2000; Eckelman a Cassens 1985; Zhang a Eckelman 1993; Dalvand et al. 2014), rozteč kolíků (Eckelman 1971; Tankut 2005; Derikvand a Ebrahimi 2015; Warmbier a Wilczyński 2000; Šimek et al. 2010), počet kolíků ve spoji (Tankut 2005; Derikvand a Ebrahimi 2015), strukturu kolíků (Eckelman a Cassens 1985; Ahmad et al. 1993), tloušťku lepené spáry (Ratnasingam a Ioras 2015), nebo závislost pevnosti na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu (Jivkov et al. 2008).

2.2.1. TESTOVÁNÍ ROHOVÝCH SPOJŮ

Mechanika konstrukcí bývá v současnosti řešena nejčastěji dvěma způsoby - pomocí matematického modelování, tzv. metody konečných prvků (FEM), nebo experimentálním testováním (destruktivní nebo nedestruktivní metody).

S rozvojem výpočetní techniky začaly být experimentální zkoušky z části nahrazovány simulacemi, které jsou ve srovnání se zkouškami rychlejší, méně nákladnější a s jejich využitím lze okamžitě v softwaru optimalizovat konstrukci (např. minimalizovat příčné průřezu vlysů a snížit tím náklady na výrobu). Pomocí metody konečných prvků tak lze vypočítat deformace a průběh napětí v jednotlivých

prvcích i jednotlivých bodech (Obr. 1). Jelikož se v případě dřeva jedná o heterogenní materiál, je modelování dřevěných konstrukcí ve srovnání např. s ocelí náročnější. Závěry výzkumů již potvrdily, že výsledky z FEM modelování velmi dobře korelují s experimentálními zkouškami (Tankut et al. 2014; Pantaleo et al. 2013; Oudjene a Khelifa 2010).



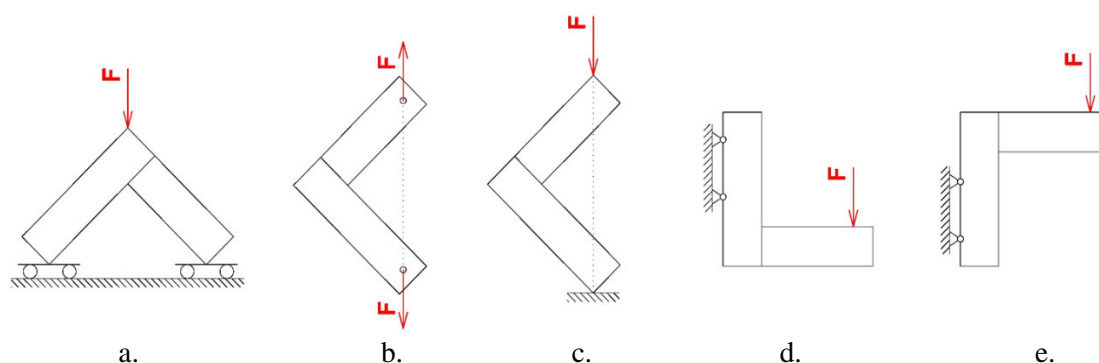
Obr. 1: Výsledky FE modelování dřevěného okna při horizontálním zatížení (5000 N) s posunutím (a) a průběhem napětí ve vlysech v MPa (b) (Pantaleo et al. 2013)

Při empirickém testování spojů lze obecně posuzovat pevnost konstrukce dvěma principy. Složitějším způsobem je simulovat skutečné zatížení v celé konstrukci v reálném prostředí za současného sledování nejvíce kritických míst konstrukci společně s průběhem deformací. Tento princip se velmi často využívá při navrhování a testování nábytku (např. knihovny, židle apod.) nebo jiných dřevěných konstrukcí jako jsou např. okna (Eckelman a Haviarova 2006; Pantaleo et al. 2013; Taş et al. 2014).

Část konstrukce lze také vyjmout a provést analýzu spoje testováním konkrétního rohového spoje samostatně (Obr. 2). Podobné zkoušky se používají při navrhování a zjišťování pevnosti jednotlivých nábytkových spojů (Joščák 1999; Joščák a Kollár 2007; Derikvand a Ebrahimi 2015). Zjišťují se zpravidla faktory, které mají vliv na pevnost spojů. Zkoušení tímto postupem je rychlejší, výroba vzorků je snadnější a stejně tak i vyhodnocování pevnosti.

Zkušební metody testování rohových spojů na nábytku (Obr. 2), které uvedl Prekrat a Španić (2009), jsou velmi podobné metodám pro testování rohových spojů okenních křídel. Princip je stejný, jen s tím rozdílem, že okenní hranoly jsou více profilované. V obou případech experimentálních pevnostních zkoušek rohových spojů se měří maximální síla v úhlové rovině tahu, nebo tahu až do meze pevnosti, ohybový moment, nebo výsledná tuhost. Ve speciálních případech, kdy je cílem výzkumu znát také

průběh napětí v jednotlivých prvcích, lze experimentální zkoušení nahradit metodou konečných prvků, která za pomoci softwaru dokáže vypočítat sledované charakteristiky a zobrazit průběh napětí v prvcích.



Obr. 2: Metody zkoušení nábytkových rohových spojů v úhlové rovině tahu (a, b, d) a zkušební metody v úhlové rovině tlaku (c, e) (Prekrat a Španiř 2009)

Protože zkušební metoda na testování rohových spojů oken není normalizovaná a je nejednotná, každý autor testoval rohové spoje s rozdílnou délkou ramen různým způsobem (Příloha 1). Altinok et al. (2010) testoval nejmenší profil (60 mm) tlakovou zkouškou s jednoduchým a dvojitým čepem na dvou různých dřevinách, které byly slepeny dvěma polyvinylacetátovými (PVAc) lepidly. Ve zbylých výzkumech se zpravidla porovnává čep s dalšími spoji. V Govze (2006) navrhli spojovací prostředek ve formě dřevěného vloženého kroužku, s kterým následně Hrovatin et al. (2013) porovnával pevnost dvojitého čepu a rozporu. U dřevěného kroužku se zkoumalo, jaké lepidlo je nejvhodnější pro tento spoj z hlediska maximální pevnosti. Pevnostní zkoušky zde probíhaly jen v tahovém namáhání rohového spoje a výsledným ukazatelem byla vyvozená maximální síla. Mimo jiné Pantaleo et al. (2014) zkoušeli rohové spoje oken v tlakové zkušence také za sledování síly, ale i ohybového momentu. Tyto případy však neuvádějí velikosti ramen vzorků, na kterém síla působí, což znamená, že nelze dopočítat maximální ohybový moment, ani výslednou tuhost pro následné porovnání mezi sebou. Zejména Joščák a Kollár (2007) se věnovali ohybovým momentům, ale i úhlu pootočení ramen a tuhosti rohového spoje s čepem rozporu v tlakovém i tahovém zatížení na rohových spojích okenních křídel. Získané výsledky pak porovnávali s výsledky rohových spojů spojené Hoffmannovými rybinami na stejných profilech, testované stejnou metodou. U všech zmíněných výzkumů byl použit okenní profil IV 68 ve standardu výrobců. Jak již bylo řečeno, profily IV 68 byly ve stavebnictví nahrazeny většími profily (zejména IV 78 a IV 92). Žádný výzkum se tak testováním současných profilů okenních křídel nezabýval.

3. CÍLE A PŘÍNOS PRÁCE

Hlavním cílem práce je staticky posoudit, zda se pevnost (resp. ohybový moment) kolíkových spojů v rohových spojích okenních křídel (v provedení dle výrobce oken) může vyrovnat pevnosti čepových spojů. Nulovou hypotézou výzkumu je, že čep s rozporem oproti kolíkovému spoji na stejném profilu dosahuje větší tuhosti. Toto tvrzení se zakládá na faktu, že čep s rozporem má obecně větší lepenou kontaktní plochu, jež je jedním z faktorů pevnosti lepeného spoje.

Cílem výzkumu je proto destruktivním zkoušením porovnat pevnost těchto rohových spojení na nejčastějších okenních profilech (IV 78 a IV 92) a rozdíly mezi nimi statisticky vyhodnotit. Za tímto účelem je třeba stanovit jednotnou metodiku s postupem zkoušky a výpočtem ohybového momentu a také navrhnout fixační přípravek pro upnutí rohových spojů v universálním testovacím stroji.

Pro podrobnější analýzu naměřených výsledků a návrhů závěrečných doporučení jsou proto ve výzkumu řešeny následující dílčí cíle:

- vyhodnocení rozdílů v typech namáhání rohových spojů (tj. v úhlové rovině tlaku a tahu)
- zjištění vlivu velikosti lepené plochy testovaných rohových spojů pro případné porovnání rozdílů mezi nimi,
- určení pevnosti slepu použitých lepidel, čímž se zhodnotí faktor adheziva při vzájemném porovnání mezi rohovými spoji,
- testování pevnosti různých variant kolíků, jež jsou nejčastěji dostupné na českém i zahraničním trhu, v tahové zkoušce z adherendu (za současného smyku), aby se zjistil vliv zejména mezi rozdílnými strukturami povrchu kolíků a také vliv dřeviny kolíku na pevnost lepeného spoje.

Vedlejším cílem je tak doplnit a rozšířit databázi pevnosti rohových spojení o aktuálně používané profily okenních křídel a typy rohových spojení, které jsou testovány jednotnou metodikou pro vzájemné porovnání. Disertační práce tak bude v budoucnosti sloužit jako metodická pomůcka při testování dalších pravoúhlých rohových spojů obecně.

4. METODIKA

Disertační práce je rozdělena na tři metodické části. První fází bylo testování smykové pevnosti použitých lepidel. Hlavním cílem práce bylo testování pevnosti rohových spojů mezi kolíky a čepem s rozporem na nejčastějších profilech okenních křídel dřevěných oken. Poslední fází pak byl širší rozbor pevnosti různých kolíků při vytahování ze dřeva a zhodnocení vlivů, jak je pevnost lepeného spoje ovlivňována se současným zohledněním lepidel z první části disertační práce.

4.1. TESTOVÁNÍ PEVNOSTI ROHOVÝCH SPOJŮ

Pevnost rohových spojů okenních křídel byla zjišťována pomocí metodiky navržené v Podlena et al. (2015). V první fázi bylo nutné navrhnout fixační přípravek pro univerzální testovací stroj TIRA 50 (TIRA system GmbH, Německo). Tento přípravek slouží k upnutí zkušebních vzorků v trhacím stroji, které byly podle návrhu vyrobeny (Příloha 2).

Zkušební vzorky byly testovány v úhlové rovině tlaku a tahu. Jednalo se o pravoúhlé rohové spoje okenních křídel s délkou ramena 350 mm. Profily byly vyrobené z lepených smrkových lamel ($\rho_{12\%} = 460 \text{ kg/m}^3$, DIN 68364, 2003) ve variantách uvedených v Tab. 1.

Tab. 1: Základní charakteristika a varianty testovaných zkušebních vzorků

Profil	IV78	IV92	
Typ spoje	Dvojitý čep a rozpor	Trojité čep a rozpor	Kolíky*
Hranol	3-vrstvý, smrk	4-vrstvý, smrk	
Lepidlo (Výrobce)	GXL 4 (Rakoll)	D4-Leim 1K (GreenteQ)	1K Holzkaltleim D4 (WÜRTH)
Výrobce	Jánošík OKNA-DVEŘE s.r.o., Val. Příkazy, Česká republika	Davelo s.r.o., Hvozdnice, Česká republika	Slavona, s.r.o., Slavonice, Česká republika

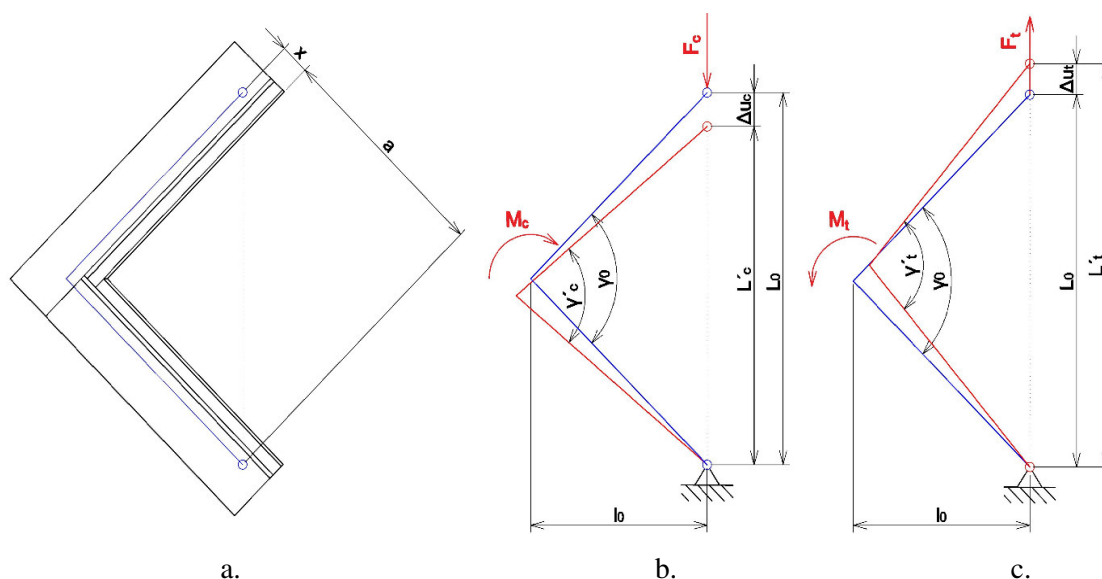
* 5 dubových kolíků, spirálovitě rýhovaných

Proměnnými faktory byly: zkušební metody (tlak a tah), typy rohových spojů (trojitý čep a rozpor, dvojitý čep a rozpor, kolíky) zkoušených na profilech IV 78 a IV 92. Základní rozměry profilů jsou uvedeny v Příloze 3. Rohové spoje byly vyrobeny ve standardech výrobců bez zasklení, zasklívacích lišt, kování i těsnících profilů

(Příloha 4). Povrch byl pouze ofrézovaný a bez povrchové úpravy. Pro následné porovnání pevnosti rohových spojů byly brány v úvážení zejména faktory vlivu pevnosti použitých lepidel a velikosti lepené plochy rohových spojů. Zároveň pomocí software NIS Elements AR (Laboratory Imaging, Česká republika) byla měřena průměrná šířka letokruhů (Podlena a Borůvka 2016).

Před testováním byly na stojanové vrtačce (TOS Svitavy, Česká republika) do vzorků vyvrtány průchozí otvory o průměru 11 mm ($\pm 0,5$ mm) pro čepy z upínacího přípravku (Příloha 5). Otvory byly umístěny vždy se stejnou vzdáleností (s přesností ± 1 mm) od rohu spoje tak, aby otvor byl min. 30 mm od vnější hrany (Obr. 3). Následně byly rohové spoje klimatizovány v klimatizační komoře (Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo) při teplotě 20 °C (± 2 °C) a relativní vlhkosti vzduchu 65 % (± 5 %) do ustálení hmotnosti (Příloha 6).

K testování rohových spojů (Příloha 7) byla nastavena rychlost přičníku na 5 mm/min., aby k porušení vzorku došlo do 2 min. od spuštění zkoušky. Po ukončení zkoušky byla softwarem vyhodnocena maximální působící síla (F_{max}) a prodloužení spoje v tlaku (Δu_c , resp. Δu_t). Protože byly spoje pravoúhlé ($\gamma_0 = 90^\circ$), k výpočtu momentu sil (M_c , resp. M_t) a následně tuhosti (c_c , resp. c_t) byly použity následující vztahy (Rov. 1 - 12):



Obr. 3: Schématické znázornění zkušebního tělesa rohové spoje (a) a testování rohového spoje okenního křídla v úhlové rovině tlaku (b) a tahu (c)

a. Původní vzdálenost mezi středy čepů upínacího přípravku na začátku zkoušky (L_0):

$$\sin \frac{\gamma_0}{2} = \frac{\frac{L_0}{2}}{a+x} \rightarrow L_0 = 2(a+x) \sin \frac{\gamma_0}{2} \quad (mm) \quad [1]$$

b. Vzdálenost mezi středy čepů upínacího přípravku v momentě porušení při tlakové (L'_c) nebo tahové zkoušce (L'_t):

$$L'_c = L_0 - \Delta u_c \quad (mm) \quad [2]$$

$$L'_t = L_0 + \Delta u_t \quad (mm) \quad [3]$$

c. Změna vnitřního úhlu rohového spoje v momentě porušení při tlakové (γ'_c) nebo tahové zkoušce (γ'_t):

$$\sin \frac{\gamma'_c}{2} = \frac{\frac{L'_c}{2}}{a+x} \rightarrow \gamma'_c = 2 \arcsin \left(\frac{L'_c}{2(a+x)} \right) \quad (^\circ) \quad [4]$$

$$\sin \frac{\gamma'_t}{2} = \frac{\frac{L'_t}{2}}{a+x} \rightarrow \gamma'_t = 2 \arcsin \left(\frac{L'_t}{2(a+x)} \right) \quad (^\circ) \quad [5]$$

d. Úhlová deformace rohového spoje v momentě porušení při tlakové ($\Delta\gamma'_c$) nebo tahové zkoušce ($\Delta\gamma'_t$):

$$\Delta\gamma_c = \gamma_0 - \gamma'_c \quad (^\circ) \quad [6]$$

$$\Delta\gamma_t = \gamma'_t - \gamma_0 \quad (^\circ) \quad [7]$$

e. Rameno síly ohybového momentu (l_0):

$$\cos \frac{\gamma_0}{2} = \frac{l_0}{a+x} \rightarrow l_0 = (a+x) \cos \frac{\gamma_0}{2} \quad (mm) \quad [8]$$

f. Ohybový moment v momentě porušení při tlakové (M_c) nebo tahové zkoušce (M_t) (Warmbier & Warmbier a Wilczyński 2000; Eckelman 1971):

$$M_c = F_{c,max} \times l_0 \quad (N \times m) \quad [9]$$

$$M_t = F_{t,max} \times l_0 \quad (N \times m) \quad [10]$$

g. Tuhost spoje v momentě porušení při tlakové (c_c) nebo tahové zkoušce (c_t) (Erdil et al. 2005; Derikvand & Ebrahimi, 2015; Joščák & Kollár, 2007; Joščák, 1999):

$$c_c = \frac{M_c}{\Delta\gamma_c} \quad \left(\frac{N \times m}{rad} \right) \quad [11]$$

$$c_t = \frac{M_t}{\Delta\gamma_t} \quad \left(\frac{N \times m}{rad} \right) \quad [12]$$

4.2. TESTOVÁNÍ PEVNOSTI SLEPU POUŽITÝCH LEPIDEL

Pro vzájemné porovnání a zhodnocení vlivu lepidla na pevnost spojů byla v první fázi ověřována pevnost slepu použitých lepidel (ČSN EN 204, 2017). Pevnost slepu byla ověřována na bukových zkušebních tělesech (150 mm × 20 mm × 10 mm) pomocí






normované zkoušky z ČSN EN 205 (2017) s pořadovým číslem jedna, tj. testování zkušebních těles po expozici 7 dnů v prostředí s normálními podmínkami (teplota: 20 °C ±2 °C; relativní vlhkost vzduchu: 65 % ±5 %). Za těchto podmínek totiž probíhaly i zkoušky testování pevností rohových spojů a testování kolíkových spojů. Zkušební tělesa byla testována v tahových čelistech universálního zkušebního stroje TIRA 2850 (TIRA system GmbH, Německo).

4.3. TESTOVÁNÍ PEVNOSTI SPOJŮ S VLEPENÝM KOLÍKEM

Podle předchozích výzkumů dochází při zatěžování rohových spojů s kolíky na jedné straně vždy k tahovému namáhání kolíků (Eckelman 1979, 1971), a proto byl výzkum dále zaměřen na pevnost různých kolíků v tahu za současného smyku (Příloha 8). Nejprve byly porovnávány nejčastější varianty kolíků dostupné na českém i zahraničním trhu.

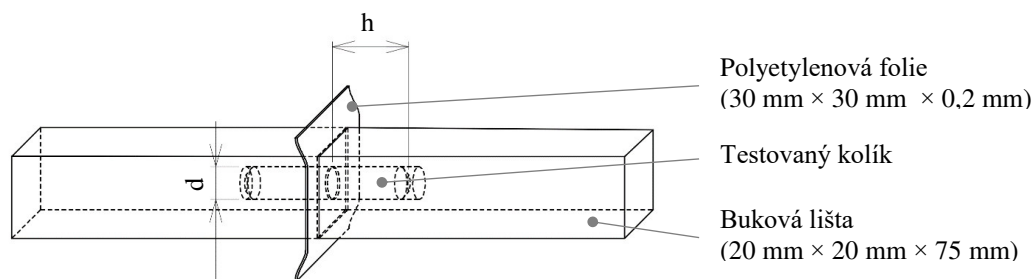
Základními faktory byl vliv předlepení a lepidla, vliv rýhování, drážkování a úhlu drážkování i průměru kolíku (Tab. 2). Dvě varianty předlepených kolíků byly testovány již s aplikovaným PVAc lepidlem, které bylo aktivováno podle návodů výrobců stykem s vodou. Další tři varianty byly standardními kolíky s rozdílnou strukturou. Tato skupina kolíků byla slepena dvěma PVAc lepidly, jež byly použity v předchozím výzkumu (GXL 4 a 1K-Holzkaltleim D4), a navíc také jedním polyuretanovým (PUR) lepidlem (Lear D4).

Tab. 2: Varianty testovaných kolíků dostupných na trhu (Podlena et al. 2018)

Typ kolíku	Struktura povrchu kolíku	Lepidlo	Dřevina	Rozměry	Výrobce
Rýhované	Podélné	 PVAc (předlepené)	Buk	8 mm × 38 mm	HandyCT, Bridgeport, CT, USA
		 PVAc (předlepené)		8 mm × 40 mm	KWB Germany GmbH, Stuhr, Německo
	 Žádné (standard)	Marušík Holz, Ostrava, Česká republika			
	Spirálovité				
Drážkované	Drážkované		Javor	7.94 mm × 50.8 mm*	Rockler Woodworking and Hardware, Medina, MN, USA

* původní rozměry: 5/16" × 2", zkráceno na 40 mm

Testované kolíky měly nominální rozměry 8 mm × 40 mm. Do otvoru ve zkušebních tělesech (Obr. 4) byly kolíky vloženy a slepeny. Na rozhraní těles byla použita polyetylenová folie s otvorem pro kolík, aby vyteklé lepidlo neslepilo čelní plochy těles. Zkušební tělesa byla po aplikaci lepidla stažena po dobu 24 h. a následně umístěna do klimatizační komory (Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo) při teplotě 20 °C (±2 °C) a relativní vlhkosti vzduchu 65 % (±5 %) do ustálení hmotnosti.



Obr. 4: Zkušební těleso pro testování smykové pevnosti lepeného spoje s kolíkem





Zkušební tělesa byla upnuta do čelistí pro smykovou zkoušku v univerzálním trhacím stroji TIRA 2850 (TIRA system GmbH, Německo), aby byla zkoušena tahem (za smyku kolíku). Rychlost příčnicku trhacího stroje byla nastavena na 10 mm/min. Softwarem TIRAtest System 4.6.0.30 (TIRA GmbH, Schalkau, Německo) byla následně vyhodnocena maximální síla (F_{max}) a pevnost spoje byla přepočítána podle vztahu z Rov. 13 (Burhanettin 2005; Özcan et al. 2013; Yapici et al. 2011)

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{\pi d \times h} \quad \left(\frac{N}{mm^2} = MPa \right) \quad [13]$$

Maximální síla (F_{max}) je nepřímo úměrná lepené ploše, ve které došlo k porušení (A). Do velikosti plochy byla brána v úvahu plocha rozvinutého pláště kolíku s průměrem (d) a výškou porušeného kolíku (h). Průměr kolíku byl měřen před slepením posuvným měřítkem (Kinex Measuring, Prague, Česká republika) a výška kolíku po provedení testu.

Výzkum byl navíc dodatečně doplněn o porovnání dubových kolíků s bukovými kolíky (Tab. 3), protože u testovaného rohového spoje s kolíky (IV 92) byly ve standardu výrobce použity netradičně dubové kolíky (8 mm × 50 mm). Metodika testování a vyhodnocení v obou případech probíhala stejným způsobem. Kolíky však byly lepeny pouze PVAc lepidlem GXL 4.

Tab. 3: Varianty testovaných bukových a dubových kolíků určené ke klimatizování

Typ kolíku	Struktura		Dřevina	Rozměry	Výrobce
Hladké	Žádná		Buk	8 mm × 50 mm	Ason-Vala, Most, Česká republika
			Dub		
Rýhované	Spirálovité		Buk		Marušík Holz, Ostrava, Česká republika
			Dub		

U naměřených a vypočítaných hodnot byly vyhodnoceny základní ukazatele popisné statistiky a v softwaru STATISTICA (StatSoft Inc., version 13.3, Tulsa, OK, USA) byla provedena statistická analýza rozptylu (ANOVA). K určení statistické významnosti jednotlivých hodnot byla použita jednovýběrová ANOVA a Post-Hoc test (Tukey HSD), a to vždy na standardní hladině významnosti (α) 0,05.

5. VÝSLEDKY A DISKUZE

Výsledky disertační práce „Porovnání pevnosti kolíkových a čepových spojů u dřevěných oken“ byly založeny na datech, výsledcích a závěrech, které byly publikovány ve třech článcích, jež jsou součástí disertační práce, a jednom připravovaném článku. Celkově tak k provedení detailnější analýzy pevnosti rohových spojů dřevěných oken byly při vyhodnocování dat zohledněny následující faktory:

- vliv použitých lepidel na pevnost lepeného spoje,
- vliv typu spoje a velikosti profilu okenního křídla na pevnost rohového spoje při namáhání v úhlové rovině v tlaku a tahu,
- vliv šířky letokruhů okenních hranolů,
- vliv faktorů na pevnost spoje vlepeného kolíku – struktura povrchu kolíku; dřevina kolíku; průměr kolíku; účinnost předlepení kolíku a vliv použitých lepidel.

5.1. VLIV POUŽITÝCH LEPIDEL NA PEVNOST SPOJE

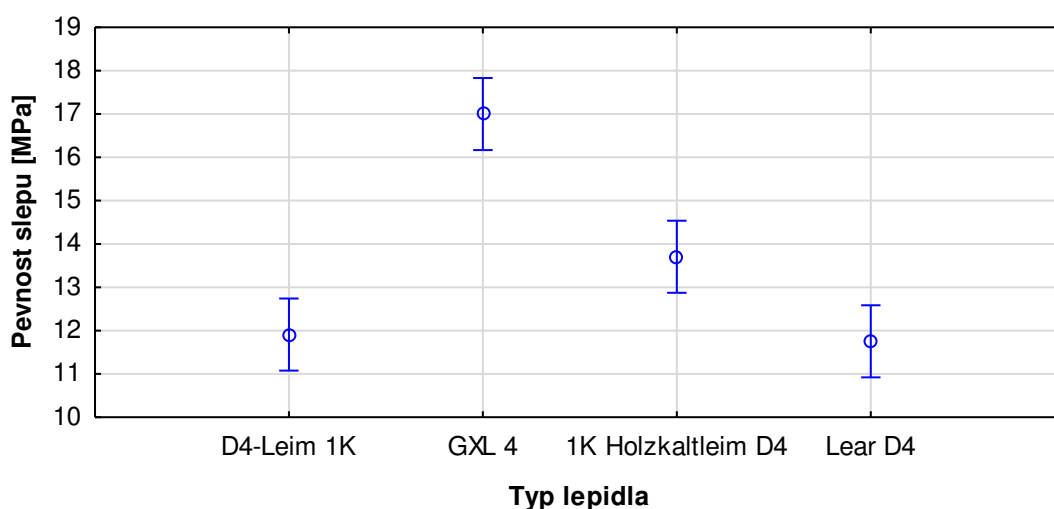
Jedním z hlavních vlivů na pevnost všech testovaných spojů byl typ použitého adheziva. Vzájemná rozdílnost lepidel byla zjišťována pomocí smykové zkoušky slepu v tahu. Výsledky s charakteristickými hodnotami pevností lepidel jsou uvedeny v Tab. 4. Figuruje zde skupina PVAc lepidel, která byla použita u testování rohových spojů okenních křídel (kapitola 4.1). Zatímco polyuretanové lepidlo Lear D4 společně s GXL 4 a 1K-Holzkalteim D4 bylo naopak použito při testování rozdílných kolíků (kapitola 4.3).

Všechna testovaná lepidla tak obstála v normované zkoušce s pořadovým číslem jedna (ČSN EN 204, 2017), při které po 7 dnech v normálních podmínkách (teplota: 20 °C, relativní vlhkost vzduchu: 65 %) byla v průměru naměřena pevnost slepu vyšší než hraniční hodnota 10 MPa.

Nejvyšší smykové pevnosti dosáhlo PVAc lepidlo GXL 4 (17 MPa), jehož hodnota je statisticky odlišná ($p < 0,05$) ve srovnání s ostatními testovanými lepidly. Významně odlišných hodnot ($p < 0,05$) bylo zjištěno také u 1K-Holzkalteim D4 (13,7 MPa). Naproti tomu nejnižších pevností dosáhlo polyuretanové lepidlo Lear D4 (11,8 MPa), jehož pevnost není statisticky významná pouze v porovnání s PVAc lepidlem D4-Leim 1K (11,9 MPa).

Tab. 4: Souhrnné výsledky smykové pevnosti použitých adheziv za normálních podmínek

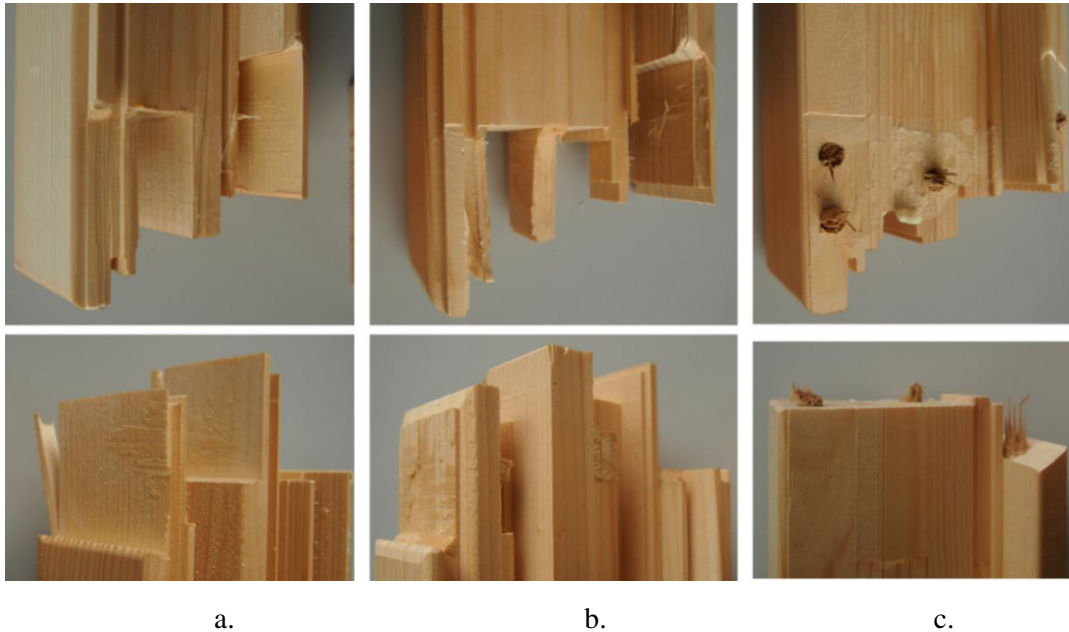
Skupina lepidel	PVAc			PUR
Typ lepidla	D4-Leim 1K	GXL 4	1K-Holzkaltleim D4	Lear D4
Aritmetický průměr (MPa)	11,9	17,0	13,7	11,8
Medián (MPa)	11,6	16,2	13,7	12,0
Směrodatná odchylka (MPa)	1,1	1,8	0,6	1,4
Minimum (MPa)	10,5	15,3	12,7	10,0
Maximum (MPa)	14,3	20,1	14,5	13,6
Variační koeficient (%)	10	11	4	12
Počet zkušebních těles	10			

**Obr. 5:** Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 % - smyková pevnost použitých lepidel

5.2. VLIV TYPU SPOJE A VELIKOSTI PROFILU NA PEVNOST ROHOVÉHO SPOJE

Proměnnými faktory této části výzkumu byly: typ namáhání spoje (tah a tlak), velikost profilu okenního křídla (IV 78 a IV 92) s typem spoje (čep a rozpor, kolíky), které také souvisí s velikostí lepené plochy. Vliv použitých adheziv byl zhodnocen samostatně již v předchozí části (kapitola 5.1).

Typ porušení spojů je vidět z obrázku otestovaných vzorků rohových spojení (Obr. 6). Ve všech případech došlo k většinovému kohezivnímu porušení v adherendu, tzn., že adheze lepidla byla silnější než koheze. Příčiny a velikost chyby jsou závislé na několika faktorech, jako např. orientace napětí na lepenou plochu, ale i teplotě a vlhkosti (Landrock 2008). Velikost kohezivního porušení byla pro jednotlivé rohové spoje seřazena od nejnižšího následovně: dvojitý čep a rozpor (70 – 80 %), trojitý čep a rozpor (80 – 90 %), kolíky (95 %).



Obr. 6: Typické porušení rohových spojů po zkoušce v úhlové rovině tlaku (foto autor): a. dvojitý čep a rozpor (IV 78); b. trojitý čep a rozpor (IV 92); c. kolíky (IV 92)

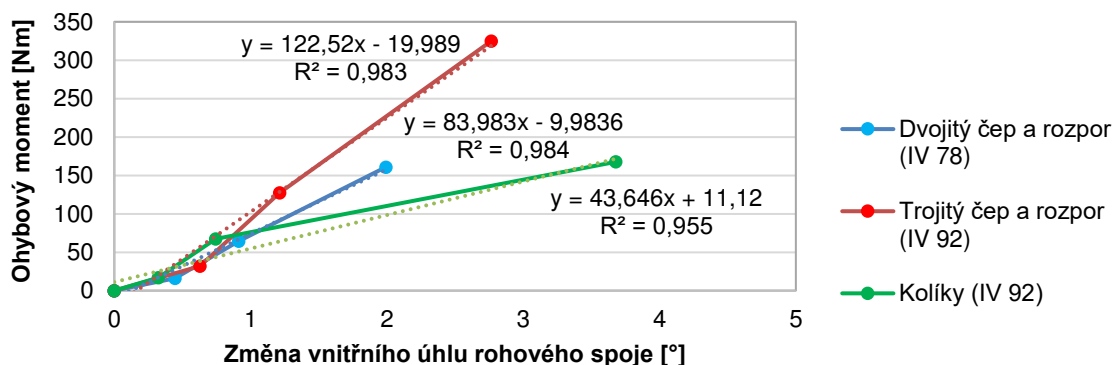
Podle charakteru porušení kolíků je vidět, že při testování v úhlové rovině tlaku došlo na vnější straně spoje k porušení v tahu (Obr. 6 c). Lepidlo (1K-Holzkalteim D4) poskytlo dostatečnou pevnost, a proto ve stejné konfiguraci kolíků se záměnou lepidla s vyšší smykovou pevností slepu již pevnost rohového spoje nezvýší. Analogicky taktéž docházelo k tahovému namáhání kolíků na vnitřní straně rohového spoje při testování v tahu. Podle tohoto pozorování lze konstatovat, že kritickou vlastností byla pevnost dřeviny kolíků (dub) v tahu. Stejnou distribuci napětí lze pozorovat i na FEM modelu celého okenního křídla Pantaleo et al. (2013).

Komplexní výsledky základních ukazatelů popisné statistiky pevnosti rohových spojů jsou součástí Přílohy 10 a Přílohy 11. Pro stanovení závěrů jsou níže (Tab. 5) shrnuty pouze důležité sledované charakteristiky potřebné k následnému porovnání.

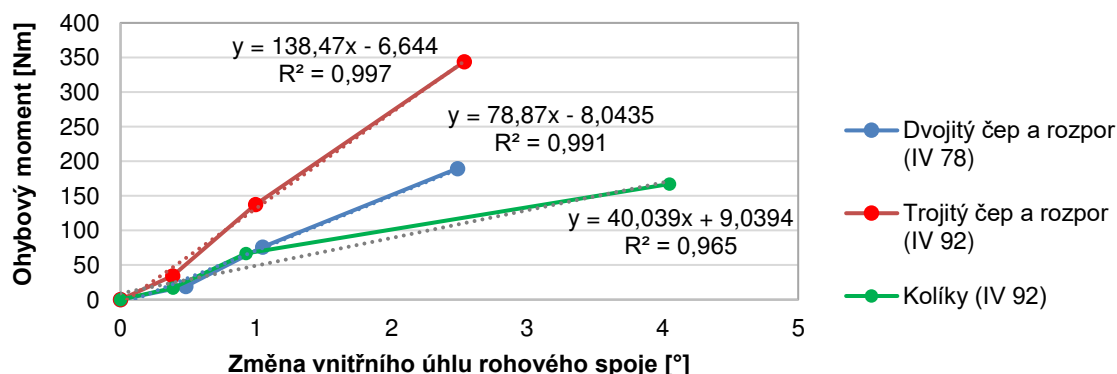
Tab. 5: Souhrnné výsledky testování rohových spojů při zatěžování v úhlové rovině tlaku i tahu (Podlena et al. 2017; Podlena a Borůvka 2016)

Typ namáhání	Typ spoje (profil)	$\gamma_{10\%}$ (°)	$\gamma_{40\%}$ (°)	γ_{\max} (°)	$M_{10\%}$ (Nm)	$M_{40\%}$ (Nm)	M_{\max} (Nm)	$C_{10\%}$ (Nm)	$C_{40\%}$ (Nm)	C_{\max} (Nm)
Tlak	Dvojitý čep a rozpor (IV 78)	0,4	0,9	2,0	16	64	161	3030	4269	4485
	Trojitý čep a rozpor (IV 92)	0,6	1,2	2,8	32	128	325	3469	6284	6658
	Kolíky (IV 92)	0,3	0,7	3,7	17	67	168	3718	5541	2722
Tah	Dvojitý čep a rozpor (IV 78)	0,5	1,0	2,5	19	76	190	3004	4293	4130
	Trojitý čep a rozpor (IV 92)	0,4	1,0	2,5	34	138	344	5810	8097	7882
	Kolíky (IV 92)	0,4	0,9	4,0	17	67	167	3633	4666	2512

Z Tab. 5 je patrné, že při zatěžování rohových spojů ohybový moment narůstal až do meze pevnosti spoje, kdy došlo k porušení spojů. Protože délka ramena spojů byla konstantní, je výsledný ohybový moment se zvyšující silou přímo úměrný zatěžující síle s lineární závislostí. Proložením zmíněných bodů v 10 %, 40 % a maximum tak získáváme závislost ohybového momentu na změně vnitřního úhlu, jež je zobrazena pro tlak na Obr. 7 a pro tahovou zkoušku na Obr. 8. Lineární regresní analýzou byla prokázána silná pozitivní závislost s vysokými hodnotami koeficientů determinace (0,955 – 0,997).



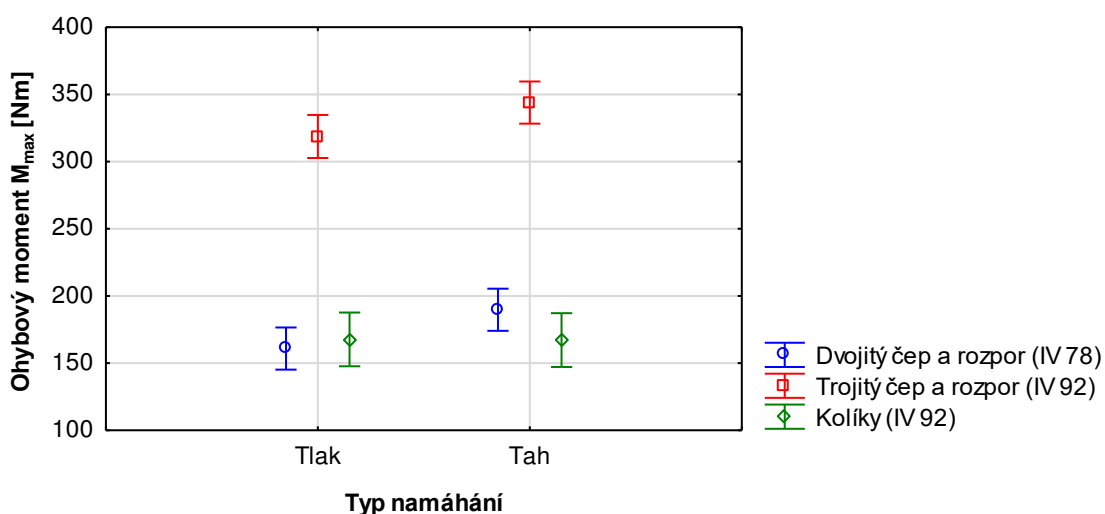
Obr. 7: Závislost ohybového momentu na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tlaku



Obr. 8: Závislost ohybového momentu na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tahu

Z Obr. 7 a Obr. 8. je vidět, že nejvyšších ohybových momentů bylo dosaženo vždy při největší změně úhlu spoje u tlakové i tahové zkoušky. Podle původní nulové hypotézy dosáhl trojitý čep s rozporem (IV 92) vyšších ohybových momentů oproti kolíkovým spojům v úhlové rovině tlaku (325 Nm) i v tahu (344 Nm). V tlaku dosáhl dvojitý čep a rozpor (161 Nm) i na menším profilu (IV 78) přibližně stejných hodnot jako kolíkové spoje (168 Nm) s větším profilem (IV 92). V úhlové rovině tahu nastal opačný trend, kdy dvojitý čep a rozpor (190 Nm) na menším profilu (IV 78) dosáhl vyšších hodnot oproti kolíkovému spoji (167 Nm) na větším profilu (IV 92).

Při porovnání maximálních ohybových momentů v tlaku a tahu nebyl zjištěn statisticky významně odlišný rozdíl ($p > 0,05$) u žádného z testovaných spojů mezi typy namáhání (Obr. 9). Maximální rozdíl byl tak pozorován u dvojitého čepu a rozporu (15 %), menší u trojitého čepu a rozporu (6 %) a dále menší než 1 % u kolíků. Podobně na tom byl i Ímirzi et al. (2015), který naměřil při zatěžování rohových spojů stejně malé rozdíly pro spoj s kolíky (9 %) nebo jednoduchým čepem a rozporem (2 %). Zároveň tak bylo i zde prokázáno, že čep a rozpor v porovnání s dalšími spoji (kolíky, lamelami aj.) dosahuje nejvyšší pevnosti (Ímirzi et al. 2015; Kyuchukov et al. 2011).



Obr. 9: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Vliv typu namáhání na maximální ohybový moment testovaných rohových spojů okenních křídel

Porovnáním trojitého čepu a rozporu (IV 92) s kolíky (IV 92) tak byly zjištěny přibližně dvakrát větší hodnoty u trojitého čepu s rozporem. Analýzou rozptylu bylo prokázáno, že vyšší hodnoty ohybových momentů trojitého čepu a rozporu (IV 92) zjištěné v maximu jsou statisticky významně odlišné ($p < 0,05$) ve srovnání se všemi ostatními testovanými spoji. Konkrétně u trojitého čepu s rozporem (IV 92) je tedy průměrná velikost maximálního ohybového momentu v tlaku o 48 % vyšší ve srovnání s kolíkovým spojem (IV 92) a o 50 % vyšší ve srovnání s dvojitým čepem a rozporem (IV 78). Obdobné hodnoty pozorujeme také při porovnání v tahu, kdy dvojitý čep a rozpor (IV 78) má o 45 % nižší hodnoty a rohové spoje s kolíkovými spoji o 51 % nižší hodnoty.

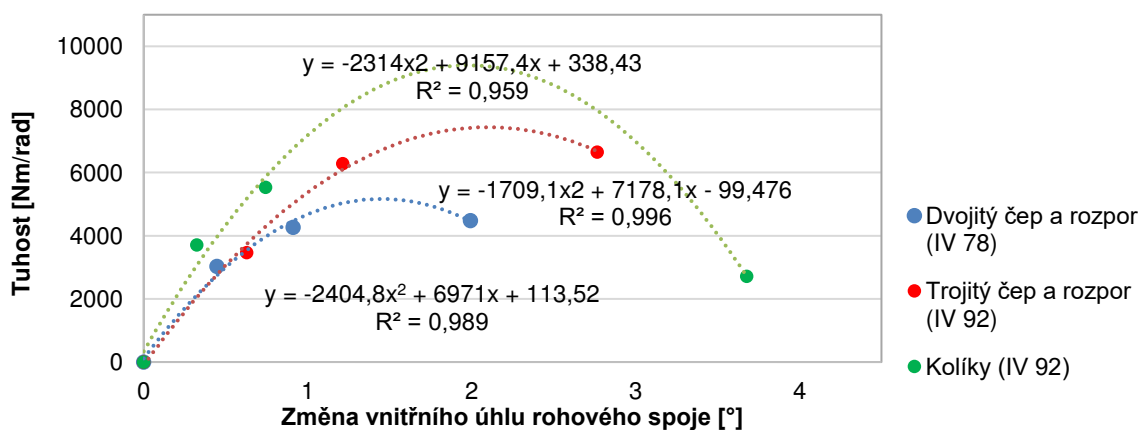
Z velikostí lepené plochy spojů se dá částečně vysvětlit rozdíl mezi ohybovými momenty, kdy spoje s větší lepenou plochou dosáhly vyšší pevnosti. Závislost velikosti lepené plochy na pevnosti byla již prokázána i u jiných spojů (Warmbier a Wilczyński

2000; Hajdarević a Šorn 2012), což bylo základním předpokladem nulové hypotézy o vyšší pevnosti u čepového spojení oproti kolíkům.

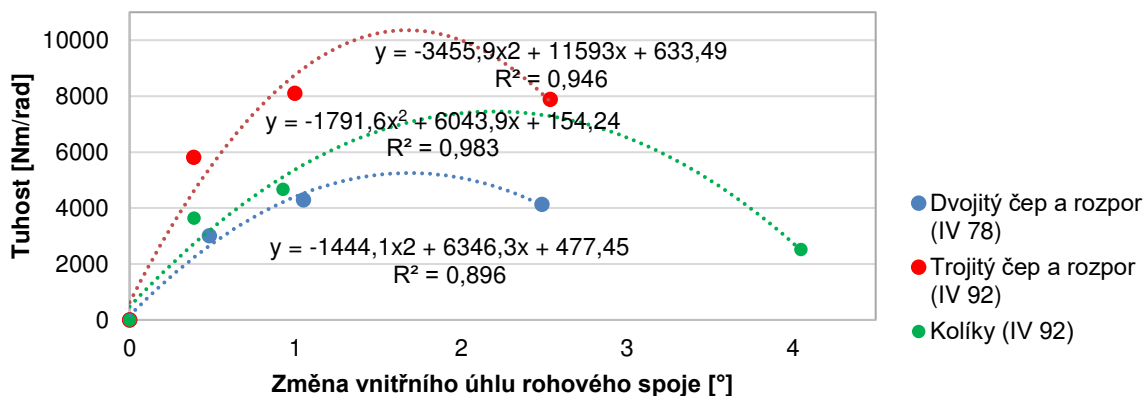
Velikost lepených ploch spojů od nejvyšší byla následující: trojitý čep a rozpor (10260 mm²), dvojitý čep a rozpor (8846 mm²) a kolíky (7298 mm²). Při srovnání otevřeného trojnásobného čepu a rozporu (IV 92) měl tak spoj o 29 % větší velikost lepené plochy oproti kolíkovým spojům na stejně velkém profilu (IV 92) a o 14 % ve srovnání s dvojitým čepem a rozporem (IV 78). V případě kolíkových spojů (IV 92) tak lze při nižší lepené ploše dosáhnout podobných hodnot ohybových momentů jako u dvojitého čepu a rozpor (IV 78), se současným přijetím vyšší změny vnitřního úhlu, resp. deformace (svěšení) rámu okenního křídla.

Při zohlednění vlivu lepidel (Tab. 4) lze konstatovat, že při porovnání všech typů spojů a zatížení mohlo být rozdílných ohybových momentů dosaženo významně odlišnými hodnotami smykových pevností lepidel ($p < 0,05$). Každopádně v případě trojitého čepu a rozporu (IV 92) nebylo dosaženo vyššího ohybového momentu pomocí použitého lepidla (D4-Leim 1K). Ve srovnání s lepidlem (1K-Holz Kaltleim D4), použitým na kolíkové spoje (IV 92), mělo totiž v průměru o 1,8 MPa nižší smykovou pevnost lepidla. Dvojitý čep a rozpor (IV 78) byl naopak slepený nejpevnějším lepidlem (GXL 4), což mohlo napomoci ke srovnatelné pevnosti s kolíkovými spoji (IV 92).

Opětovným proložením bodů v 10 %, 40 % a maximu tak získáváme novou závislost tuhosti na změně vnitřního úhlu, jež je zobrazena pro tlak na Obr. 10 a pro tahovou zkoušku na Obr. 11. Protože je výsledná tuhost spoje poměrem ohybového momentu a úhlové deformace, má spojnice trendu nelineární průběh. Regresní analýzou s polynomickou spojnicí trendu byla i zde prokázána silná pozitivní závislost s vysokými hodnotami koeficientů determinace (0,896 – 0,996).



Obr. 10: Závislost tuhosti na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tlaku



Obr. 11: Závislost tuhosti na změně vnitřního úhlu rohového spoje v tahu

Z Obr. 10 a Obr. 11 je tak vidět, že tuhost rohových spojů má jinou závislost než ohybový moment. Kvůli vzrůstající změně úhlu tak nejvyšších hodnot tuhostí bylo dosaženo už vždy v měřené oblasti mezi 40 % a maximem u tlakové i tahové zkoušky. Ze všech testovaných spojů tak kolíkové spoje (IV 92) dosáhly největších změn vnitřního úhlu v tahu (4,0°) i tlaku (3,7°). V reálném případě by tak pootočením okenního křídla s délkou ramena 1 m při 4,0° změně došlo na konci přibližně k 7 mm svěšení, při které by došlo k porušení spoje.

Celkově tak ohybový moment, tuhost a změnu vnitřního úhlu považovat za tři nejdůležitější parametry, které jsou porovnatelné na ostatních spojích a profilech uvedených v Příloha 1. Na základě vzájemného porovnání všech spojů lze konstatovat, že největší změna vnitřních úhlů vždy nastává u rohových spojů s kolíky (IV 92) v tlaku i tahu, což je dáno charakterem spoje.

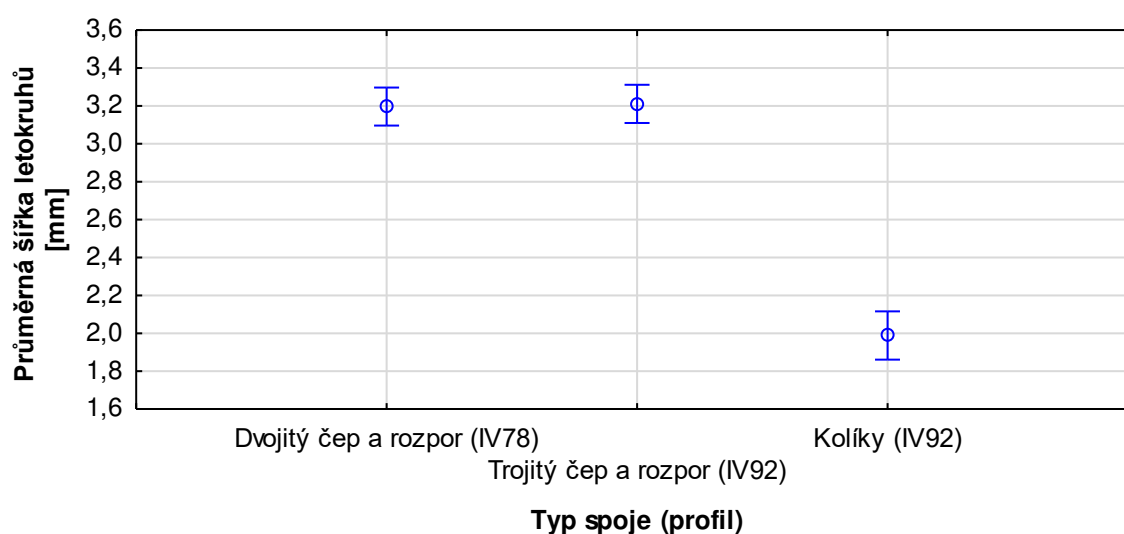
5.3. VLIV ŠÍŘKY LETOKRUHŮ OKENNÍCH HRANOLŮ

Měřením šířky letokruhů na lepených hranolech (Tab. 6) bylo zjištěno, že šířka letokruhů mezi čepy a rozpory je v průměru totožná (3,2 mm). Protože se jedná o jeden z materiálových faktorů, který má např. u smrku vliv na hustotu dřeva (Herman et al. 1998), můžeme zde rozdílné hodnoty vyloučit.

Mezi dvojitým a trojitým čepem s rozporem tak nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly ($p > 0,05$). Pouze spoje s kolíky na lepeném hranolu (2,0 mm) měly statisticky významně menší šířku letokruhů ($p < 0,05$) ve srovnání s čepy a rozpory (Obr. 12). Nicméně u čepů jsou lepené plochy mezi sebou vzájemně v kontaktu skrz spoj, kdežto u kolíků mezi ně byl vlepen kolík. Jak už bylo řečeno, tak rohové spoje s kolíky selhaly z 95 % právě přímo v kolících, takže se znovu potvrdilo kritické místo spoje – kolíky v rohových spojích.

Tab. 6: Průměrná šířka letokruhů měřená na testovaných okenních profilech

Typ spoje (profil)	Dvojitý čep a rozpor (IV 78)	Trojité čep a rozpor (IV 92)	Kolíky (IV 92)
Aritmetický průměr (mm)	3,2	3,2	2,0
Medián (mm)	3,1	3,2	2,0
Směrodatná odchylka (mm)	0,6	0,6	0,3
Minimum (mm)	1,9	2,1	1,4
Maximum (mm)	4,5	4,5	2,8
Variační koeficient (%)	18	18	15
Počet zkušebních těles	104	102	64



Obr. 12: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Průměrná šířka letokruhů měřená na testovaných okenních profilech

5.4. Vliv faktorů na pevnost spoje vlepěného kolíku

Sledovanými faktory vlepěných kolíků byla: struktura povrchu nejpoužívanějších kolíků, dřevina, průměr kolíků a vliv použitých lepidel s vlivem předlepení. Vliv rozdílné vlhkosti byl vyloučen ustálením hmotnosti zkušebních těles v klimatizační komoře, protože rozdílná vlhkost ovlivňuje pevnost spoje (Tankut 2007; Bomba et al. 2014).

5.4.1. STRUKTURA POVRCHU KOLÍKU

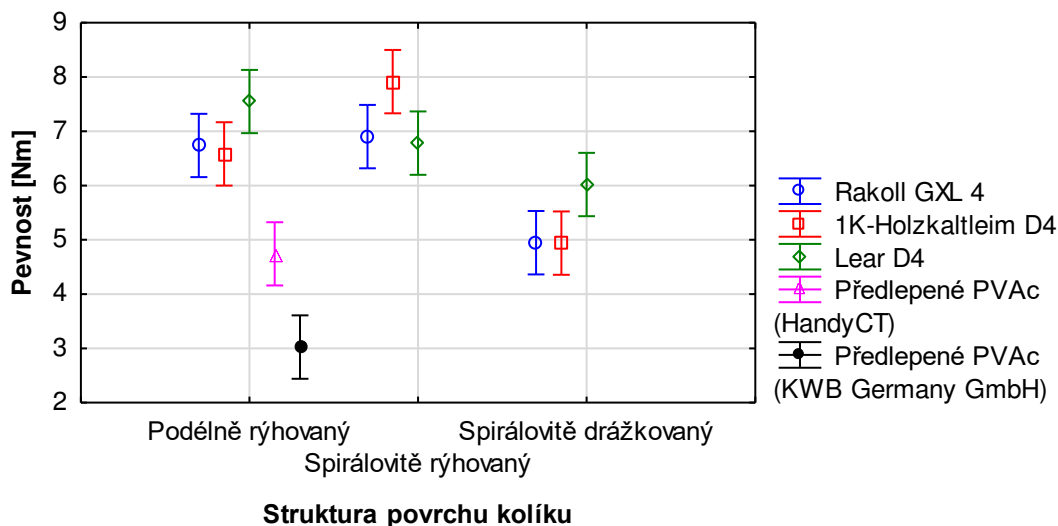
Výsledky této části byly publikovány v článku Podlena et al. (2018). Základní statistické ukazatele výsledků testovaných kolíků jsou uvedeny níže (Tab. 7). Získaná data byla následně hodnocena pomocí analýzy rozptylu (Obr. 13).

Tab. 7: Výsledky testování lepených spojů s kolíky rozdělené podle struktury povrchu kolíku a použitého lepidla

Struktura povrchu kolíku	Podélně rýhovaný					Spirálovitě rýhovaný			Spirálovitě drážkovaný		
	Předlepené PVAc (HandyCT)	Předlepené PVAc (KWB Germany GmbH)	GXL 4	1K-Holzkalteim D4	Lear D4	GXL 4	1K-Holzkalteim D4	Lear D4	GXL 4	1K-Holzkalteim D4	Lear D4
Lepidlo											
Aritmetický průměr (MPa)	4,7	3,0	6,7	6,6	7,5	6,9	7,9	6,8	4,9	4,9	6,0
Medián (MPa)	4,6	2,8	6,5	6,3	7,8	6,7	7,9	6,8	5,1	4,9	6,3
Směrodatná odchylka (MPa)	0,5	0,5	1,1	1,3	1,5	0,8	1,0	1,5	0,8	0,6	0,9
Minimum (MPa)	4,2	2,4	5,1	4,6	4,7	5,8	6,4	4,4	3,8	4,2	4,5
Maximum (MPa)	5,7	4,0	9,0	8,4	9,4	8,3	9,7	9,2	6,6	5,9	7,6
Variační koeficient (%)	10,3	16,9	16,6	19,2	20,4	11,2	13,0	21,7	17,1	11,9	15,4
Počet zkušebních těles	12										

Největší pevnost ze všech byla zjištěna u spirálovitě rýhovaných kolíků slepené lepidlem 1K-Holzkalteim D4 (7,9 MPa). Naproti tomu rovně rýhované kolíky se stejným lepidlem dosáhly o 16,5 % (6,6 MPa) méně a s lepidlem GXL 4 byl pozorovatelný už jen 2,9% rozdíl mezi podélně a spirálovitě rýhovanými kolíky. Základním předpokladem bylo, že spirálovitě rýhované kolíky budou mít vyšší pevnost. Analýzou rozptylu se ale potvrdilo, že rozdíl mezi podélně rýhovanými a spirálovitě rýhovanými kolíky není celkově u žádného z tří testovaných lepidel statisticky významný ($p > 0,05$). Ke stejnému závěru navíc došly i předchozí výzkumy (Ahmad et al. 1993; Eckelman a Cassens 1985).

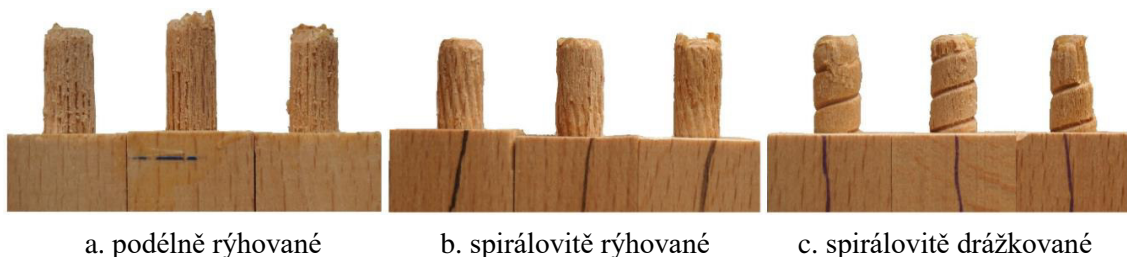
Nejhorší pevnost ze standardních testovaných kolíků (bez předlepení) se projevila u spirálovitě drážkovaných. Při použití PVAc lepidel (GXL 4 a 1K-Holzkalteim D4) byla pro obě z lepidel naměřena totožná pevnost (4,9 MPa). Vyšší průměrná pevnost (6,0 MPa) pak byla pozorována u spirálovitě drážkovaných kolíků lepených PUR lepidlem (Lear D4), jejíž hodnota pevnosti ale nebyla statisticky významná v porovnání s kolíky lepených PVAc lepidly ($p > 0,05$).



Obr. 13: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Vliv struktury povrchu kolíku na pevnost při vytahování (Podlena et al. 2018)

Tyto kolíky byly vyrobeny z javoru (ostatní kolíky z bukového dřeva). Při hodnocení vlivů proto bylo přihlédnuto ke smykové pevnosti (DIN 68364, 2003) bukového (10 MPa) a javorového dřeva (11 MPa). Bylo zjištěno, že dřevo javoru má dokonce o 1 MPa větší smykovou pevnost. Proto můžeme tvrdit, že nižší pevnost spirálovitě drážkovaných kolíků nebyla způsobená použitím jiné dřeviny, ale naopak jiným faktorem, příp. kombinací faktorů.

Na obrázku Obr. 14 jsou zobrazeny nejčastější případy chyb porušení otestovaných standardních kolíků. U kolíků se spirálovitou drážkou je vidět, že v porovnání s ostatními rýhovanými kolíky došlo vždy ke kohezivnímu porušení kolíku v horní části spoje a to v prvním až druhém závitě bez zanechání zbytků adherendu na kolíku (Obr. 14 c). Ukázalo se tak, že jedním z faktorů nižší pevnosti těchto kolíků je zapříčiněna právě strukturou kolíku. Použitím jednoduché spirálovité drážky pod vysokým úhlem vůči podélné ose kolíku si výrobce klade za cíl mít větší (hladkou) kontaktní lepenou plochu a zároveň hlubokou vyřezávanou drážkou zvýšit odpor při vytahování ze spoje. Drážka nakonec splnila svou funkci. Můžeme říci, že vzhledem k charakteru smykovému porušení kladla odpor vůči vytažení kolíku. Průměrná pevnost při vytažení však nebyla větší než u rýhovaných kolíků, přičemž vliv dřeviny byl již na základě porovnání smykových pevností buku a javoru vyloučen. Na obrázku Obr. 14 je tak vidět, že kombinace vyřezávané drážky a jejího vysokého úhlu stoupání se stala kritickým místem spoje.



Obr. 14: Stav kolíků lepených PVAc lepidlem (GXL 4) po ukončení zkoušky (Podlena et al. 2018)

Rýhované kolíky neměly strukturu vyřezávanou, ale vytlačenu, a to v podélném směru (podélně rýhované), nebo pod nízkým úhlem stoupání (spirálovitě rýhované) ve směru vytahování kolíku z adherendu. Odpor rýhy byl tak menší, ale i přesto prokázaly kolíky vyšší pevnost. Navíc vzhledem k častému charakteru porušení můžeme tvrdit, že pevnost kolíku je ve skutečnosti vyšší než naměřená, protože u obou kolíků došlo z větší části ke kohezivnímu porušení v adherendu (Obr. 14 a, Obr. 14 b).

Při výrobě rýhovaných kolíků je struktura pouze vytlačována, přičemž nejsou přerušena vlákna dřeva, což se ukázalo jako kritické právě u drážkovaných kolíků. Zároveň bobtnání dřeva pravděpodobně napomohlo k vyšší pevnosti obou rýhovaných kolíků. Suchý kolík ve spoji absorboval vlhkost z lepidla, čímž zvětšil svůj objem a utěsnil se v otvoru. Navíc zkosené hrany napomohly lepšímu vkládání kolíků do otvoru a rozvrstvení lepidla do stran, do postranních drážek, a skrz ně bylo přebytečné lepidlo vytlačováno z otvoru ven. V obou případech bylo výsledkem aplikace rýhovaných kolíků rovnoměrně rozvrstvené lepidlo po ploše kolíků.

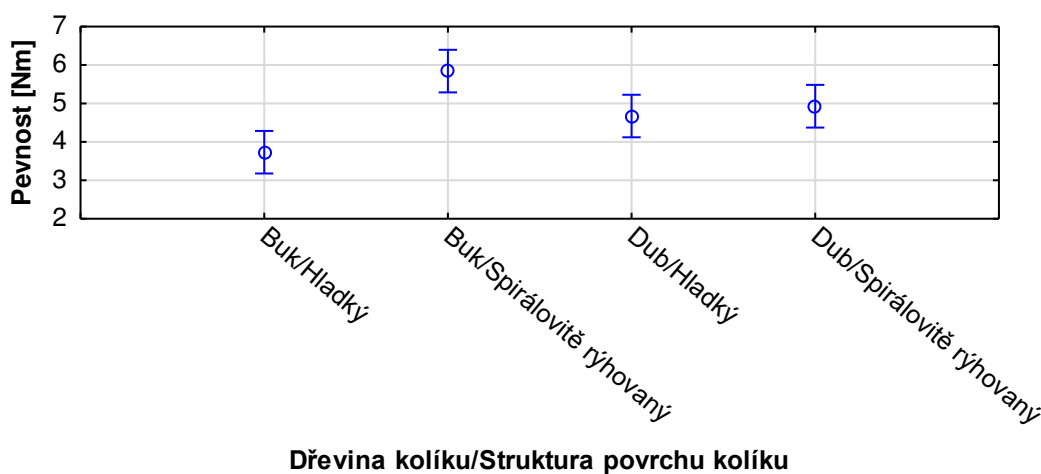
5.4.2. VLV DŘEVINY KOLÍKU A ÚČINNOST RÝHOVÁNÍ

Dodatečně byly ještě navíc porovnány stejnou metodou další typy kolíků: bukové s dubovými ve variantě hladkých (referenční) a spirálovitých kolíků. Výsledky základních ukazatelů z popisné statistiky pevnosti vlepovaných kolíků jsou uvedeny níže (Tab. 8).

Při srovnání referenčních hladkých kolíků se spirálovitě rýhovanými (Obr. 15) bylo prokázáno, že přítomnost spirálovitého rýhování celkově pozitivně ovlivňuje pevnost vlepovaných kolíků ($p < 0,05$). Tento statisticky významný efekt je viditelný zejména u bukových spirálovitě rýhovaných kolíků (5,8 MPa), jejichž pevnost byla opět největší, při porovnání s hladkými bukovými kolíky (3,7 MPa). Individuálním porovnáváním již pak mezi dubovými kolíky významné rozdíly pozorovány nebyly ($p > 0,05$).

Tab. 8: Výsledky testování lepených spojů s kolíky rozdělené podle dřeviny a struktury povrchu kolíku

Dřevina kolíku	Buk		Dub	
	Hladký	Spirálovitě rýhovaný	Hladký	Spirálovitě rýhovaný
Aritmetický průměr (MPa)	3,7	5,8	4,7	4,9
Medián (MPa)	3,6	5,7	4,7	5,0
Směrodatná odchylka (MPa)	0,6	1,3	0,8	0,5
Minimum (MPa)	3,1	3,2	3,3	4,1
Maximum (MPa)	4,9	7,9	6,4	5,6
Variační koeficient (%)	15	23	17	10
Počet zkušebních těles	10	10	10	10



Obr. 15: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Vliv dřeviny a struktury povrchu kolíku na pevnost při vytahování

Zkosené hrany všech kolíků napomohly při vkládání kolíků do otvoru a také k lepší distribuci lepidla. Lepidlo se pak u strukturovaných kolíků rozvrstvalo rovnoměrně v podélném směru kolíku. Vyšší pevnost tak dosáhly spirálovitě rýhované kolíky, jak se předpokládalo. U hladkých kolíků totiž lepidlo nemělo možnost uniknout do stran a čelo kolíku tak stlačovalo lepidlo v otvoru.

Lepené hladké kolíky mají ale své opodstatnění např. v dřevotřískových deskách, jak potvrdil (Eckelman a Cassens 1985). Lepidlo zde je čelem kolíku vtlačováno do prostoru mezi třískami desky, což se právě v tomto případě projevilo vyšší pevností spoje s hladkým kolíkem ve srovnání se spirálovitě rýhovanými kolíky.

Co se týká dřeviny kolíků, tak celkový statisticky významný rozdíl mezi dubovými a bukovými kolíky nebyl prokázán ani celkově, ani individuálním porovnáním ($p > 0,05$). Podobně když Īmirzi et al. (2015) porovnávaly bukové kolíky v rohových spojích z dubového a bukového dřeva, bukové dřevo dosáhlo v tahu také jen o 4 % vyšší pevnost.

5.4.3. PRŮMĚR KOLÍKU

Naměřené průměry a jejich základní ukazatele z popisné statistiky jsou uvedeny níže v Tab. 9. Všechny testované kolíky byly vyrobeny strojovou výrobou, čemuž odpovídají nízké variační koeficienty průměrů kolíků (0,4 % - 1,1 %). Můžeme tak říci, že kolíky byly vyrobeny s vysokou přesností.

Tab. 9: Průměry všech použitých kolíků naměřené před slepením

Dřevina kolíku	Dub		Buk				Dub	Javor
Struktura povrchu kolíku	Hladké		Podélně rýhované			Spirálovitě rýhované		Spirálovitě drážkované
Výrobce kolíku	Ason-Vala	Ason-Vala	HandyCT	KWB tools GmbH	Marušik Holz	Marušik Holz	•	Rockler Woodworking and Hardware
Aritmetický průměr (mm)	7,78	7,99	8,11	8,01	7,93	7,93	7,67	7,86
Medián (mm)	7,76	7,99	8,10	8,00	7,93	7,93	7,71	7,87
Směrodatná odchylka (mm)	0,07	0,03	0,09	0,08	0,09	0,05	0,08	0,09
Minimum (mm)	7,70	7,96	7,97	7,9	7,65	7,8	7,47	7,67
Maximum (mm)	7,92	8,06	8,24	8,19	8,11	8,07	7,73	8,01
Variační koeficient (%)	0,9	0,4	1,1	1,0	1,1	0,7	1,1	1,1
Počet zkušebních těles	10	10	12	12	36	36	10	36

Pozn.: • – kolíky od firmy Slavona, s.r.o., která tyto kolíky používá na své rohové spoje okenních křidel

Protože výrobce Rockel Woodworking and Hardware distribuuje spirálovitě drážkované kolíky na území Spojených států amerických (USA), byla velikost kolíků udávaná v angloamerické soustavě (průměr 5/16"), čemuž odpovídá 7,94 mm v metrické soustavě. Ve skutečnosti byl průměr kolíků ještě nižší než deklarovaný průměr (7,86 mm). Studentovým t-testem také bylo zjištěno, že na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ musíme zamítnout hypotézu o tom, že střední hodnota průměru odpovídá 7,94 mm (tj. 5/16").

Výrobci ostatních kolíků byli z Evropských zemí a všichni uváděli průměry kolíků 8 mm. Pomocí Studentova t-rozdělení byla opět na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítnuta hypotéza o tom, že střední hodnoty těchto průměrů jsou u všech výrobců

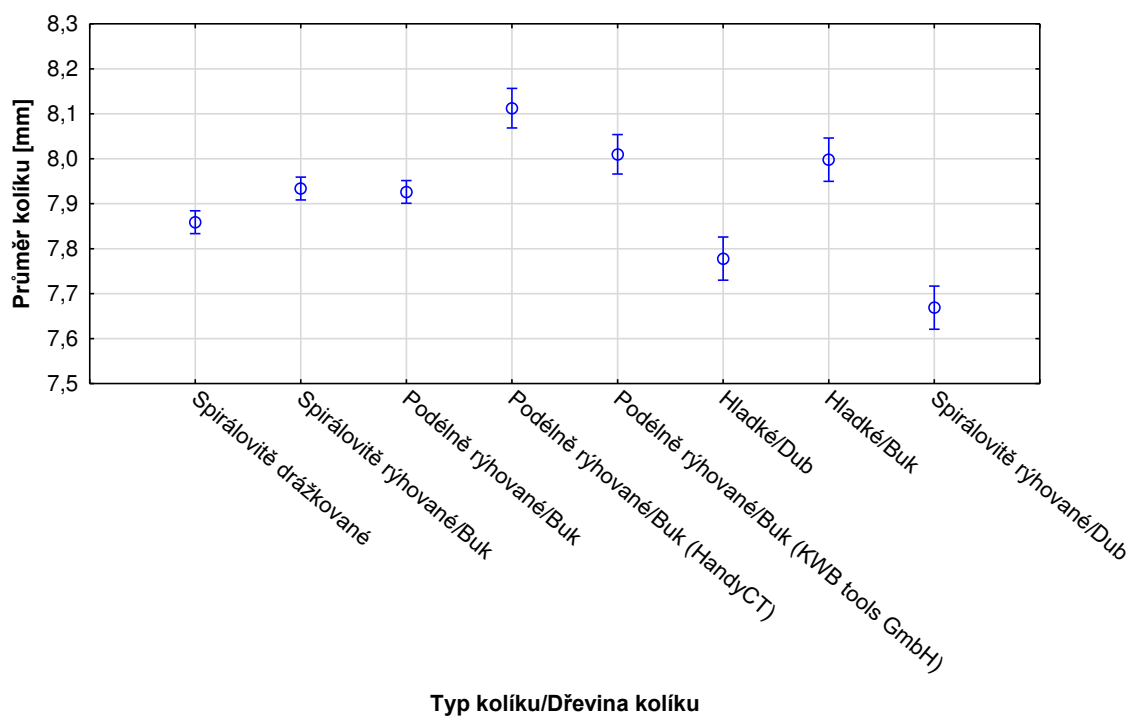
deklarované 8 mm kromě bukových hladkých kolíků od Ason-Vala a bukových podélně rýhovaných od KWB tools GmbH, ve kterých tuto hypotézu nelze zamítnout.

Nejmenší průměr tak byl naměřen u dubových hladkých kolíků (7,78 mm), které byly vyrobeny z dřevěných hůlek stejně jako hladké bukové kolíky (7,99 mm). Průměrem kolíků tak lze vysvětlit rozdíl, který vznikl při porovnávání mezi hladkými a spirálovitými kolíky u kolíků z bukového a dubového dřeva (Tab. 8, Obr. 15).

U hladkých kolíků s větším průměrem docházelo při vkládání kolíku do otvoru k setření lepidla ze stěny a stlačení lepidla v otvoru, protože lepidlo nemělo možnost úniku, což vedlo k vytvoření chudého spoje. Díky strukturování povrchu, které mají rýhované kolíky, tak i u těsného kolíku došlo k rovnoměrnému rozvrstvení lepidla na ploše, protože stlačené lepidlo mělo možnost uniknout ven z otvoru skrz rýhy a rozvrstvit se po ploše.

Při porovnání hladkých a spirálovitých bukových kolíků je tak rozdíl velmi výrazný. Vyšší pevnosti mělo být také dosaženo bobtnáním stlačeného kolíku, kdy kolíky v otvoru zvětšily svůj objem, díky absorpci vlhkosti z lepidla. Menší rozdíl byl pak pozorován u hladkých a spirálovitých kolíků vyrobených z dubu. Vyšší průměrná pevnost tak byla pravděpodobně dosažena hladkými dubovými kolíky (4,7 MPa) oproti hladkým bukovým kolíkům (3,7 MPa), protože dubové kolíky měly výrazněji menší průměr (7,78 mm) než průměr otvoru (8 mm). Lepidlo se tak dokázalo na povrchu snáze rozvrstvit pomocí mezery mezi kolíkem a otvorem. U dubových spirálovitých kolíků pak také pravděpodobně díky menšímu průměru (7,67 MPa) byla naměřena průměrná pevnost (4,9 MPa) při vytažení nižší než u kolíků bukových se spirálovitým rýhováním (5,8 MPa).

Jak již také potvrdily předchozí výzkumy, zvětšující se lepená spára snižuje pevnost lepeného spoje (Ratnasingam a Ioras 2013; Hajdarević a Šorn 2012; Bomba et al. 2018). Tento vliv pravděpodobně přispěl i k nižší pevnosti spirálovitě drážkovaných kolíků. Vyhodnocením průměrů kolíků pomocí ANOVA (Obr. 16) je sice vidět, že kolíky byly porovnány s průměry se statisticky významným rozdílem ($p < 0,05$). Nicméně předchozí stanovisko ohledně vlivu struktury u spirálovitě drážkovaných kolíků zůstává, a to zejména dle charakteru porušení.



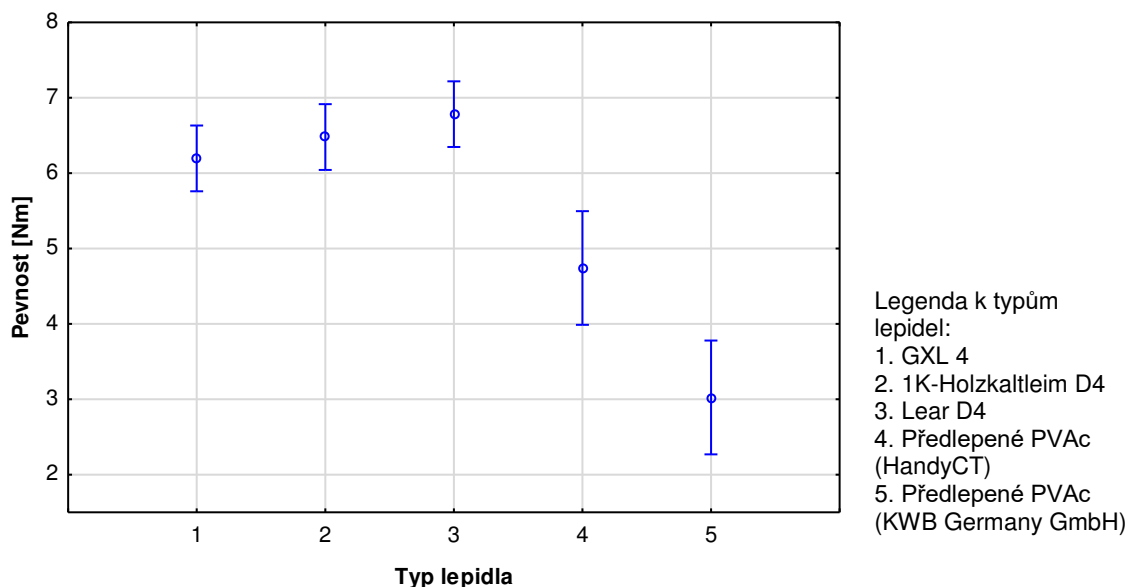
Obr. 16: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Porovnání průměrů použitých kolíků před slepením

Měření průměru kolíků také ukázalo na statisticky významný rozdíl mezi testovanými předlepenými kolíky ($p < 0,05$). Vyšší průměr byl pak zjištěn u předlepených kolíků s rovným rýhováním od HandyCT (8,11 mm).

Zároveň lze také konstatovat, že při hodnocení spirálovitých a podélně rýhovaných kolíků nebyly výsledky měření ovlivněny průměry kolíků, protože zjištěné průměry nebyly statisticky významně odlišné ($p > 0,05$).

5.4.4. ÚČINNOSTI PŘEDLEPENÍ KOLÍKU A VLIV POUŽITÝCH LEPIDEL

Výsledky smykových pevností lepeného spoje dle jednotlivých lepidel (Tab. 4) byly již shrnuty v kapitole 5.1. Normovanou smykovou zkouškou při tahovém namáhání (ČSN EN 205, 2017) byla zjištěna statisticky vzájemně odlišná smyková pevnost použitých lepidel ($p < 0,05$). Nicméně při celkovém porovnání smykových pevností kolíkových spojů dle použitých lepidel (Obr. 17) zjišťujeme, že mezi lepidly použitými na standardních kolících není statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$). Významně odlišné jsou pouze kolíky předlepené PVAc lepidly ($p < 0,05$).



Obr. 17: Výsledky ANOVA na hladině významnosti 95 %: Pevnost kolíků v závislosti na typu lepidla

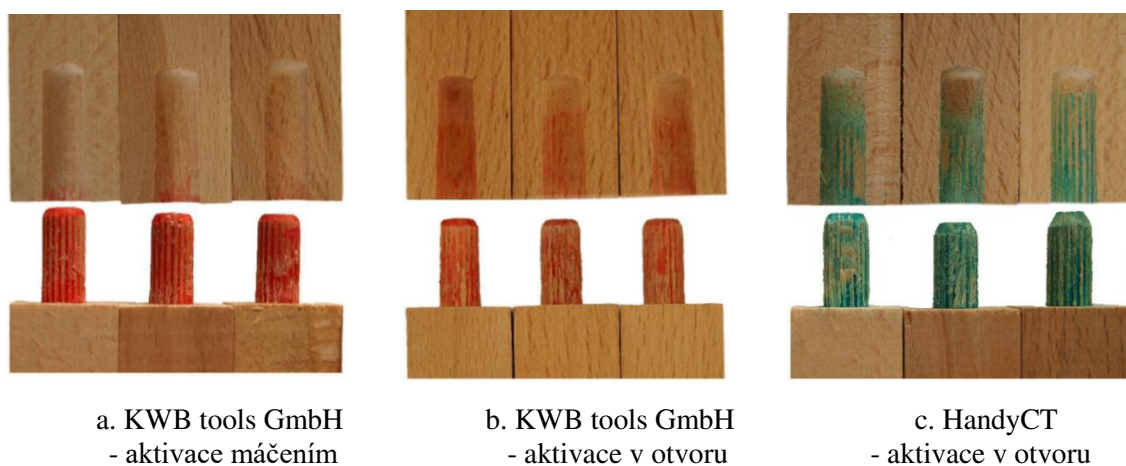
Na obrázku s kolíky po testování je vidět, že chyby spoje, které nastaly, byly z největší části kohezivní. Všechna adheziva tak poskytla dostatečnou pevnost, protože chyba adheziva se objevila pouze v menší míře (přibližně 20 %). U rýhovaných kolíků došlo z větší části k porušení v adherendu, zatímco u spirálovitě drážkovaných kolíků byly objeveny chyby přímo v kolících, jež byly způsobeny jejich strukturou (kapitola 5.4.1).

Při porovnání výsledků kolíků s pevností lepidel je vidět, že pevnost kolíků má vždy nižší hodnoty než smyková pevnost slepu lepidel, což je způsobeno nedostatečným kontaktem kolíku s adherendem, či nedostatečným tlakem, který nelze vyvodit jako u klasického slevování dvou souborů. Nedostatečné množství lepidla může být také považováno za vliv, který je závislý na struktuře kolíků, nebo jejich průměru, protože vede k chudému spoji, a tím pádem i nízké pevnosti. U všech kolíků bylo ale aplikováno dostatečné množství lepidla, které se projevilo vytékáním z otvorů během vkládání kolíků.

Jednofaktorová ANOVA potvrdila rozdíl mezi lepidly na předlepených kolících (Obr. 13 a Obr. 17) od HandyCT (4,7 MPa) a KWB tools GmbH (3,0 MPa). Pevnost při vytažení kolíku od HandyCT je tak statisticky významně větší ($p < 0,05$). Oba typy byly z bukového dřeva s podélným rýhováním klimatizovány na stejnou vlhkost, takže vlivy dřeviny, struktury a dřeviny byly vyloučeny. V předchozí kapitole (kapitola 5.4.3) bylo také zjištěno, že průměry obou kolíků jsou významně odlišné

($p < 0,05$). Před slepením barva aplikovaných lepidel indikovala dostatek lepidla rovnoměrným nánosem na ploše obou typů kolíků. Bližší specifikace lepidla chybí, takže základními faktory ovlivňující pevnost jsou typ lepidla a rozdílný postup aktivace, který uváděli výrobci v návodech použití.

Lepidlo u kolíků od HandyCT bylo aktivováno vodou přímo z předvrtaných otvorů, které se naplnily pomocí pipety. Naproti tomu kolíky od KWB tools GmbH byly podle návodu namočené do vody a až poté vloženy do otvoru. V tomto případě ale adhezivo aktivací máčení ihned změklo a když tyto kolíky byly vkládány do otvoru, adhezivo bylo setřeno z plochy kolíku. Jak je vidět na řezu otvorem kolíku (Obr. 18 a), tak červená stopa lepidla je viditelná pouze na horní hraně otvoru. Lepidlo se téměř nedostalo vůbec na plochy otvoru. Vytvořil se chudý spoj, který nakonec vyústil i v nízkou pevnost kolíkového spoje.



Obr. 18: Stav a porušení předlepených kolíků po ukončení zkoušky s podélným řezem otvoru (Podlena et al. 2018)

U kolíků od HandyCT aktivací lepidla v otvoru tento problém nenastal. Na plochách otvoru je tak vidět barevná stopa (zelená) kolíku (Obr. 18 c). Proto byly kolíky od KWB tools GmbH znovu testovány stejným postupem aktivace jako kolíky od HandyCT. Tento test potvrdil vyšší pevnost pro metodu aktivace, ve které se předlepené kolíky aktivují v otvoru naplněném do 1/3 vodou. Pevnost při vytažení u kolíků KWB tools GmbH tím vzrostla dokonce o 44 % (z 3,0 MPa na 5,4 MPa) a byla statisticky významně odlišná oproti původní hodnotě ($p < 0,05$). Navíc tento fakt byl opět podpořen obrázkem řezu otvoru (Obr. 18 b), na kterém je vidět lepidlo nanesené na stěnách otvorů. Testováním kolíků ze stejné série tak byl vyloučen vliv rozdílného průměru a lepidla, takže zásadní vliv hrála skutečně metoda aktivace již naneseného PVAc lepidla.

Ve srovnání s kolíky lepenými konvenčními lepidly (třída trvanlivosti D4) dosáhly statisticky významně nižších hodnot ($p < 0,05$), takže se celkově testované předlepené kolíky nejeví jako vhodnou variantou pro rohové spoje okenních křídel. Porušení, která obecně u předlepených kolíků nastala, byla adhezivního typu. Velkou výhodou je, že díky nízké viskozitě vody se lépe rozprostře po povrchu kolíku. Navíc jejich použití je rychlejší a na hotových výrobcích není potřeba řešit problém s přeteklým lepidlem.

6. ZÁVĚR

Vzorky poskytnutých rohových spojů okenních křídel s dvojitým čepem (IV 78) od firmy Jánošík OKNA-DVEŘE s.r.o., trojitým čepem a rozporom (IV 92) od firmy DAVELO s.r.o. a spoje s pěti dubovými kolíky se spirálovitým rýhováním (IV 92) od firmy SLAVONA s.r.o., které byly předmětem výzkumu, byly testovány dle navržené metodiky v úhlové rovině tahu i tlaku, přičemž se dospělo k následujícím závěrům.

- Trojitý čep a rozpor (IV 92) dosáhl na stejně širokém profilu v tlaku o 48 % vyšší ohybový moment (325 Nm) než kolíkový spoj (168 Nm), a to se statisticky významným rozdílem mezi těmito spoji ($p < 0,05$).
- V tahu dosáhl trojitý čep a rozpor (IV 92) na stejně širokém profilu také opět statisticky významně vyššího rozdílu ($p < 0,05$), a to o 51 % vyššího ohybového momentu (344 Nm) než spoj s kolíky (167 Nm).
- Překvapivě nebyl pozorován statisticky významný rozdíl mezi maximálními ohybovými momenty kolíkových spojů a dvojitého čepu s rozporom na menším profilu (IV 78) ani v tlaku (161 Nm), ani v tahu (190 Nm).
- Celkově tak při porovnání maximálních ohybových momentů pro jednotlivé typy namáhání (v úhlové rovině tlaku a tahu) nebyly u žádného z rohových spojů pozorovány statisticky významné rozdíly ($p > 0,05$).
- Hlavním faktorem, který se nejvíce podílel na rozdílnosti velikosti ohybových momentů mezi testovanými rohovými spoji, byla odlišná velikost lepené plochy jednotlivých spojů. Oproti spoji s kolíky (7298 mm²) měl trojitý čep a rozpor (IV 92) větší lepenou plochu o 29 % (10260 mm²) a dvojitý čep a rozpor (IV 78) o 14 % (8846 mm²), což částečně vysvětluje rozdíly mezi velikostmi ohybových momentů.
- Můžeme také konstatovat, že nižší pevnost kolíkových spojů nebyla způsobena použitým lepidlem (1K – Holzkaltleim D4), protože z 95 % došlo při testování rohového spoje ke kohezivnímu typu porušení právě v kolících, které byly z větší části namáhané tahem.
- Pevnost slepu lepidla 1K-Holzkaltleim D4 (13,7 MPa) navíc testováním za normálních podmínek prokázala dokonce statisticky významnou vyšší pevnost slepu ($p < 0,05$) než lepidlo D4-Leim 1K (11,9 MPa), které bylo použito na rohovém spoji trojitého čepu a rozporu.

Výzkum byl dále zaměřen na testování pevnosti různých variant kolíků při vytažení, přičemž se dospělo k následujícím zjištěním.

- Když byla porovnávána série nejčastějších kolíků dostupných na celosvětovém trhu, bukové spirálovitě rýhované kolíky prokázaly největší pevnost při vytažení s lepidlem 1K-Holzkaltem D4 (7,9 MPa).
- Navíc porovnáním spirálovitě rýhovaných s podélně rýhovanými kolíky nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl na žádném ze tří testovaných lepidel ($p > 0,05$), přičemž průměry testovaných kolíků nebyly taktéž statisticky významně odlišné ($p > 0,05$).
- Ze stejné série dopadly nejhůře spirálovitě drážkované kolíky (4,9 MPa) shodně s lepidly GXL 4 i 1K-Holzkaltem D4. Nižší pevnost byla způsobena kombinací menšího průměru kolíku (7,86 mm) a frézovanou drážkou pod vysokým úhlem, což se projevilo na kohezivním porušení kolíku.
- Celkovým porovnáním hladkých a spirálovitě rýhovaných kolíků vyrobených z dubu a buku bylo zjištěno, že mezi těmito dřevinami není v pevnosti při vytažení kolíků statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$).
- Nedostatečná pevnost byla naměřena u hladkých bukových kolíků s lepidlem GXL 4 (3,7 MPa). Hladký povrch kolíků (v kombinaci s průměrem) nedovolil rovnoměrnou distribuci lepidla, což se projevilo na velmi nízké pevnosti a potvrdila se tak účinnost drážek a rýhování ostatních kolíků
- Předlepené kolíky prokázaly celkově nejnižší pevnosti vůči standardním kolíkům, které byly lepeny komerčními lepidly (GXL 4, 1K-Holzkaltem D4, Lear D4), proto nejsou vhodnou alternativou do rohových spojů oken s kolíky. Nejhorší pevnost byla naměřena u kolíků od firmy KWB tools GmbH (3,0 MPa). Statisticky významně vyšší pevnosti ($p < 0,05$) dosáhly předlepené kolíky od HandyCT (4,7 MPa).
- Bylo prokázáno, že právě metoda aktivace PVAc lepidla, jež je uvedena v návodu výrobce KWB tools GmbH (tj. namáčení předlepených kolíků do vody), způsobila nízkou pevnost kolíků při vytažení. Opětovným přezkoušením s aktivací PVAc lepidla přímo v otvoru byla pevnost kolíků statisticky významně ($p < 0,05$) zvýšena (5,4 MPa).

7. DOPORUČENÍ

Na testovaných vzorcích rohových spojů, které poskytly výrobci oken ve výrobním standardu, byla potvrzena hypotéza o nižší pevnosti kolíkového spojení ve srovnání s čepem a rozporu na dřevěných okenních křídlech v úhlové rovině tlaku i tahu. Na základě zkoušek a porovnání tak doporučujeme firmě Slavona s.r.o. na okenních profilech používat zejména trojitě čepy, které ve výzkumu dosáhly nejvyšších ohybových momentů. Pokud však bude firma i nadále trvat na současném výrobním programu, který zahrnuje kolíky jako rohové spoje, platí pro ně následující doporučení.

- Upřednostnit kolíky zejména na otvíravých oknech menších dimenzí a v případě větších dimenzí kolíky používat pouze na fixních oknech, jejichž rohové spoje nejsou tolik namáhané, protože je rám připevněn do ostění.
- Setrvat v použití spirálovitě rýhovaných kolíků (případně podélně rýhovaných). V žádném případě nesmějí být tyto kolíky nahrazeny za hladké, z důvodu špatného rozvrstvení lepidla, jež bylo ve výzkumu prokázáno.
- Vliv dřeviny mezi bukovými a dubovými kolíky, které firma v současnosti používá, se sice nepotvrdil, ale bukové kolíky dosáhly vyšších průměrných hodnot. Navíc při testování rohových spojů docházelo zejména k tahovému namáhání kolíků a dle normy DIN 68364 (2003) má bukové dřevo vyšší pevnost v tahu (135 MPa) oproti dubu (110 MPa)
- Snižit zatížení na rohové spoje vlepením výplně (tj. zasklení) do polodrážky na silikon pro konstrukční aplikace.

Testováním pevnosti slepu všech použitých lepidel byla splněna první zkouška s pořadovým číslem jedna pro deklarovanou třídu trvanlivosti D4. Nicméně nejvyšších pevností dosáhlo PVAc lepidlo (GXL 4), které je používáno firmou Jánošík OKNA-DVEŘE s.r.o. na dvojitěm čepu a rozporu (IV 78). Proto je rovněž doporučeno zahrnout lepidlo GXL 4 do výrobního programu i ostatním výrobcům.

Rozdílnost pevnosti trojitěho čepu a rozporu ve srovnání s kolíky byl konkrétně návrh iniciovaný Ing. Milanem Součkem z firmy VBH, Vereinigter Baubeschlag-Handel, s.r.o., která dodává komponenty pro výrobu a montáž oken i dveří. Výrobci a dodavatelé kování si tak již kladou některé technologické otázky ve vztahu k vlastnostem oken. Pro objasnění dalších vlivů a faktorů tak doporučujeme při dalších výzkumech se zaměřit zejména na následující podněty, které jsou uvedené níže.

- Rozmístění kolíků, případně změnu jejich počtu a velikosti v průřezu vlysu, přičemž lze navrženou metodou získané výsledky mezi sebou porovnat. Větším počtem či průměrem kolíku se zvýší lepená plocha, což má vést k větší pevnosti rohového spoje, ale zároveň může vést k oslabení vlysu a snížení pevnosti.
- Jak důležité je nejprve okenní vlysy slepit a až pak povrchově upravit, příp. jak velký rozdíl v pevnosti rohového spoje by způsobil opačný technologický proces (tj. nejprve povrchová úprava vlyků a následné slepení rámu).
- Porovnání pevnosti více rohových spojů s rozdílnými lepidly, aby se zjistilo, jak jednotlivá lepidla reagují s některými dřevinami (zejména exotickými druhy) a zároveň jak se tato reakce projeví na pevnosti spoje konkrétních typů lepidel.
- Zaměřit se na rozdíl v pevnostech rohových spojů dřevěných a plastových oken, případně i spojům uměle zestárých. U plastových oken (bez výztuže) pevnost tvoří pouze svár a umělým zestárnutím lze simulovat venkovní podmínky, kterým je materiál vystaven, za kterých postupně degraduje a jeho pevnost se snižuje.

Z druhé části výzkumu, ve které byla testována pevnost různých variant kolíků při vytažení, pak vychází následující doporučení.

- K získání největší pevnosti lepeného spoje s kolíkem by v dřevěných konstrukcích měly být používány obzvláště rýhované kolíky (spirálovitě, příp. podélně rýhované). Na základě tohoto tvrzení bylo navrženo i první doporučení výrobcům oken.
- Hladké kolíky nejsou pro lepené konstrukce vůbec vhodné z důvodu špatného rozvrstvení lepidla (výjimkou jsou např. dřevotřískové desky). Své uplatnění tak hladké kolíky naleznou zejména jako vodící elementy ostatních spojovacích prostředků (např. excentrů, konfirmátů atd.) u rozebíratelného nábytku.
- Pro firmu Rockler Woodworking and Hardware, která distribuuje spirálovitě drážkované kolíky ve Spojených státech amerických, navrhujeme optimalizaci kolíku snížením úhlu stoupání frézované drážky.
- Pokud chceme dosáhnout vyšší pevnosti při vytažení předlepených kolíků od firmy KWB tools GmbH, doporučujeme nepostupovat dle přiloženého návodu použití, ale aktivovat nanesené lepidlo vodou z otvoru, který bude do 1/3 vyplněný vodou. Aplikací nedojde ke změknutí a setření lepidla během vkládání, jak tomu bylo při aktivaci máčením. Jen tak se dosáhne jejich maximální pevnosti.

8. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

AHMAD, Said; AMIN, Ashaari Haji; ALI, Roslan; TAHIR, Hilmi Md. Withdrawal and bending strengths of dowels from three malaysian timbers. *Journal of Tropical Forest Science*. 1993, roč. 6, č. 1, s. 74-80.

ALTINOK, Mustafa; DÖNGEL, Nihat; SÖĞÜTLÜ, Cevdet; DORUK, Şemsettin. Determination of Diagonal Compression Performance of the Wooden Joinery Corner Joints with Mortise and Tenon. *Journal of Forestry Faculty*. 2010, roč. 10, č. 2, s. 96-101.

ALTINOK, Mustafa; DORUK, Şemsettin; ARSLAN, ALLI, Riza; GÜRLEYEN, Levent. Determination of the effects of wood types and impregnation process in performance of the window frames corner joints. *Wood research*. 2013, roč. 58, č. 2, s. 275-284.

BOMBA, Jan; ŠEDIVKA, Přemysl; BÖHM, Martin; DEVERA, Michal. Influence of Moisture Content on the Bond Strength and Water Resistance of Bonded Wood Joints. *Bioresources*. 2014, roč. 9, č. 3, s. 5208-5218.

BOMBA, Jan; ŠEDIVKA, Přemysl; HÝSEK, Štěpán; FÁBER, Jiří; OBERHOFNEROVÁ, Eliška. Influence of Glue Line Thickness on the Strength of Joints Bonded with PVAc Adhesives. *Forest Products Journal* [online]. 2018. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.13073/FPJ-D-17-00038>>. ISSN 0015-7473.

BURHANETTIN, Uysal. Withdrawal strength of various laminated veneer dowels. *Wood and Fiber Science*. 2005, roč. 37, č. 2, s. 213-219.

ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha : Český normalizační institut, 2011. 56 s.

ČSN 74 6101. *Dřevěná okna - Základní ustanovení*. Praha : Český normalizační institut, 2015. 24 s.

ČSN 74 6077. *Okna a vnější dveře - Požadavky na zabudování*. Praha : Český normalizační institut, 2018. 36 s.

- ČSN EN 204. *Klasifikace termoplastických lepidel na dřevo pro nekonstrukční aplikace*. Praha : Český normalizační institut, 2017. 12 s.
- ČSN EN 205. *Lepidla na dřevo pro nekonstrukční aplikace - Stanovení pevnosti lepeného spojení ve smyku při tahovém namáhání*. Praha : Český normalizační institut, 2017. 16 s.
- ČSN EN 514. *Profily z neměkčeného polyvinylchloridu (PVC-U) pro výrobu oken a dveří - Stanovení pevnosti svařených rohů a T-spojů*. Praha : Český normalizační institut, 2001. 12 s.
- ČSN EN 1026. *Okna a dveře - Průvzdušnost - Zkušební metoda*. Praha : Český normalizační institut, 2017. 20 s.
- ČSN EN 1027. *Okna a dveře - Vodotěsnost - Zkušební metoda*. Praha : Český normalizační institut, 2017. 20 s.
- ČSN EN 12211. *Okna a dveře - Odolnost proti zatížení větrem - Zkušební metoda*. Praha : Český normalizační institut, 2017. 16 s.
- ČSN EN 14080. *Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo - Požadavky*. Praha : Český normalizační institut, 2013. 88 s.
- ČSN EN 14351-1+A2. *Okna a dveře - Norma výrobku, funkční vlastnosti - Část 1: Okna a vnější dveře bez vlastností požární odolnosti a/nebo kouřotěsnosti*. Praha : Český normalizační institut, 2018. 68 s.
- ČSN EN 14609. *Okna - Stanovení odolnosti proti statickému kroucení*. Praha : Český normalizační institut, 2004. 12 s.
- ČSN EN ISO 717-1. *Akustika - Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách - Část 1: Vzduchová neprůzvučnost*. Praha : Český normalizační institut, 2013. 24 s.
- ČSN EN ISO 10077-1. *Tepelné chování oken, dveří a okenic - Výpočet součinitele prostupu tepla - Část 1: Všeobecně*. Praha : Český normalizační institut, 2018. 56 s.

ČSN EN ISO 10077-2. *Tepelné chování oken, dveří a okenic - Výpočet součinitele prostupu tepla - Část 2: Výpočtová metoda pro rámy*. Praha : Český normalizační institut, 2018. 88 s.

ČSN EN ISO 12567-1. *Tepelné chování oken a dveří - Stanovení součinitele prostupu tepla metodou teplé skříně - Část 1: Celková konstrukce oken a dveří*. Praha : Český normalizační institut, 2011. 52 s.

DALVAND, Mosayeb; EBRAHIMI, Ghanbar; TAJVIDI, Mehdi; LAYEGHI, Mohammad. Bending moment resistance of dowel corner joints in case-type furniture under diagonal compression load. *Journal of Forestry Research* [online]. 2014, roč. 25, č. 4, s. 981-984. DOI: 10.1007/s11676-014-0481-y.

DERIKVAND, Mohammad; EBRAHIMI, Ghanbar. Rotational stiffness of L-shaped dowel. In *XXVIITH International Conference Research for Furniture Industry*. Ankara, 2015. s. 18-27.

DIN 68 121-1. *Holzprofile für Fenster und Fernstertüren*. Berlín : Deutsches Institut für Normung e.V., 1993. 14 s.

DIN 68 364:2003-05. *Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*. Berlín : Deutsches Institut für Normung e.V., 2003. 8 s.

ECKELMAN, Carl Albert. Bending strength and moment-rotation characteristics of two-pin moment resisting dowel joints. *Forest Products Journal*. 1971, roč. 21, č. 3, s. 35-39.

ECKELMAN, Carl Albert. Out-of-plane Strength and stiffness of Dowel joints. *Forest Products Journal*. 1979, roč. 29, č. 8, s. 32-38.

ECKELMAN, Carl Albert; CASSENS, Daniel L. Withdrawal strength of dowels from wood composites. *Forest Products Journal*. 1985, roč. 35, č. 5, s. 55-60.

ECKELMAN, Carl Albert; ERDIL, Yusuf Ziya; ZHANG, Jilei. Withdrawal and Bending Strength of Dowel joints constructed of Plywood and Oriented Strandboard. *Forest Products Journal*. 2002, roč. 52, č. 9, s. 66-74.

ECKELMAN, Carl; HAVIAROVA, Eva. Performance tests of school chairs constructed with round mortise and tenon joints. *Forest products journal* [online]. 2006, roč. 56, č. 9926, s. 51-57. Dostupné z WWW: <<http://www.freepatentsonline.com/article/Forest-Products-Journal/144298804.html>>.

ERDIL, Yusuf Ziya; KASAL, Ali; ECKELMAN, Carl Albert. Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints. *Forest products journal*. 2005, roč. 55, č. 12, s. 209-213.

GOVZE, Anton. *Angular juncture for wooden frame constructions*. Anton GOVZE. Pub. No: WO/2006/043908. Slovinsko. P-200400293. PCT/SI2005/000030.

HAJDAREVIĆ, Seid; MARTINOVIĆ, Sandra. Effect of Tenon Length on Flexibility of Mortise and Tenon Joint. In *24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Sarajevo, 2013 [online]. s. 678–685. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.042>>.

HAJDAREVIĆ, Seid; ŠORN, Štefo. Effect of the Spread Adhesive Thickness and Surface on Strength and Stiffness of Joint. In *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*. Dubai, 2012. Dostupné z WWW: <<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2012/137-TMT12-010.pdf>>. s. 571–574.

HERMAN, Marc; DUTILLEUL, Pierre; AVELLA-SHAW, Tomas. Growth Rate Effects on Temporal Trajectories of Ring Width, Wood Density, and Mean Tracheid Length in Norway Spruce (*Picea Abies* (L.)). *Wood and Fiber Science*. 1998, roč. 30, č. 1, s. 6-17.

HOCHBERG, Anette; HAFKE, Jan-Henrik; RAAB, Joachim. *Open/Close: Windows, Doors, Gates, Loggias, Filters*. Basel: Birkhäuser, 2010. ISBN 978-3-7643-9961-0.

HROVATIN, Jasna; PREKRAT, Silvana; BERGINC, Jordan; ŠERNEK, Milan; ZUPANČIČ, Anton; OBLAK, Leon; MEDVED, Sergej. Strength comparison of joints at window frames. *Drewno: prace naukowe, doniesienia* [online]. 2013, roč. 56, č. 189, s. 127-135. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.030.09.

İMIRZI, Hasan Özgür; SMARDZEWSKI, Jerzy; DÖNGEL, Nihat. Method for substitute modulus determination of furniture frame construction joints. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* [online]. 2015, roč. 39, s. 775-785. ISSN 1300011X. DOI: 10.3906/tar-1406-92.

JIVKOV, Vassil; MARINOVA, Assia; JOHANNES, Alexander. Influence of the temperature on the bending strength and stiffness characteristics of glued corner joints of frame structural elements made from solid beech wood. In *NABYTOK*. Zvolen, 2008, s. 1–10.

JOŠČÁK, Pavol. *Pevnostné navrhovanie nábytku*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 1999. ISBN 978-80-228-1839-1.

JOŠČÁK, Pavol; KOLLÁR, Peter. Strength characteristics of Hoffmann-Schwalbe corner joints of window sash. In *Annals of Warsaw Uni. of Life Sciences*. Warsaw, 2007. s. 291–295.

KASAL, Ali; HAVIAROVA, Eva; EFE, Hasan; ECKELMAN, Carl Albert; ERDIL, Yusuf Ziya. Effect of Adhesive Type and Tenon Size on Bending Moment Capacity and Rigidity of T-Shaped Furniture Joints Constructed of Turkish Beech and Scots Pine. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* [online]. 2013, roč. 45, č. 3, s. 287-293. Dostupné z WWW:

<https://www.researchgate.net/profile/Ali_Kasal/publication/272155292_EFFECT_OF_ADHESIVE_TYPE_AND_TENON_SIZE_ON_BENDING_MOMENT_CAPACITY_AND_RIGIDITY_OF_T-SHAPED_FURNITURE_JOINTS_CONSTRUCTED_OF_TURKISH_BEECH_AND_SCOTS_PINE/links/54dbc3c70cf23fe133ae511b.pdf>.

LANDROCK, Arthur. *Adhesives Technology Handbook*. Pensylvánie: William Andrew, 2008. ISBN 978-0-8155-1533-3.

KYUCHUKOV, Georgi; GRUEVSKI, Georgi; MARINOVA, Assia; KYUCHUKOV, Borislav; JIVKOV, Vassil. Stiffness coefficients under bending test of end corner joints of structural elements. In *Wood is good: EU preaccession challenges of the sector. Proceedings of the 22nd International Scientific Conference*. Zagreb: Faculty of Forestry, University of Zagreb, 2011. s. 89–97.

OUDJENE, Marc; KHELIFA, Mourad. Experimental and numerical analyses of single double shear dowel-type timber joints. In *11th Timber engineering : World conference 2010*. Trentino, 2010. s. [6].

ÖZCAN, Cemal; UYSAL, Burhanettin; SEREF, Kurt; ESEN, Raçit. Effect of dowels and adhesive types on withdrawal strength in particleboard and MDF. *Journal of Adhesion Science & Technology* [online]. 2013, roč. 27, č. 8, s. 843-854. DOI: 10.1080/01694243.2012.727157.

PANTALEO, Antonio; FERRI, Domenico; PELLERANO, Achille. Tests for outdoor window profiles: 90° mortise tenon corner joints strength assessment. *Wood Material Science & Engineering* [online]. 2014, roč. 11, č. 1, s. 25-35. ISSN 1748-0272. DOI: 10.1080/17480272.2014.939712.

PANTALEO, Antonio; FERRI, Domenico; PELLERANO, Achille. Wooden window frames with structural sealants: manufacturing improvements and experimental validation of a finite element model. *Journal of Adhesion Science & Technology* [online]. 2013, roč. 28, č. 2, s. 115-135. DOI: 10.1080/01694243.2013.827093.

PETRTYL, Zdeněk; ŠUBRT, Roman. *Moderní okna*. Praha : GRADA, 2012. ISBN 978-80-247-4286-1.

PODLENA, Milan; BÖHM, Martin; MÚČKA, Martin; BOMBA, Jan. Determination of the Bending Moment of a Dowel and Tenon Joint on Window Profile IV 92 of a Wooden Window. *Bioresources*. 2017, roč. 12, č. 2, s. 4202-4213. DOI: 10.15376/biores.12.2.4202-4213.

PODLENA, Milan; BORŮVKA, Vlastimil. Stiffness Coefficients of Mortise and Tenon Joints used on Wooden Window Profiles. *Bioresources*. 2016, roč. 11, č. 2, s. 4677-4687. DOI: 10.15376/biores.11.2.4677-4687.

PODLENA, Milan; BORŮVKA, Vlastimil; BOMBA, Jan. The Strength Determination of Corner joints used for Wooden Windows. In *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. Warsaw: Warsaw University of Life Sciences, 2015. s. 149–153.

PODLENA, Milan; HÝSEK, Štěpán; PROCHÁZKA, Jiří; BÖHM, Martin; BOMBA, Jan. Axial Loading of Different Single-pin Dowels and Effect on Withdrawal Strength.

Bioresources. 2018, roč. 13, č. 3, s. 5179-5192. DOI: 10.15376/biores.13.3.5179-5192.

PREKRAT, Silvana; ŠPANIĆ, Nikola. Scientific Methods for Determination of Wooden Corner Joint Designs. *Drvna Industrija*. 2009, roč. 60, č. 4, s. 245-251.

RATNASINGAM, Jegatheswaran; IORAS, Florin. Effect of adhesive type and glue-line thickness on the fatigue strength of mortise and tenon furniture joints. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2013, roč. 71, s. 819-821. DOI: 10.1007/s00107-013-0724-1.

RATNASINGAM, Jegatheswaran; IORAS, Florin. The fatigue characteristics of two-pin moment-resisting dowel furniture joints with different assembly time and glue-line thickness. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2015, roč. 73, s. 279-281. DOI: 10.1007/s00107-015-0886-0.

SEREF, Kurt; BURHANETTIN, Uysal; CEMAL, Özcan; MEHMET, Nuri Yildirim. The Effects of Edge banding Thickness of Uludag bonded with some Adhesives on Withdrawal Strengths of Beech Dowel pins in Composite Materials. *Bioresources*. 2009, roč. 4, č. 4, s. 1682-1693.

SMARDZEWSKI, Jerzy. Effect of wood species and glue type on contact stresses in a mortise and tenon joint. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* [online]. 2008 s. 2293–2299. DOI:10.1243/09544062JMES1084.

ŠIMEK, Milan; HAVIAROVÁ, Eva; ECKELMAN, Carl. The end distance effect of knock-down furniture fasteners on bending moment resistance of corner joints. *Wood and Fiber Science*. 2010, roč. 42, č. 1, s. 92-98.

TANKUT, Ali Naci. Optimum dowel spacing for corner joints in 32-mm cabinet construction. *Forest products journal*. 2005, roč. 55, č. 12, s. 100-104.

TANKUT, Ali Naci; TANKUT, Nurgül. The effects of joint forms (shape) and dimensions on the strengths of mortise and tenon joints. *Turkish journal of agriculture and Forestry* [online]. 2005, roč. 29, s. 493-498. Dostupné z WWW: <<http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/issues/tar-05-29-6/tar-29-6-8-0412-16.pdf>>.

TANKUT, Nurgul. The effect of glue and glueline thickness on the strength of mortise and tenon joints. *Wood research*. 2007, roč. 52, č. 4, s. 69-78.

TANKUT, Nurgul; TANKUT, Ali Naci; ZOR, Mustafa. Finite Element Analysis of Wood Materials. *Drvna Industrija* [online]. 2014, roč. 65, č. 2, s. 159-171. DOI: 10.5552/drind.2014.1254.

TAŞ, Hasan Hueseyin; ALTINOK, Mustafa; ÇIMEN, Mesut. The strength properties changing according to type corner joints and adhesive of the wood-based furnitures under the effect of dynamic forces. *Wood research*. 2014, roč. 59, č. 2, s. 359-372.

UYŞAL, Burhanettin; ÖZÇİFÇİ, Ayhan. Effects of Dowels Produced from Various Materials on Withdrawal Strength in MDF and Pb. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2003, roč. 88, s. 531-535. DOI: 10.1002/app.11700.

WARMBIER, Krzysztof; WILCZYŃSKI, Arnold. Strength and stiffness of dowel corner joints: effect of joints dimensions. *Folia Forestalia Polonica*. 2000, roč. 31, série B, s. 29-41.

WILCZYŃSKI, Arnold; WARMBIER, Krzysztof. Effect of joint dimensions on strength and stiffness of tenon joints. *Folia Forestalia Polonica*. 2003, roč. 34, č. série B, s. 53-66.

YAPICI, Fatih; LIKOS, Erkan; ESEN, Raşit. The effect of edge banding thickness of some trees on withdrawal strength of beech dowel pins in composite material. *Wood research*. 2011, roč. 56, č. 4, s. 601-612.

ZHANG, Ji-Lei; ECKELMAN, Carl Albert. The bending moment resistance of single-dowel corner joints in case construction. *Forest Products Journal*. 1993, roč. 43, č. 6, s. 19-24.

9. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Shrnutí zkoumaných parametrů a výsledků rohových spojů dřevěných oken (Podlena et al. 2017): 1. Hrovatin et al. 2013; 2. Joščák a Kollár 2007; 3. Podlena a Borůvka 2016; 4. Altinok et al. 2013; 5. Altinok et al. 2010; 6. Pantaleo et al. 2014	48
Příloha 2: Podklady k výrobě universálního přípravku k upnutí rohových spojů s 3D vizualizací návrhu a technickým výkresem s rozměry	49
Příloha 3: Varianty rohových spojů dřevěných okenních křídel	50
Příloha 4: Příklad objednávkového formuláře na výrobu rohových spojů určených k testování	51
Příloha 5: Příprava zkušebních těles rohových spojů – vrtání otvorů pro čepy na stojanové vrtačce (foto autor)	52
Příloha 6: Příprava zkušebních těles rohových spojů - klimatizace předvrtaných vzorků před testováním (foto autor)	52
Příloha 7: Upnutí rohových spojů s kolíky (IV 92) do upínacího přípravku v universálním trhacím stroji (foto autor).....	53
Příloha 8: Varianty testovaných kolíků a vzorek zkušebního tělesa určené k testování pevnosti kolíku při vytažení (foto autor)	54
Příloha 9: Upnutí zkušebního tělesa s testovaným kolíkem do čelistí v universálním trhacím stroji (foto autor).....	55
Příloha 10: Výsledky testování rohových spojů v úhlové rovině tlaku rozdělené podle typu spoje (profilu)	56
Příloha 11: Výsledky testování rohových spojů v úhlové rovině tahu rozdělené podle typu spoje (profilu)	57
Příloha 12: Technický list k PVAc lepidlu GXL 4 (Rakoll)	58
Příloha 13: Technický list k PVAc lepidlu 1K Holzkaltleim D4 (Würth)	60
Příloha 14: Technický list k PVAc lepidlu D4-Leim 1K (GreenteQ).....	63
Příloha 15: Technický list k PUR lepidlu Lear D4 (LEAR)	65

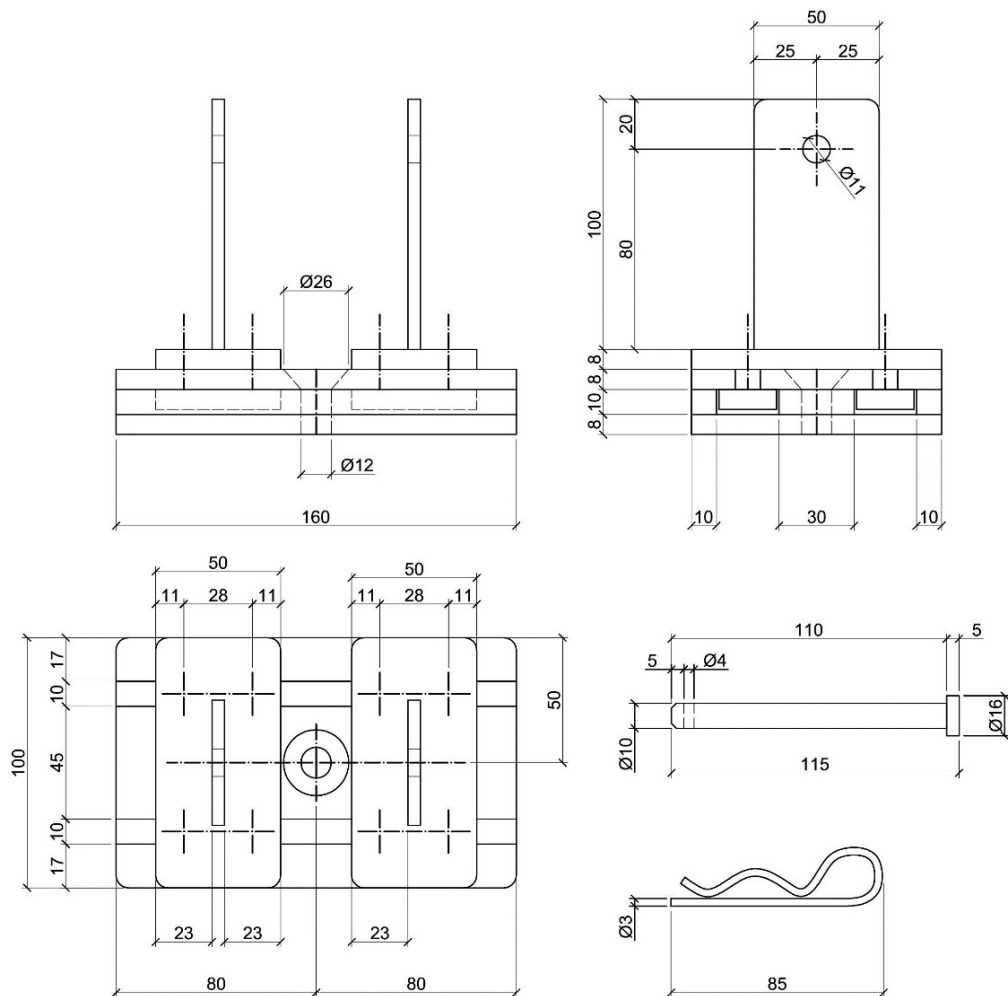
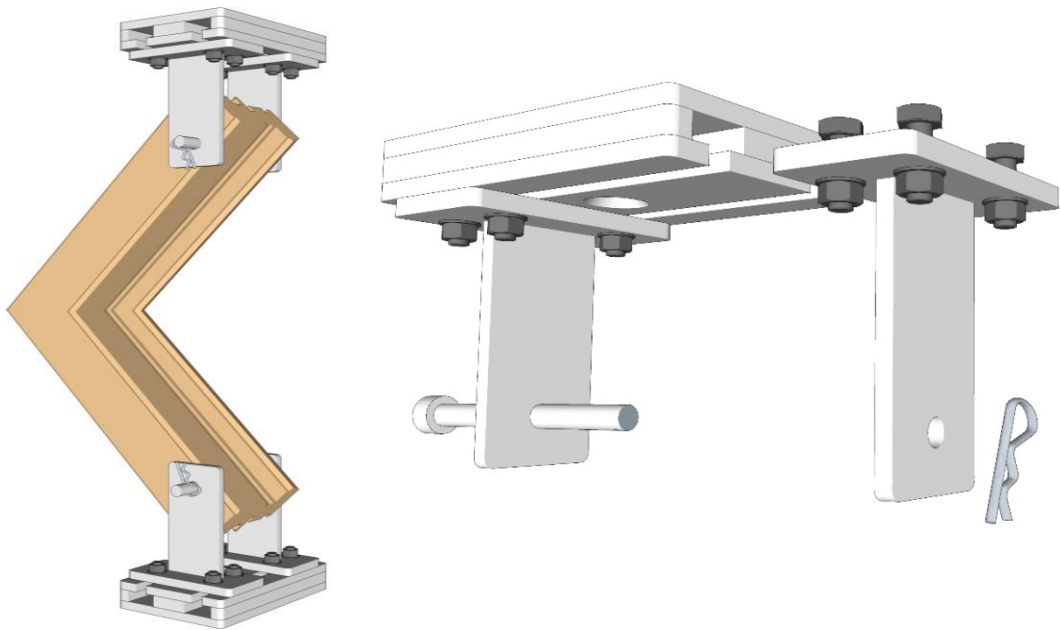
10. PŘÍLOHY

Příloha 1: Shrnutí zkoumaných parametrů a výsledků rohových spojů dřevěných oken (Podlena et al. 2017): 1. Hrovatin et al. 2013; 2. Joščák a Kollár 2007; 3. Podlena a Borůvka 2016; 4. Altinok et al. 2013; 5. Altinok et al. 2010; 6. Pantaleo et al. 2014

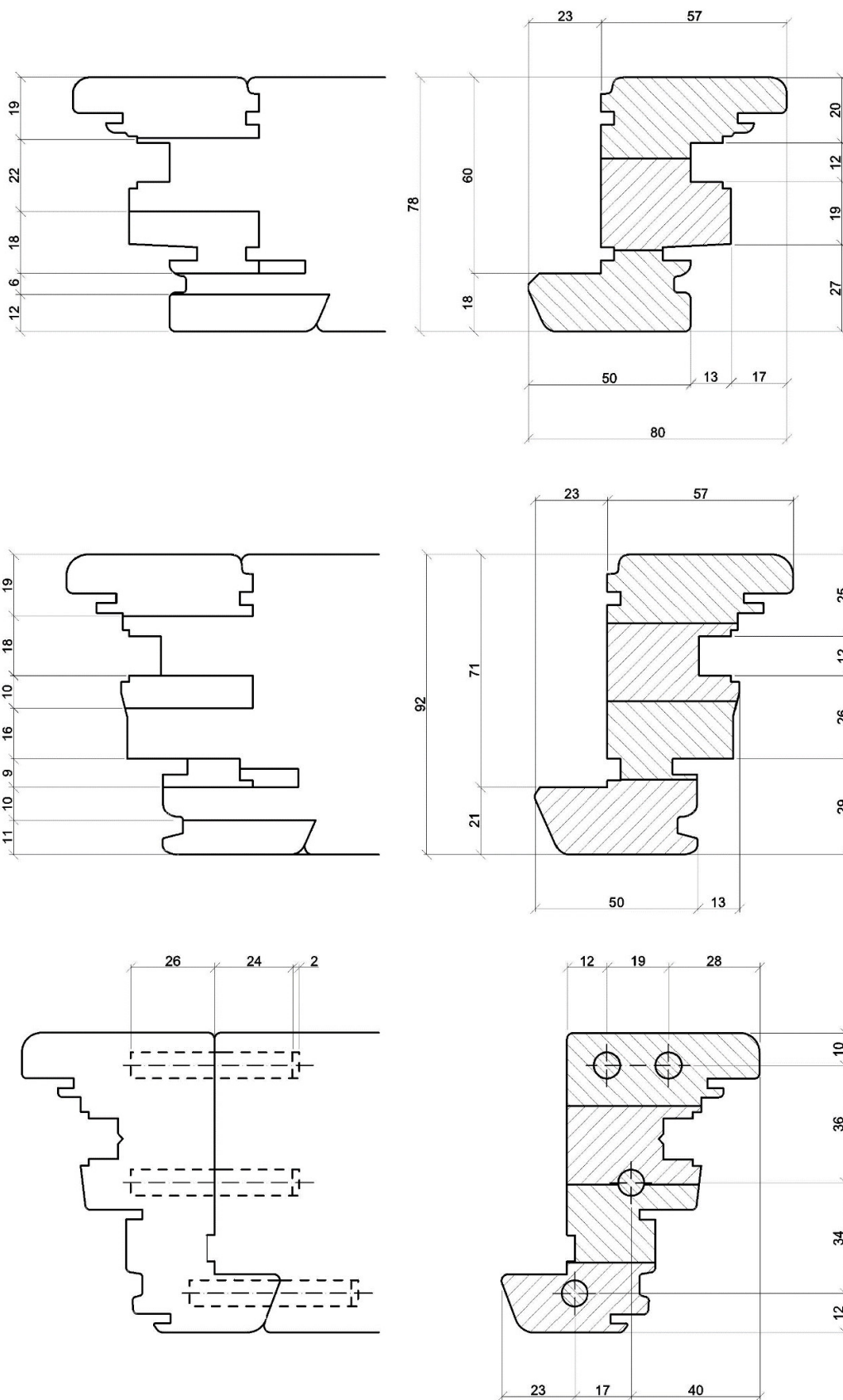
	Typ rohového spoje	Typ lepidla	Dřevina	Velikost profilu (mm)	Max, síla (N)	Změna vnitřního úhlu (°)	Ohybový moment (Nm)	Tuhost (Nm/rad)
Tah	Dvojitý čep a rozpor ¹	PVAc, Mekol 1141	Borovice	68	832,5	•	•	•
		PVAc, Duplit AL-NBU	Borovice	68	1030	•	•	•
	Dvojitý čep a rozpor ²	•	Smrk	68	•	0,68	369,6	9369
	Dvojitý čep a rozpor ³	•	Smrk	78	•	•	•	4130
	Trojité čep a rozpor ³	•	Smrk	92	•	•	•	7882
	Dřevěný kroužek ¹	PVAc, Mekol 1141	Borovice	68	1170	•	•	•
		PVAc, Duplit AL-NBU	Borovice	68	1115	•	•	•
	Kolíky ¹	PVAc, Mekol 1141	Borovice	68	530	•	•	•
	Hofmannova spojka ²	•	Smrk	68	•	0,65	310,2	8278
Tlak	Dvojitý čep a rozpor ⁴	(PVAc, two-component D4 + 5% Turbo hardener 303-5)	Akát	55	9251,8	•	•	•
			Dub (zimní)	55	9037	•	•	•
			Borovice	55	5432,9	•	•	•
	Dvojitý čep a rozpor ⁵	PVAc, Kleiberit 303	Borovice	60	2080	•	•	•
			Jedle		1781	•	•	•
	Dvojitý čep a rozpor ²	•	Smrk	68	•	3,51	184,6	4149
	Dvojitý čep a rozpor ³	•	Smrk	78	•	•	•	4485
	Trojité čep a rozpor ³	•	Smrk	92	•	•	•	6658
	Hofmannova spojka ²	•	Smrk	68	•	3,40	245,9	5232
	Dvojitý čep a rozpor ⁶	PVAc, Protovil D4	Dub (červený)	68	1342,9	•	264,7	•

Pozn.: • – neuvedeno

Příloha 2: Podklady k výrobě univerzálního přípravku k upnutí rohových spojů s 3D vizualizací návrhu a technickým výkresem s rozměry



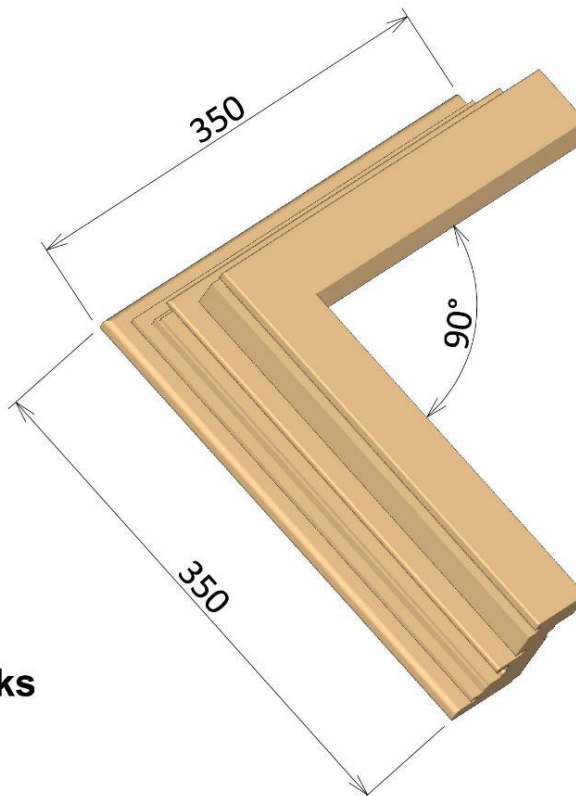
Příloha 3: Varianty rohových spojů dřevěných okenních křídel



Příloha 4: Příklad objednávkového formuláře na výrobu rohových spojů určených k testování

ZKUŠEBNÍ VZORKY:

- pro zkoušky v tahu a tlaku v úhlové rovině okenního křídla



- počet vzorků: 30 ks


- profil: IV 92

- rohové spojení: kolíky

Poznámka:

- pouze okenní křídlo
- rohové spojení slepené PVAC lepidlem
- bez zasklení
- bez broušení
- bez povrchové úpravy
- bez kování

Kontakt:
Ing. Milan Podlena
Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí,
Česká zemědělská univerzita v Praze
e-mail: podlena@fd.czu.cz

	ČZU - FLD - Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí
	Disertační práce
název: Zkušební vzorky (SLAVONA)	
jméno: Ing. Podlena	termín dodání: leden/únor 2015

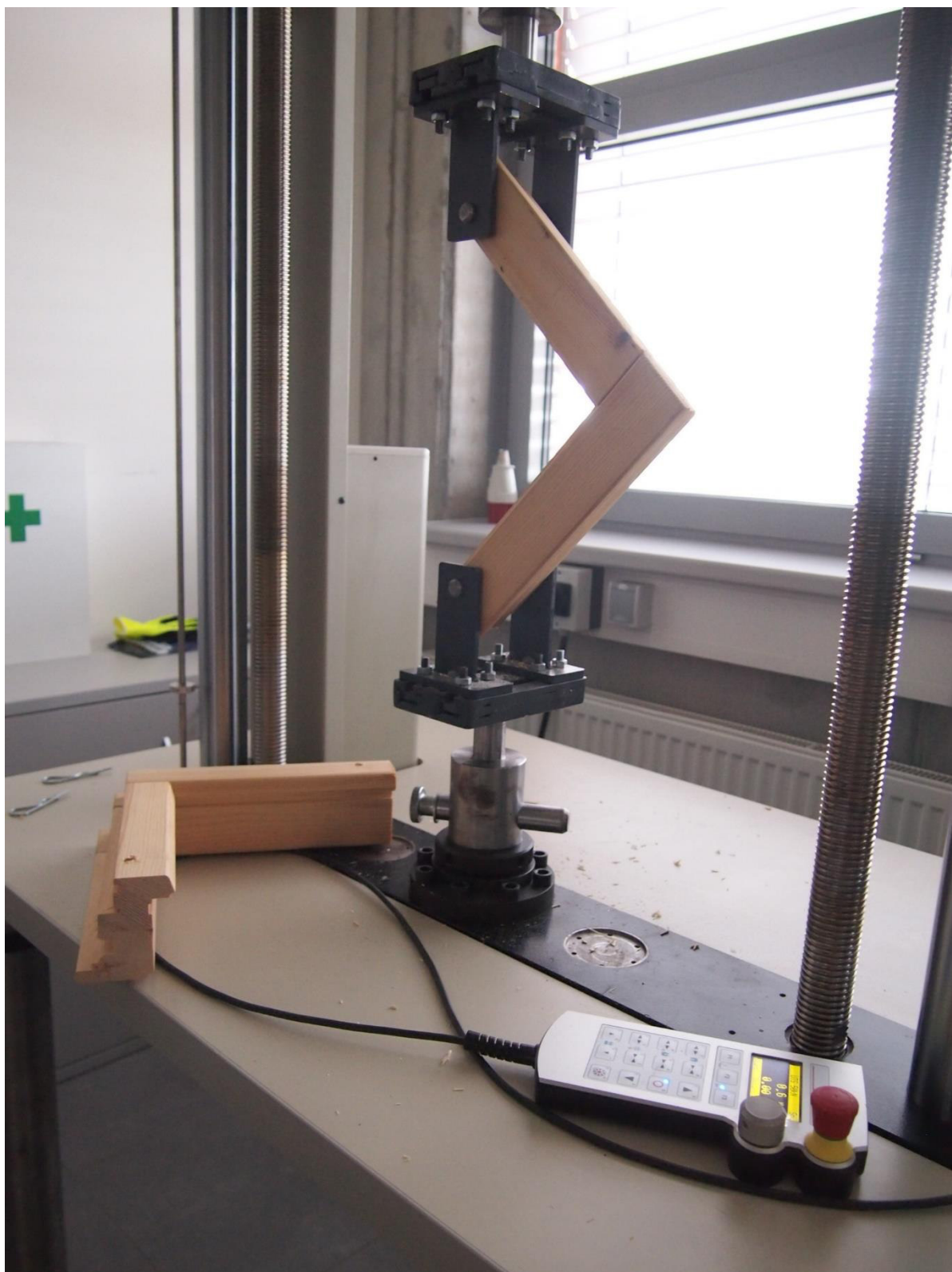
Příloha 5: Příprava zkušebních těles rohových spojů – vrtání otvorů pro čepy na stojanové vrtačce (foto autor)



Příloha 6: Příprava zkušebních těles rohových spojů - klimatizace předvrtaných vzorků před testováním (foto autor)



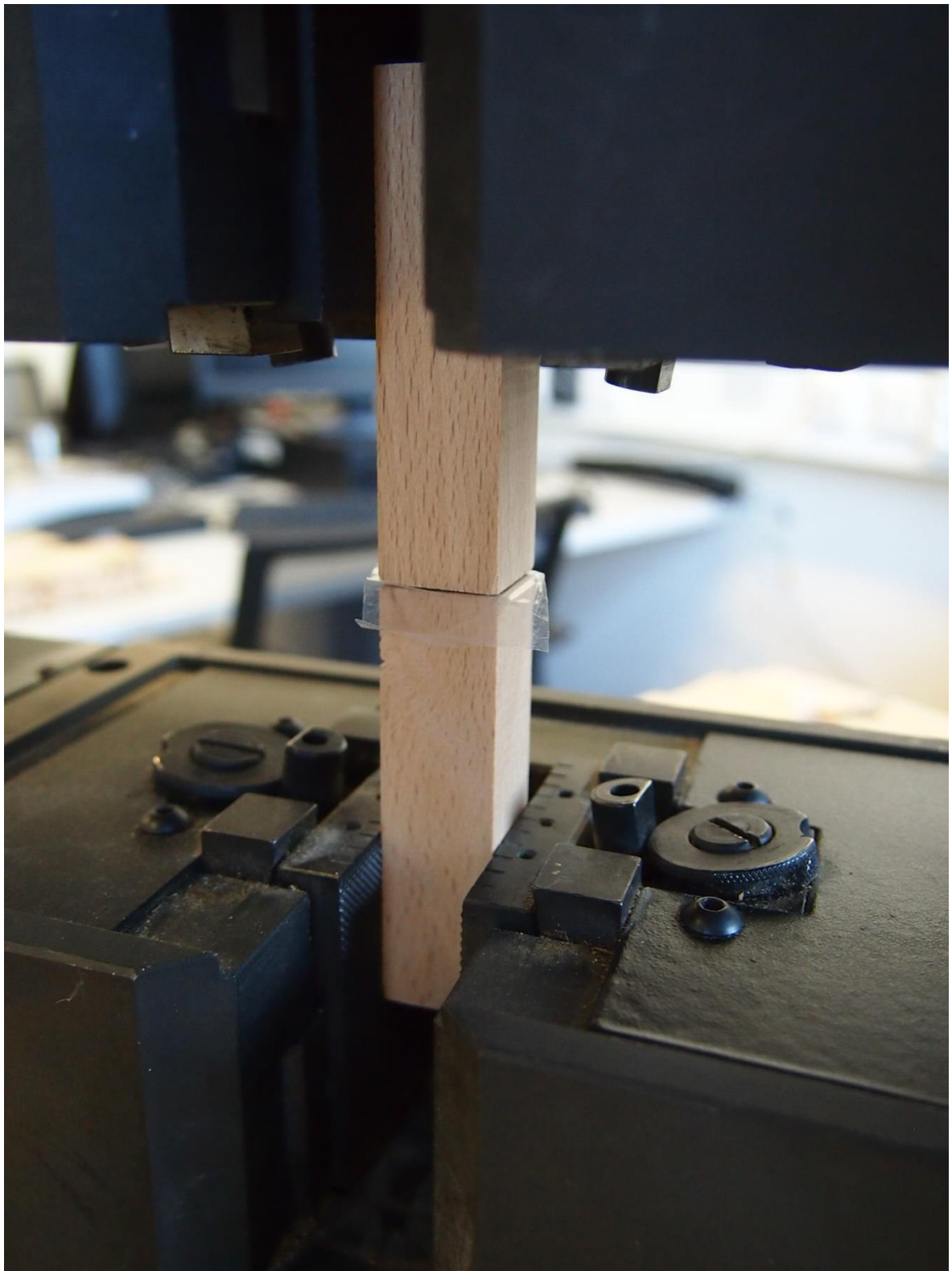
Příloha 7: Upnutí rohových spojů s kolíky (IV 92) do upínacího přípravku v universálním trhacím stroji (foto autor)



Příloha 8: Varianty testovaných kolíků a vzorek zkušebního tělesa určené k testování pevnosti kolíku při vytažení (foto autor)



Příloha 9: Upnutí zkušebního tělesa s testovaným kolíkem do čelistí v universálním trhacím stroji (foto autor)



Příloha 10: Výsledky testování rohových spojů v úhlové rovině tlaku rozdělené podle typu spoje (profilu)

Typ spoje (profil)	Dvojitý čep a rozpor (IV 78)								
Charakteristika	$\gamma_{10\%}$ (°)	$\gamma_{40\%}$ (°)	γ_{\max} (°)	$M_{10\%}$ (Nm)	$M_{40\%}$ (Nm)	M_{\max} (Nm)	$C_{10\%}$ (Nm)	$C_{40\%}$ (Nm)	C_{\max} (Nm)
Aritmetický průměr	0,4	0,9	2,0	16	64	161	3030	4269	4485
Medián	0,4	1,0	2,0	17	66	166	2147	3935	4680
Směrodatná odchylka	0,2	0,3	0,5	4	15	37	2445	1092	1090
Minimum	0,1	0,4	1,1	9	35	88	1129	2348	2303
Maximum	0,8	1,3	3,6	23	92	231	10613	6314	6105
Variační koeficient	51 %	29 %	24 %	23 %	23 %	23 %	81 %	26 %	24 %
Počet zkušebních těles	26								

Typ spoje (profil)	Trojitý čep a rozpor (IV 92)								
Charakteristika	$\gamma_{10\%}$ (°)	$\gamma_{40\%}$ (°)	γ_{\max} (°)	$M_{10\%}$ (Nm)	$M_{40\%}$ (Nm)	M_{\max} (Nm)	$C_{10\%}$ (Nm)	$C_{40\%}$ (Nm)	C_{\max} (Nm)
Aritmetický průměr	0,6	1,2	2,8	32	128	325	3469	6284	6658
Medián	0,6	1,2	2,8	34	134	335	3063	6443	6797
Směrodatná odchylka	0,2	0,3	0,4	6	22	44	1686	1636	1124
Minimum	0,2	0,7	1,9	16	64	210	1492	3159	3290
Maximum	1,1	1,7	3,3	40	161	401	7343	8860	8276
Variační koeficient	39 %	22 %	13 %	17 %	17 %	13 %	49 %	26 %	17 %
Počet zkušebních těles	25								

Typ spoje (profil)	Kolíky (IV 92)								
Charakteristika	$\gamma_{10\%}$ (°)	$\gamma_{40\%}$ (°)	γ_{\max} (°)	$M_{10\%}$ (Nm)	$M_{40\%}$ (Nm)	M_{\max} (Nm)	$C_{10\%}$ (Nm)	$C_{40\%}$ (Nm)	C_{\max} (Nm)
Aritmetický průměr	0,3	0,7	3,7	17	67	168	3718	5541	2722
Medián	0,3	0,7	3,8	17	66	166	3425	5444	2821
Směrodatná odchylka	0,2	0,2	0,8	2	7	18	1779	1547	578
Minimum	0,1	0,4	2,1	14	57	141	1483	3591	1443
Maximum	0,6	1,1	5,8	20	79	197	7046	8056	3926
Variační koeficient (%)	47 %	27 %	22 %	11 %	11 %	11 %	48 %	28 %	21 %
Počet zkušebních těles	16								

Příloha 11: Výsledky testování rohových spojů v úhlové rovině tahu rozdělené podle typu spoje (profilu)

Typ spoje (profil)	Dvojitý čep a rozpor (IV 78)								
Charakteristika	$\gamma_{10\%}$ (°)	$\gamma_{40\%}$ (°)	γ_{\max} (°)	$M_{10\%}$ (Nm)	$M_{40\%}$ (Nm)	M_{\max} (Nm)	$C_{10\%}$ (Nm)	$C_{40\%}$ (Nm)	C_{\max} (Nm)
Aritmetický průměr	0,5	1,0	2,5	19	76	190	3004	4293	4130
Medián	0,5	1,0	2,5	19	75	188	2381	4089	3916
Směrodatná odchylka	0,2	0,2	0,4	4	15	37	2497	1078	989
Minimum	0,1	0,6	1,5	12	46	115	1319	3034	2421
Maximum	0,9	1,4	3,7	28	110	276	13466	7390	6501
Variační koeficient	44 %	22 %	17 %	19 %	20 %	20 %	83 %	25 %	24 %
Počet zkušebních těles	26								

Typ spoje (profil)	Trojitý čep a rozpor (IV 92)								
Charakteristika	$\gamma_{10\%}$ (°)	$\gamma_{40\%}$ (°)	γ_{\max} (°)	$M_{10\%}$ (Nm)	$M_{40\%}$ (Nm)	M_{\max} (Nm)	$C_{10\%}$ (Nm)	$C_{40\%}$ (Nm)	C_{\max} (Nm)
Aritmetický průměr	0,4	1,0	2,5	34	138	344	5810	8097	7882
Medián	0,4	1,0	2,6	34	135	338	5745	8157	7970
Směrodatná odchylka	0,2	0,2	0,5	5	20	49	1988	1299	1055
Minimum	0,2	0,7	1,6	26	102	254	1922	4492	5686
Maximum	0,9	1,6	3,5	45	181	452	11117	9935	7970
Variační koeficient	42 %	20 %	18 %	14 %	14 %	14 %	34 %	16 %	13 %
Počet zkušebních těles	26								

Typ spoje (profil)	Kolíky (IV 92)								
Charakteristika	$\gamma_{10\%}$ (°)	$\gamma_{40\%}$ (°)	γ_{\max} (°)	$M_{10\%}$ (Nm)	$M_{40\%}$ (Nm)	M_{\max} (Nm)	$C_{10\%}$ (Nm)	$C_{40\%}$ (Nm)	C_{\max} (Nm)
Aritmetický průměr	0,4	0,9	4,0	17	67	167	3633	4666	2512
Medián	0,3	0,8	3,9	17	68	170	3202	4626	2594
Směrodatná odchylka	0,2	0,4	1,2	2	7	17	2608	1583	569
Minimum	0,1	0,4	2,6	13	52	129	1215	2793	1355
Maximum	0,9	1,5	7,4	19	75	188	10836	7821	3344
Variační koeficient	61 %	38 %	30 %	10 %	10 %	10 %	72 %	34 %	23 %
Počet zkušebních těles	16								

RAKOLL®

Holzklebstoffe

Technický list

GXL 4 jednosložkové D – 4 lepidlo

Vlastnosti

RAKOLL® GXL 4 je PVAc lepidlo s vynikající vodo - odolností.

Zatřídění dle DIN EN 204 – D 4

Zatřídění dle WATT 91 > 7 N/mm²

Výhody

- jednosložkový
- rychle vytvrzující
- krátký lisovací čas
- dobré spojení u těžko lepitelných dřevin
- žádné zabarvení lepené spáry při lepení ve vysokofrekvenčním nebo teplém lise
- zlepšení tepelné odolnosti a vodoodolnosti při lisování za vyšší teploty (např. 70 °C)

Pokyny pro zpracování

Otevřená doba a doba vytvrzování je silně závislá na pracovních podmínkách jako je teplota, vlhkost, pnutí v materiálu, jeho vlastnosti a množství nánosu.

Dobrych výsledků je dosaženo za následujících předpokladů :

Teplota místnosti, materiálu a lepidla	18 ... 20 °C
Vlhkost dřeva	8 ... 10 %
Množství nánosu při montážním lep.	150... 180 g/m ²
Otevřený čas	8 ... 9 min.
Bílý bod	cca 8 °C
Lisovací tlak u dilů bez pnutí	0,1 ... 0,5 N/mm ²

Minimální lisovací čas :

montážní lepení	8 ... 15 min
taktový lis při 70°C	> 1 min
lepení spárovky a bloků	20 ... 40 min
lepení okenních hranolů (dle druhu dřeviny)	od 15 min

Lepení okenních profilů : v návaznosti na předpis (směrnici) i.f.t. Rosenheim – „vlhkost dřeva při lepení okenních profilů se musí pohybovat v rozmezí 13±2 %“

Teplota místnosti a dřeva musí mít min. + 15 °C.

Příprava dřeva

Díly musí být čisté, bez prachu a mastnoty. Nepřesnosti (tolerance) v sestavení dilů prodlužuje lisovací čas a snižuje pevnost.

Při lepení okenních lamel by měly být dřevěné díly hoblovány krátce před lepením.

Nános lepidla

RAKOLL® GXL 4 nanášíme jednostranně – při vysokých požadavcích na vodoodolnost oboustranně nanášecím zařízením, válečkem, špachtli, štětcem popř. jiným nástrojem v tenké pravidelné vrstvě.

Lisování

Lepené díly spojíme v průběhu otevřeného času a lisujeme tak dlouho, dokud není dosaženo dostatečné počáteční pevnosti.

Mechanické pevnosti, nutné k dalšímu opracování lepených dilů, je dosaženo v závislosti na druhu použitého materiálu v krátké době. Vyšší vodoodolnost lepených dilů se vytváří déle. Z tohoto důvodu se zkoušky na vodoodolnost provádějí nejdříve po 7 dnech po slepení.

Barvení dřeva

S ohledem na rozdílné složení jednotlivých látek ve dřevě, mimo jiné závislé na oblasti růstu a přípravě dřeva, může dojít v jednotlivých případech k zabarvení spoje, např. u buku, třešni ad..

Kov ve spojení s kyselinami ve dřevě může způsobit barevné změny, zvláště u dubu.

Doporučujeme provést vlastní zkoušky.

Čištění

Pracovní nástroje před zaschnutím lepidla vodou

Chemicko-technické údaje RAKOLL® GXL4

Base:	PVAc – disperze
Barva:	bílá
Viskozita:	5.500 mPas Brookf. HB, kužel 2,2 Upm při 20 °C
Hodnota pH:	cca 3,5

Z důvodu nízké hodnoty pH vyvstává u tlakových nádob, rozvodů lepidla a nanášecích přístrojů z kovu, galvanizované oceli, hliníku a neželezných kovů vysoké riziko koroze. Z těchto důvodů doporučujeme používat zařízení a nástroje z V4A nebo umělých hmot (tvrzené PVC, PE popř. PP).

Označení

RAKOLL®-GXL 4 nepodléhá povinnosti označovat dle platných předpisů pro nebezpečné látky.

Bezpečnostní doporučení

Prosíme dbejte pokynů uvedených v našem Bezpečnostním listu.

Skladování

V dobře uzavřených originálních baleních při teplotě max. od 15°C do 22°C min. 9 měsíců. Skladováním při vyšší teplotě se zkracuje skladovací čas až na 3 měsíce.

Technický stav : srpen 2005

Od tohoto data jsou odlišné údaje uvedené v dříve vydaných technických listech neplatná.



H.B. Fuller



TECHNICAL DATA SHEET

0892100221/ 0892100222/ 0892100224/ 0892100225

1-Component Cold Wood Glue D4

One-component dispersion adhesive in D4 durability class (tested according to DIN EN 204).

Fields of application:

Ideal for assembly work, woodworking and joinery. Can be used on soft wood, hard wood and exotic woods.

For indoor applications with increased water resistance requirements; Indoors with frequent water contact and long-term exposure to water. For outdoor use with suitable surface protection.

Examples: bathroom furnishing, gluing of interior doors, indoor staircases, window joints, laboratory installations.

Also suitable for gluing of lamellated profiles that are connected lengthwise by dovetail joints.

Properties:

- Ready-to-use 1-component D4 glue
- Unlimited pot life
- No more errors in mixing
- High water resistance (D4 quality according to DIN EN 204)
- Watt 91
- Tested by IFT Rosenheim
- Transparent hardening
- Good adhesion

Application:

Apply thin, even layer on one side with application machine, adhesive roller, notched trowel, brushes or similar devices.

Avoid contact with metals as this may result in discoloration.

Processing temperature should be between 18 °C and 20 °C. Fresh splashes of glue can be removed with water. Soak dried glue residue in water and detergent and remove mechanically.

Version: 001, Date: 03/11/2014

TECHNICAL DATA SHEET

When joining surfaces or blocks At 20 °C	From 20 min.
For veneering At 20 °C At 50 °C At 80 °C	20 - 30 min. 8 - 10 min. 2 - 8 min.

Remarks:

Differences in the composition of wood elements may lead, in individual cases, to unpredictable discolorations of wood, e.g. with beech or cherry wood. Iron in conjunction with the tannic acid of wood can also cause discolorations with oak.

Processing and setting time are highly dependent on the working conditions (e.g. temperature).

In case of outdoor use, the part to be glued must be protected against weathering and treated with an appropriate surface protection (constant protection from moisture). Make sure that the glue is not exposed to direct sunlight when used outdoors (due to its thermoplastic properties). Non-thermoplastic adhesives such as PUR Glue in a dosing system (0892100180) are better suited for applications in direct sunlight. Softening glue and retreating wood can lead to open joints. The viscosity of one-component D4 glues increases over the course of storage. Application parameters, however, are not affected. Stirring the glue without adding water makes it free-flowing again. **Do not add water to the glue!**

Remove excessive glue since glue residues might react with oxygen and lead to red coloring.

<p>This advice is based on our own research and experience. It is presented in good faith and may be considered reliable. However, due to the diverse processing, application and handling possibilities the information provided may not be considered legally binding. The same applies to the information provided by our technical and commercial customer service.</p>	<p>We recommend the users of our products to perform their own tests in order to determine whether our products are appropriate for the respective use and environment. We guarantee the consistent quality of our products. We reserve the right to implement technical changes and improvements.</p>
---	--

Version: 001, Date: 03/11/2014

TECHNICAL DATA SHEET

Technical data:

Basis	Polyvinyl acetate dispersion (PVAC)
Color	White (colorless when hardened)
pH value	Approx. 3
Viscosity	Approx. 7,000 mPa.s (Brookfield)
Density	1.10 g/cm ³
Solid particle contents	Approx. 50 %
Minimum film-formation temperature (White point)	Approx. +7 °C
Temperature-resistance after hardening (material-dependent)	≥7 N/mm ² at 80 °C In accordance with EN 14257 (WATT91)
Shelf life (Store in a cool and dry place)	9 months
Storage conditions	Store original container thoroughly closed in a dry place at temperatures between +15°C and +25°C without exposure to direct sunlight.
Pot life	9 months when stored in cool place
Ideal processing conditions	
Ideal room, material and glue temperature	18 - 20°C
Wood humidity	8 - 10 % / outdoors: 13%+/-2%
Relative humidity	60 - 70 %
Glue application quantity: When joining surfaces For assembly work	Approx. 100 - 160 g/m ² Approx. 120 - 180 g/m ²
Processing time at 150 g/m ² /+20 °C	Approx. 8 - 25 min.
Pressing pressure, depending on type of application	0.1 - 0.8 N/mm ²
Minimum pressing times*	
For assembly work At 20 °C	20 - 25 min.

Version: 001, Date: 03/11/2014

Příloha 14: Technický list k PVAc lepidlu D4-Leim 1K (GreenteQ)

Q D4-Glue 1C

greenteQ D4-Glue 1C is a PVAc glue with excellent water resistance.

Properties:

greenteQ D4-Glue 1C bonds very quickly, allowing the shortest clamping times when heat is applied.
The hardened glue joints exhibit excellent resistance to higher temperatures.
Machining the glue joints causes very little wear on the tools.

Stress group DIN EN 204 - D4 as well as WATT 91 > 7.29 N/mm²

greenteQ D4-Glue 1C can be used for various applications, such as:

- Single-component
- Excellent bonding properties with various types of wood
- No discolouration of joints due to the influence of temperature with high-frequency or hot presses
- Improved heat and water resistance through clamping at higher temperatures (e.g. +70°C)

Product picture:



Application:

Preparing the wood:

The parts should mate well and be free of dust and grease. Excess tolerances to the fit result in increased setting times and reduced strength.
The joints should be cut shortly before gluing.

Application:

Apply greenteQ D4-Glue 1C as a thin, even coat on a single surface. If required for higher water resistance, apply a thin and even coat on both surfaces using an applicator, glue roller, notched trowel, brush or other device.

Clamping:

Place the two parts together within the open time and clamp until the required initial strength is achieved and the clamps can be removed.
The clamping pressure should be high enough that the entire connecting area of the joint is in firm contact. Depending on the material and type of glue joint, the mechanical strength required for further processing of the parts is achieved

within a short period of time. The higher water resistance of the glue joint forms more slowly. It should be tested no earlier than seven days after gluing.

Pot life:

Approx. 24 hours at normal temperature. Temperatures above +20°C reduce the pot life.

Wood discolouration:

Due to the various mixtures of wood components, which are dependent on the growing region and the manner in which the woods has been pre-treated, unpredictable discolouration may arise in some cases on various types of wood, such as beech, cherry, etc. In addition, iron in combination with the tannic acid of the wood can bring about a discolouration of the wood, especially with oak.
We recommend you test this for yourself.

Cleaning:

Clean the working equipment with water before the glue dries.

Safety instructions:

greenteQ D4-Glue 1C is not subject to labelling requirements according to currently applicable hazardous materials regulations.

Special notes:

Storage tanks, lines and applicators made of steel, galvanised steel, aluminium or other non-ferrous metals are not recommended, as the weakly acidic composition of the dispersion may cause corrosion. For this reason, we

recommend using storage tanks, lines and applicators made of stainless steel or plastic (hard PVC, polyethylene, polyester resin).

PRODUCT DATA SHEET

GLUES - D4-Glue 1C

The instructions for use, performance and product details as well as other technical information for our greenteQ products are general guidelines. These serve only to describe the properties and performance features of our products and do not constitute a warranty as per Section 443 of the BGB (German Civil Code). Due to the variety of possible applications, it is incumbent upon the user to test whether or not it is suitable for the desired application. Technical application advice provided by us verbally, in writing or through tests is for your information only and is absolutely non-binding.

greenteQ

Edition 09/2011 | www.vbh.de

greenteQ D4-Glue 1C

greenteQ D4-Glue 1C is a PVAc glue with excellent water resistance.

Technical data:

(determined at +20°C, 50% relative humidity, corresponding to VBH test methods)

Basis	PVAc dispersion
Colour	White
Viscosity (Brookfield viscosity meter, spindle 3, 20 rpm, +20°C, measured on the day of preparation)	Approx. 5000 - 6000 mPa.s
Chalk point	Approx. +8°C
pH value	Approx. 4 - 5

The open time and the setting time are influenced strongly by the working conditions, e.g. temperature, moisture content and absorbency of the materials, the application volume and stresses in the material. Good results are achieved under the following conditions:

Room, material and glue temperature	18 - 20°C
Moisture content of wood	8 - 10%
Application rate of glue for assembly gluing	150 - 190 g/m ²
Open time at 150 g/m ²	Up to 8 minutes
Clamping pressure, depending on gluing type	0.1/0.5 N/mm ²
Minimum clamping times:	
Assembly gluing	Approx. 12 minutes
With short-contact clamping (+70°C)	60 seconds or more
Bonding board joints and blocks	Approx. 30 minutes
Window scantlings (depending on the type of wood)	18 minutes or more

Lamination of wooden window profiles:

According to the quality guideline of ift Rosenheim "Laminated profiles for wooden windows", the moisture content of the wood must be 13±2%.
The room and wood temperature must be at least +15°C.

Storage and form of delivery:

Store greenteQ D4-Glue 1C in tightly sealed original containers in a frost-free environment. After longer periods of storage, the glue may thicken somewhat. In this case, the glue should be stirred thoroughly before use.
The shelf life is at least 9 months.

Form of delivery:
1,100 kg container
30 kg hobbock
11 kg pail

General information:

Any previous versions of this data sheet are no longer valid.

greenteQ

GLUES - D4-Glue 1C | Edition 09/2011 | www.vbh.de

The instructions for use, performance and product details as well as other technical information for our greenteQ products are general guidelines. These serve only to describe the properties and performance features of our products and do not constitute a warranty as per Section 44:3 of the BGB (German Civil Code). Due to the variety of possible applications, it is incumbent upon the user to test whether or not it is suitable for the desired application. Technical application advice provided by us verbally, in writing or through tests is for your information only and is absolutely non-binding.

Příloha 15: Technický list k PUR lepidlu Lear D4 (LEAR)



číslo tech. listu: **T47813** revize:1(12.12.2014) datum vydání č.3: 30.7.2013



UMĚNÍ SPOJOVAT

TECHNICKÝ LIST

LEAR na dřevo D4

Jednosložkové polyuretanové lepidlo vytvrzující působením vlhkosti

Reaktivní jednosložkové PU lepidlo vytvrzující působením vlhkosti je lepidlo složené z polyisokyanátového prepolymeru. Je připraveno k použití.

Lepidlo splňuje kritéria norem EN204 – kategorie D4 a EN302-4.

TECHNICKÉ ÚDAJE:

Viskozita Brookfield RVT, 20 ot/min.	4 000-6 000 mPas
Vzhled	hnědá medovitá kapalina
Otevřená doba (20 °C/50 % rel. vlh. vzduchu)	20 min

APLIKACE:

Způsob nanášení	nátěr, nános v pruzích apod.
Teplota materiálu, prostředí a lepidla	18-22 °C
Vlhkost dřeva	8-12 %
Vlhkost vzduchu	65-75 %
Nános lepidla	100-200 g/m ²
Lisovací tlak	≥0,5 atm
Lisovací čas	≥60 min

OBLAST POUŽITÍ:

LEAR na dřevo D4 je určen pro lepení obtížně lepitelných truhlářských dílců, například lepení dřevěných rámců, lakovaných ploch (PU nebo polyesterové laky) navzájem nebo k jiným, i nesavým, povrchům (melaminové povrchy, kovy apod.).

DOPORUČENÍ K POUŽITÍ:

- LEAR na dřevo D4 se nanáší na jednu z lepených ploch v takovém množství, aby lepidlo nevytékalo z lepené spáry.
- Lepidlo při vytvrzovací reakci uvolňuje plynný CO₂, což může vést k napětí. Jako prevenci napětí a posunutí lepených částí použijte přiměřený tlak dílců k sobě.
- Teplotní odolnost spoje je od -30 do +120 °C.
- Vlhkost vzduchu a materiálu funguje jako katalyzátor vytvrzení; ve velmi suchém prostředí bude nutné zvýšit vlhkost vzduchu, aby se neúměrně neprodlužoval lisovací čas.
- LEAR na dřevo D4 musí být skladován v suchém prostředí, při teplotách kolem 20 °C.
- Při práci používejte ochranné rukavice a ventilaci pracovního prostředí.

LEAR, a.s. • tradiční český výrobce lepidel a stavební chemie

Certifikát řízení kvality podle normy ČSN EN ISO 9001.

Pod Sídlištěm 3, 636 00 Brno • telefon: +420 548 216 591 • fax: +420 548 535 726 • e-mail: info@lear.cz • <http://www.lear.cz> • www.abclepidla.cz
zapsáno v OR KS Brno, odd. B, vložka 213 • IČO: 00219282 • DIČ: CZ00219282



číslo tech. listu: **T47813** revize:1(12.12.2014) datum vydání č.3: 30.7.2013



UMĚNÍ SPOJOVAT

NÁVOD K POUŽITÍ:

Povrchy pro lepení musí být naprosto čisté, suché a odmaštěné. LEAR na dřevo D4 se roztírá stěrkou. Pro rychlé vytvrzování a optimální vlastnosti spoje je nutné docílit minimální souvislou vrstvu lepidla. Je nutné lepené díly zajistit svorkami a stisknout, lepidlo dopěňuje. Po cca 60 minutách je možné lepené díly dále opracovávat. Úplné vytvrzení nastává po 24 hodinách.

BALENÍ A SKLADOVÁNÍ:

Lepidlo dodáváme v plastových nádobách po 0,5 kg (s aplikátorem), plastový kanystr. Uskladněno musí být v originálním balení. Doporučená teplota skladování je +5 až +25°C. Správně uskladněné lepidlo má 12měsíční záruční dobu od data výroby.

Návod k použití lepidla je vyhotoven na základě našich zkoušek a zkušeností. Vzhledem k tomu, že nemáme žádný přímý vliv na Váš způsob práce, nemůžeme převzít zodpovědnost za výsledky lepení. Před použitím doporučujeme vyzkoušet.

Naše obchodně-technická služba Vám nabízí technickou pomoc při používání lepidla.

Výrobce je držitelem certifikátu řízení jakosti podle normy **ČSN EN ISO 9001**.

UPOZORNĚNÍ:

LEAR na dřevo D4 je klasifikován jako nebezpečný.

Před použitím se seznamte s údaji v bezpečnostním listu výrobku!

LEAR, a.s. • tradiční český výrobce lepidel a stavební chemie

Certifikát řízení kvality podle normy ČSN EN ISO 9001.

Pod Sídlištěm 3, 636 00 Brno • telefon: +420 548 216 591 • fax: +420 548 535 726 • e-mail: info@lear.cz • <http://www.lear.cz> • www.abclepidla.cz
zapsáno v OR KS Brno, odd. B, vložka 213 • IČO: 00219282 • DIČ: CZ00219282

Článek 1: Stiffness Coefficients of Mortise and Tenon Joints used on Wooden Window Profiles (Podlena a Borůvka 2016)

Stiffness Coefficients of Mortise and Tenon Joints used on Wooden Window Profiles

Milan Podlena ^{a,*} and Vlastimil Borůvka ^b

Samples of corner joints of wooden rectangular windows, with widths of 78 and 92 mm, were used to determine the stiffness of tenon and mortise joints. Two series of samples were loaded statically in the angular plane of compression and tension, so that the bending moment could be derived. The objective of the experiment was to determine the existing correlations between the stiffness in maximum strength and the stiffness in the elastic area for both types of tests. After strength tests were carried out, the annual ring width of the samples was measured to determine whether this factor affects the stiffness of the joints. The results showed that there was a relatively strong correlation between the stiffness in the elastic area and the maximum load. A two-factor analysis of variance confirmed that the type of load did not affect the stiffness of the joint, but the type of joint (width) does significantly affect the stiffness. Therefore, the width of annual rings was positively correlated with the stiffness of the joints.

Keywords: Corner joint; Stiffness; Mortise and tenon; Deformation; Load

Contact information: a: Department of Wood Products and Wood Constructions, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, Praha 6 – Suchbátka, 165 21, Czech Republic; b: Department of Wood Processing, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, Praha 6 – Suchbátka, 165 21, Czech Republic;

* Corresponding author: podlena@fld.czu.cz

INTRODUCTION

When assessing the strength of wooden structures, the mechanical properties of either the entire structure or just a particular joint are tested. The strength properties of individual structural joints are tested under various conditions (Atar *et al.* 2009; Oktae *et al.* 2014; İmirzi *et al.* 2015). When the tests are carried out, a maximum force of compression or tension is applied to the joint until total failure of the joint is observed for the purpose of subsequent assessment (extension or shortening, load force, change of angle, bending moment, and stiffness of joint). Knowledge of the mechanical behaviour of the individual joints is important for assigning a proper application and dimensioning in the construction sector. The second case investigates the behaviour of the joints in the entire construction. In this case, a load that the wooden structure is actually exposed to during normal use is simulated (*e.g.* weight of a person sitting on furniture) (Eckelman and Haviarova 2006; Tas *et al.* 2014).

One of the most frequently used joints in wooden structures is the mortise and tenon joint. There are many articles dealing with the properties of the tenon and mortise in relation to the size of the tenon (Wilczyński and Warmbier 2003), the shape of the tenon (Tankut and Tankut 2005), the glue-line thickness of the bonded joints (Ratnasingam and Ioras 2013), the wood species (Kasal *et al.* 2013), the type of adhesive, and wood moisture content (Tankut 2007), as well as temperature and relative air humidity (Jivkov *et al.* 2008). As previously shown, the strength of the joints may be affected by various factors, *i.e.*, the

internal conditions (type of joint, joint geometry, joint material, and/or type of adhesive), or external conditions (type of loading forces and abiotic factors). These factors are usually resolved in use for furniture purposes.

A little investigation into the mechanical properties of mortise and tenon in the application of wooden windows has been conducted. In Hrovatin *et al.* (2013), the mortise and tenon was compared with different corner joints (dowel and wooden ring) for tensile testing, but only load force was observed. Moreover, in Joščák and Kollár (2007), the bending moment, deformation, and stiffness were observed for tensile and compression testing. The profiles of windows 68 mm were used in both research projects. More recently, Pantaleo *et al.* (2014) have carried out a profile of 68 mm for tensile testing. Nowadays, the requirements for the size of windows are increasing, and there is increasing concern about the energy sufficiency of windows. For these reasons there is greater use of profile 92 mm. The objective of this experiment was to ascertain the stiffness of the mortise and tenon joints, thereby discovering the points of weakness in the structure of different window frames. Generally, these joints are critical for structural integrity, since they weaken the profile in the cross-sectional dimension. The aim of this paper is to examine the extent to which the stiffness of the maximum load correlates with the stiffness in the elastic area. The stiffness in the region is influential in the overall assessment of structural strength in a joint.

EXPERIMENTAL

Materials and Methods

The testing samples were the corner joints of casements, made from glued-laminated timber. All of the slats were made of spruce wood, in accordance with the EN 14080 testing standard (2013). The glued prisms were compiled from length-adjusted slats using finger joints. Series of completed corner joints were supplied from window manufacturers (Janošík Okna-Dveře Ltd., and Davelo Ltd., Czech Republic) in their standard profiles and dimensions, as specified in Fig. 1.

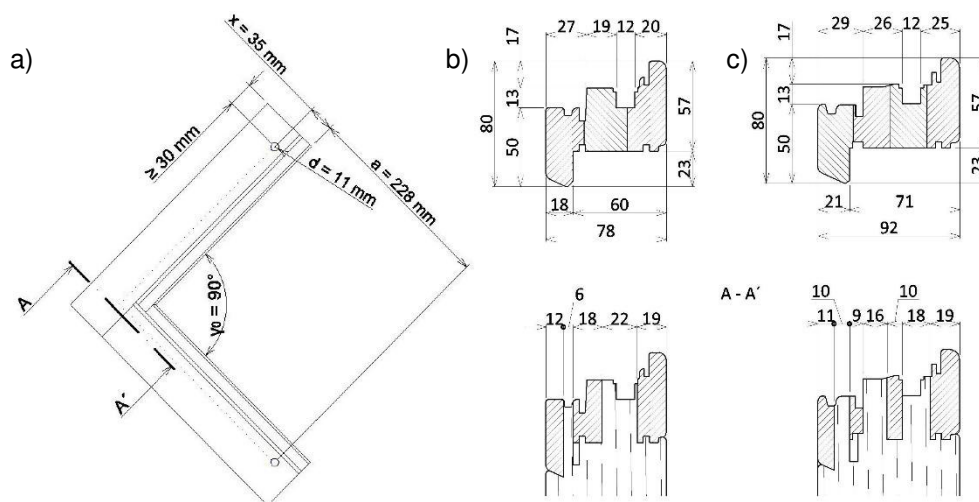


Fig. 1. a) Basic measurements of the testing samples, b) Janošík Okna-Dveře Ltd., Czech Republic, and c) Davelo Ltd., Czech Republic

The first series of tests was run on samples with a profile width of 78 mm (IV 78). Samples from IV 78 were provided from Janošík Okna-Dveře Ltd. A window profile was made from a three-layer prism, with a slat thickness of 28 mm. The second series of testing samples were made from a four-layer bonded prism, with a width of 92 mm (IV 92) and a slat thickness of 24 mm. These samples were obtained from Davelo Ltd. For the strength tests, 50 samples were supplied from each profile. For each type of stress test, 25 corner joints were available from each series. The tenon and mortise was used as a corner joint, glued with poly(vinyl acetate) adhesive (class D4, EN 204 (2001)) in manufactures standard.

The corner joints were prepared in the laboratory of Faculty of Forestry and Wood Sciences at Czech University of Life Sciences Prague. At the start of the test, the equilibrium moisture content of the samples was stabilized in a conditioning chamber (BMT Medical Technology Ltd., Czech Republic) at the environmental conditions of 20 °C (± 2 °C) and 65% ($\pm 5\%$) relative humidity. After conditioning, the samples were immediately used for strength testing. The corner joints were loaded in the angular plane of compression and tension on the material testing machine, TIRA 50 kN. The testing machine was originally a UTS 50 unit; however it had been rebuilt as a TIRA 50 (TIRA system GmbH, Germany). Universal testing fixture was designed for fastening samples with different widths. The samples were secured in the fixture with drilled hole and steel pin construction (circular diameter, $D = 10$ mm), which was secured via a cotter pin (Fig. 2).

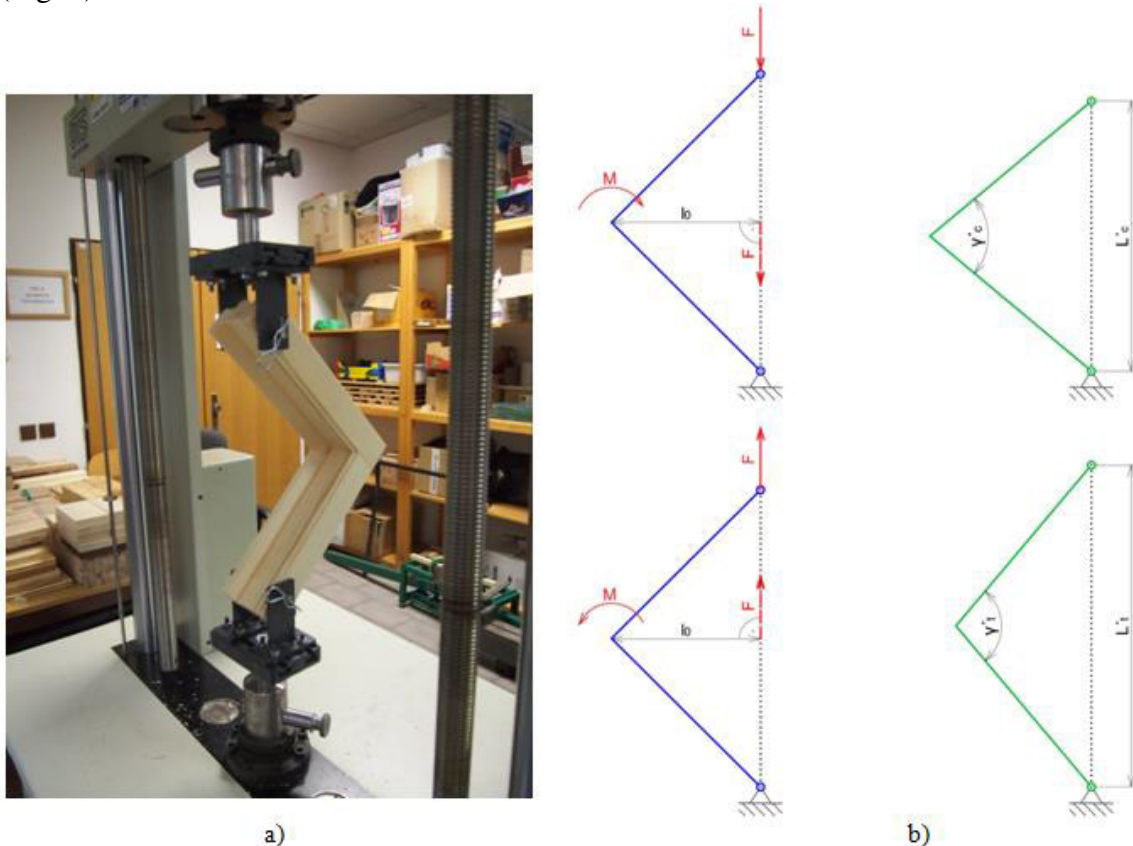


Fig. 2. a) The testing procedure and b) schematic of the bending test for compression and tensile testing

The load was applied with a crosshead speed of 5 mm/min to run the entire test in 1 to 2 min. The tests were automatically ended when the loading force was decreased by 15%. During testing, the force (F) and extension were recorded, representing the shortening at the maximum load and the elastic region, *i.e.*, at 10% and 40% (Fig. 3).

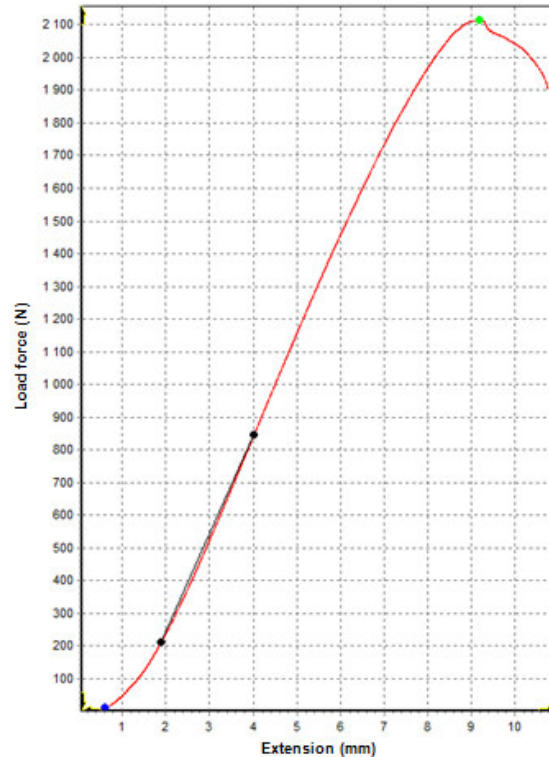


Fig. 3. Working diagram of tensile strength testing (IV 92, No. 7)

The curve on the graph in Fig. 3 shows the dependence on the load force and the extension. The loading force (F) acting on the arm (l_0) deduced the bending moments in the area of joint connections. The bending moments were calculated for maximum load (M_{\max}) and for bending moment ($\Delta M_{\text{elast.}}$), which was calculated for statuses in the elastic region as a difference between M_{40} and M_{10} . These limits were stated for both testing methods because the curves of corner joint loadings exhibited linear behavior in this range as is reported in Fig. 3. During the calculations, perfectly rigid members were considered, and the effects of the bending and deformation at the location of the tenon were neglected. The creep of the joints in the fixture at the beginning of the test was reduced in the software configuration of the testing program, and the actual amount that the joint extended or contracted was recorded.

The bending moments for both window profiles and types of load were calculated according to the following Eq. 1 (Joščák and Kollár 2007; Jivkov *et al.* 2008):

$$M = F (N) \times l_0 (m) \quad (\text{N} \times \text{m}) \quad (1)$$

The size of the arm force was a constant value ($l_0 = 186 \text{ mm}$) for all of the samples. This size was derived from the product of the distance ($a + x$) and cosine of half of the original angle ($\gamma_0 = 90^\circ$). The result of the acting force (F) changed the original distance

between the pins of the fixture (L'), which resulted in a deviation in the internal angle of the joints (γ'). This was calculated using the following Eq. 2 (Podlena *et al.* 2015):

$$\gamma' = 2 \arcsin \frac{L' \text{ (mm)}}{2(a \text{ (mm)} + x \text{ (mm)})} \quad (\text{rad}) \quad (2)$$

The overall resulting stiffness was calculated for the elastic area (c_{elast}) and maximum stiffness of joints (c_{max}), as a proportion of the change in the corresponding moments ($\Delta M_{\text{elast.}}$, M_{max}) and the change in the relevant angles ($\Delta \gamma_{\text{elast.}}$, γ_{max}), according to Eqs. 3 and 4 (Warmbier and Wilczyński 2000):

$$c_{\text{elast.}} = \frac{\Delta M_{\text{elast.}} (N \times m)}{\Delta \gamma_{\text{elast.}} (\text{rad})} \quad (N \times m/\text{rad}) \quad (3)$$

$$c_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}} (N \times m)}{\gamma_{\text{max}} (\text{rad})} \quad (N \times m/\text{rad}) \quad (4)$$

After the tests were carried out, the average width of the annual rings, near the corner joints, was measured on the samples (Fig. 4.). Cross sections of the samples were scanned and evaluated using image analysis software (NIS Elements AR, Laboratory Imaging, Czech Republic). The average width of the annual rings was measured for each sample in pixels and converted to millimeters. In particular, the images were scanned in the resolution 600 DPI. This means that, the one pixel is equal to 0.0423 mm in the real object. The impact of this factor was evaluated together with the results of the measurement.

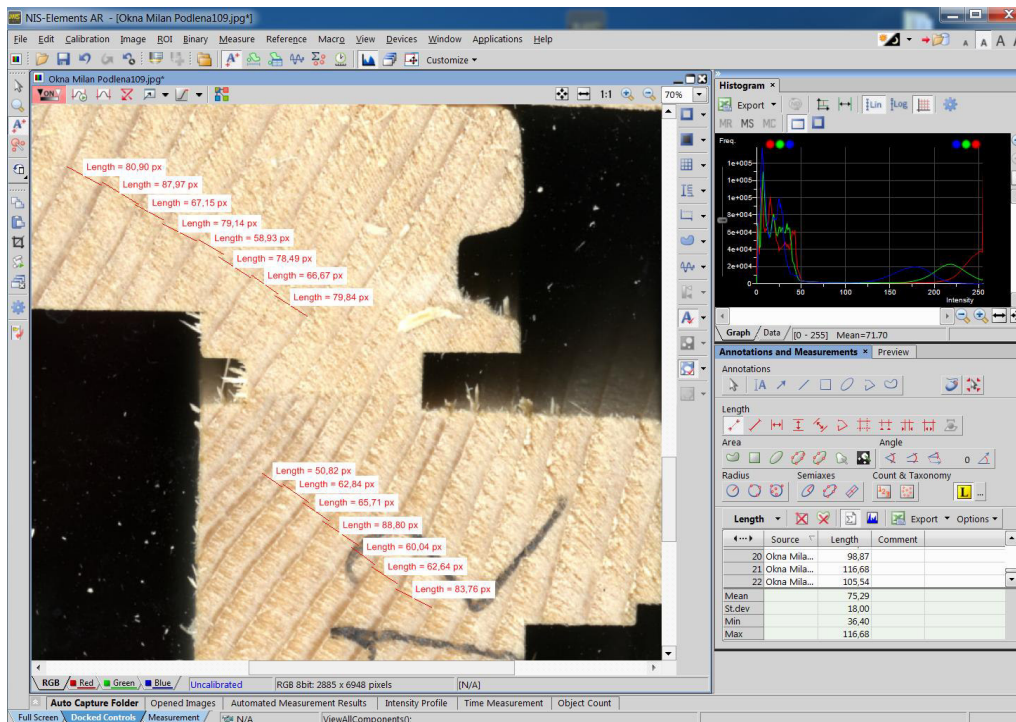


Fig. 4. Width measurement of the annual rings by software NIS-Elements AR (IV 78, No. 12)

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the load tests are shown in Figs. 5 and 6 for tensile and compression tests of profiles IV 78 and IV 92, respectively. Figure 5 shows the results of the tensile tests, with a dependency between stiffness in the elastic area ($c_{t, \text{elast}}$) and stiffness at the maximum load ($c_{t, \text{max}}$).

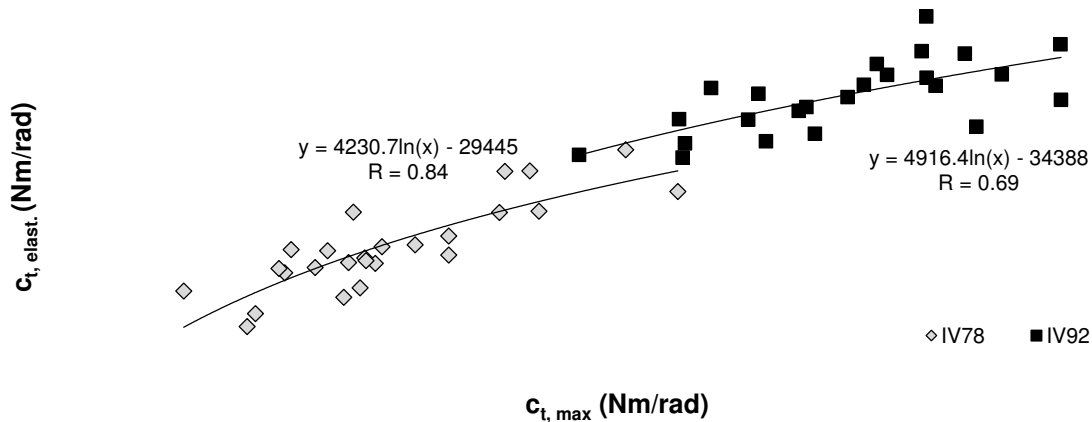


Fig. 5. Stiffness results for the tensile test

Figure 6 shows the results of compression tests, with a dependency between stiffness in the elastic area ($c_{c, \text{elast}}$) and stiffness at the maximum load ($c_{c, \text{max}}$).

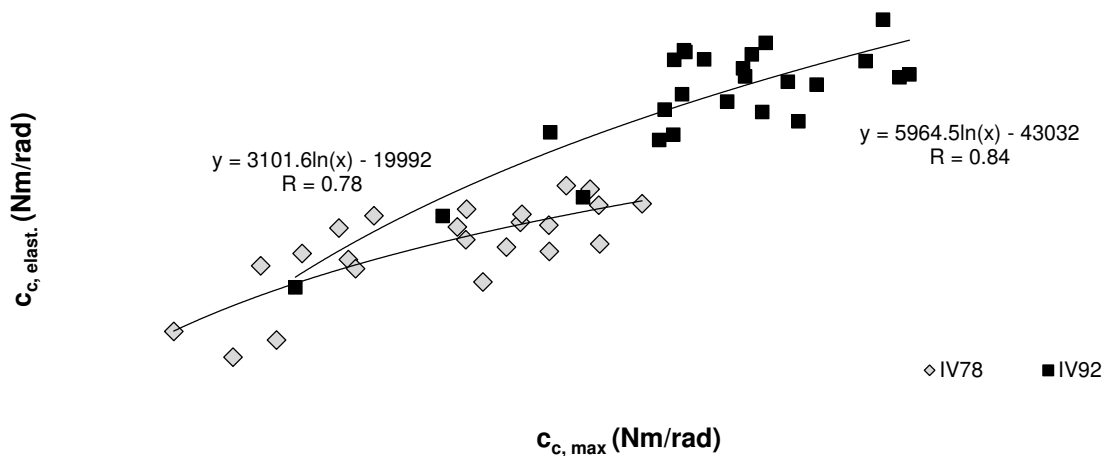


Fig. 6. Stiffness results for the compression test

Measured values were introduced from all of the tests into Eqs. 1 to 4, and from these calculations, the values for stiffness were acquired (Table 1). The statistics for the material parameters, *i.e.*, the width of annual rings for the relevant type of load and dimension of test profile, is specified in Table 2.

Table 1. Stiffness Values According to the Types of Testing Procedures and Size of Profiles

Stiffness	Tensile testing				Compression testing			
	IV 78		IV 92		IV 78		IV 92	
	Elastic area	max	Elastic area	max	Elastic area	max	Elastic area	max
Minimum (Nm/rad)	3536	2421	8053	5686	3413	2303	5034	3290
Maximum (Nm/rad)	8262	6501	11824	9666	7396	6105	11250	8276
Median (Nm/rad)	5450	3916	9712	7970	6143	4680	9809	6797
Mean (Nm/rad)	5667	4130	9680	7882	5989	4485	9377	6658
Standard deviation (Nm/rad)	1185	989	977	1055	1065	1090	1400	1124
Coefficient of variation (%)	21	24	10	13	18	24	15	17

Table 2. Width of Annual Rings According to the Type of Testing Procedures and Size of Profiles

Width of annual rings	Tensile testing		Compression testing	
	IV 78	IV 92	IV 78	IV 92
Minimum (mm)	2.1	2.1	1.9	2.2
Maximum (mm)	4.5	4.5	4.4	4.4
Median (mm)	3.1	3.1	3.2	3.2
Mean (mm)	3.2	3.2	3.1	3.1
Standard deviation (mm)	0.6	0.6	0.7	0.7
Coefficient of variation (%)	18	18	23	22

As shown in Table 1, the resulting stiffness values from comparing both the compression and tensile testing methods were very similar to each other. The differences between the average value of maximum stiffness in the compression and tensile tests for profiles IV 78 and IV 98 were 355 Nm/rad and 1224 Nm/rad, respectively. These values can be compared with the results specified by Joščák and Kollár (2007) for profile 68 mm (IV 68). Their results showed the difference 5220 Nm/rad for maximum stiffness between compression and tensile testing. Considerable differences were also found for changes in internal angles, which indirectly and proportionally affect the size of joint stiffness. As shown in Fig. 1, the depth of the joints was constant (80 mm) for used profiles, but there was a difference in used width of profiles, which is reflected in the uses of double (IV 68, IV 78) or triple mortise and tenon (IV 92). If one compares these joints, the dimension of used joints will play the most significant role. The size of bonded area was larger for IV 92 profile, which means that stiffness for triple mortise and tenon should be larger. The adhesives and their appropriate application method also had a significant influence on the strength of produced window. The stiffness of joints was shown to be affected by the width of annuals rings (Table 2) according to the same range of coefficient of variation of joint stiffness (Table 1).

The present results were unable to demonstrate which type of load on the joints exhibited the greatest effect on stiffness, as the standard deviation of joints stiffness was determined by small differences in the average values of maximum stiffness. In order to make the evaluation more relevant, the acquired results were evaluated (software STATISTICA 12) according to an analysis of variance (ANOVA) to determine the effects of the load, joint, and load and joint interaction on elastic stiffness and maximum angle change (Tables 3 and 4).

Table 3. The Effect of Load, Joint, and Load*Joint on the Elastic Stiffness*

Factor	Sum of Squares	DF	Variance	Fisher's F-test	P-value
Intercept	5.711585E+09	1	5.711585E+09	4160.732	< 0.01
Load	2.264197E+03	1	2.264197E+03	0.002	0.97
Joint	3.317402E+08	1	3.317402E+08	241.664	< 0.01
Load*joint	2.362323E+06	1	2.362323E+06	1.721	0.19
Error	1.276644E+08	99	1.372735E+06		

*Significance Level of 99%

Table 4. The Effect of Load, Joint, and Load*Joint on the Maximum Angle Change*

Factor	Sum of Squares	DF	Variance	Fisher's F-test	P-value
Intercept	637.4798	1	637.4798	3207.622	< 0.01
Load	0.5840	1	0.5840	2.938	0.09
Joint	2.7410	1	2.7410	13.792	< 0.01
Load*joint	3.7959	1	3.7959	19.100	< 0.01
Error	19.6752	99	0.1987		

*Significance level of 99%

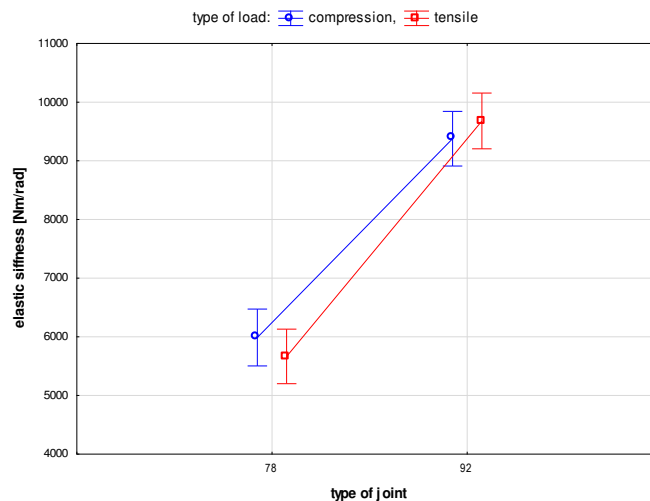


Fig. 7. Graphic depiction of the impact of the load and joint on the elastic stiffness

The type of joint (width) significantly ($P < 0.01$) affected the elastic stiffness of the joint; however, there was no difference detected in the type of load ($P = 0.97$) or the combination of load and joint ($P = 0.19$) on the elastic stiffness (Fig. 7). Similar results were demonstrated for the effect of the load, joint, and the load and joint interaction on the maximum angle change. In this case, the interaction effect of the type of load and the joint type (width) were statistically significant ($P < 0.01$).

The thresholds that were set in the elastic area reduced the probability of errors that might have occurred during this measurement. When a sample was affixed to the apparatus, a certain amount of clearance in the tenon joint was also created. A minimum of 10% threshold was attributed to the 'start-up' at the beginning of the tests, and was therefore eliminated. The upper limit of 40% was used as a standard, which is commonly used for ascertaining static modulus of wood elasticity. In this study, the focus remained on maximum stiffness and the yield strength of joints. However, the strength of the joints may vary substantially between the same type of joints and materials. Therefore, the testing was unable to detect whether a joint failed in the glued area, or in some other area. Further research is required in this area to expand the elastic stiffness database and determine the mechanical properties of other types of joints with respect to relative humidity.

CONCLUSIONS

1. For the tensile test of profile IV 78, an average of 5667 and 5989 Nm/rad were obtained for the elastic area in the tensile and the compression tests, respectively. For profile IV 92, the stiffness test resulted in an average of 9680 and 9377 Nm/rad for the elastic area in the tensile and the compression tests, respectively.
2. The correlation between elastic stiffness and stiffness at the maximum load were similar, ranging from 0.69 to 0.84 for profile IV 92 and profile IV 78.
3. A two-factor analysis of variance demonstrated a significant effect for the type of joint (joint width) on the elastic stiffness, but failed to demonstrate a statistical influence of the type of load or the combination of load and joint.
4. The variance for the average width of the annual rings, as one of the material factors that affects stiffness, ranged from 18% to 23%. The coefficient of variation for joint stiffness was approximately within the same range of values, *i.e.*, from 10% to 24%. Thus, the variability of joint stiffness is clearly influenced by the structure of the material.
5. The loading of samples within the elastic area proved to be a more relevant method. The range of the elastic area is clearly defined by the upper and lower limits. Within this region, the trajectory of forces for all types of joints will always be the same, without a permanent breach of the test samples. The results are more accurate in comparison to loading up to the ultimate strength.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by funding from the Internal Grant Agency of the Czech University of Life Sciences Prague, No. A11/15.

REFERENCES CITED

- Atar, M., Ozcifci, A., Altinok, M., and Celikel, U. (2009). "Determination of diagonal compression and tension performances for case furniture corner joints constructed with wood biscuits," *Materials and Design* 30(3), 665-670. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.05.023
- Eckelman, C., and Haviarova, E. (2006). "Performance tests of school chairs constructed with round mortise and tenon joints," *Forest Products Journal* 56(3), 51-57.
- EN 204. (2001). "Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 14080. (2013). "Timber structures - glued laminated timber – requirements," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Hrovatin, J., Silvana, P., Berginc, J., Šernek, M., Zupančič, A., Oblak, L., and Medved, S. (2013). "Strength comparison of joints at window frames," *Drewno: Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty* 56(189), 127-135.
- İmirzi, H. Ö., Smardzewski, J., and Döngel, N. (2015). "Method for substitute modulus determination of furniture frame construction joints," *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 39, 775-785. DOI: 10.3906/tar-1406-92
- Jivkov, V., Marinova, A., and Johannes, A. (2008). "Influence of the temperature on the bending strength and stiffness characteristics of glued corner joints of frame structural elements made from solid beech wood," in: *Conference Proceedings from Nabytok at Zvolen*, Slovak Republic, pp. 1-10.
- Joščák, P., and Kollár, P. (2007). "Strength characteristics of Hoffmann-Schwalbe corner joints of window sash," *Annals of Warsaw University of Life Sciences* 61, 291-295.
- Kasal, A., Haviarova, E., Efe, H., Eckelman, C. A., and Erdil, Y. Z. (2013). "Effect of adhesive type and tenon size on bending moment capacity and rigidity of T-shaped furniture joints constructed of Turkish Beech and Scots Pine," *Wood and Fiber Science* 45(3), 287-293.
- Oktaee, J., Ebrahimi, G., Layeghi, M., Ghofrani, M., and Eckelman, C. A. (2014). "Bending moment capacity of simple and haunched mortise and tenon furniture joints under tension and compression loads," *Turkish Journal of Agriculture & Forestry* 38, 291-297. DOI: 10.3906/tar-1211-74
- Pantaleo, A., Ferri, D., and Pellerano, A. (2014). "Tests for outdoor window profiles: 90° mortise tenon corner joints strength assessment," *Wood Material Science and Engineering* (ahead of print). DOI: 10.1080/17480272.2014.939712
- Podlena, M., Borůvka, V., and Bomba, J. (2015). "The strength determination of corner joints used for wooden windows," *Annals of Warsaw University of Life Sciences* 91, 149-153.
- Ratnasingam, J., and Ioras, F. (2013). "Effect of adhesive type and glue-line thickness on the fatigue strength of mortise and tenon furniture joints," *European Journal of Wood and Wood Products* 71(6), 819-821. DOI: 10.1007/s00107-013-0724-1
- Tankut, N. (2007). "The effect of adhesive type and bond line thickness on the strength of mortise and tenon joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives* 27(6), 493-498. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2006.07.003
- Tankut, A. N., and Tankut, N. (2005). "The effects of joint forms (shape) and dimensions on the strengths of mortise and tenon joints," *Turkish Journal of Agriculture* 29, 493-498.

- Taş, H. H., Altınok, M., and Çimen, M. (2014). “The strength properties changing according to type corner joints and adhesive of the wood-based furniture under the effect of dynamic forces,” *Wood Research* 59(2), 359-372.
- Warmbier, K., and Wilczyński, A. (2000). “Strength and stiffness of dowel corner joints: Effect of joints dimensions,” *Folia Forestalia Polonica, Seria B* 31, 29-41.
- Wilczyński, A., and Warmbier, K. (2003). “Effect of joint dimensions on strength and stiffness of tenon joints,” *Folia Forestalia Polonica, Seria B* 34, 53-66.

Article submitted: December 3, 2015; Peer review completed: February 6, 2016; Revised version received and accepted: March 14, 2016; Published: April 12, 2016.
DOI: 10.15376/biores.11.2.4677-4687

Článek 2: Determination of the Bending Moment of a Dowel and Tenon Joint on Window Profile IV 92 of a Wooden Window (Podlena et al. 2017)

Determination of the Bending Moment of a Dowel and Tenon Joint on Window Profile IV 92 of a Wooden Window

Milan Podlena,* Martin Böhm, Martin Múčka, and Jan Bomba

This study deals with calculating and comparing the bending moments of two types of corner joints for commercially produced wooden sashes. The triple tenon and mortise joint was compared to a dowel joint on the sash of a window profile IV 92, made of spruce glued laminated timber. On the testing machine, the maximum force in the angular plane of a window sash under compression or tension mode was applied, and the measured values were converted to the bending moments. A significant difference between the bending moments for the mortise and tenon joint, and dowel joint were determined. The dowel joints achieved 167 Nm in a tensile test and 168 Nm in a compression test, while the mortise and tenon joint achieved 344 Nm in a tensile test and 325 Nm in a compression test. However, a significant difference was not revealed between the compression and tension tests for both types of joints. The differences for both types of joints were explained *via* the different sizes of the bonded surfaces, which was higher for the tested triple tenon and mortise joint by 29%.

Keywords: Bending strength; Dowel; Mortise and tenon; Corner joint; Wooden window

Contact information: Department of Wood Products and Wood Constructions, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, Praha 6- Suchbát, 165 21, Czech Republic; *Corresponding author: podlena@fld.czu.cz

INTRODUCTION

At the end of the 20th and at the beginning of the 21st centuries, thermo-technical properties of opening windowpanes were improved through the use of glued laminated timber, insulating glass, and a multipoint locking system. The size of a window profile was gradually expanded in the direction of the temperature gradient from 68 mm, through 72 mm, 78 mm, and 88 mm, to 92 mm and higher. According to the standard DIN 68 121-1 (1993), window profiles are labelled with letters “IV,” having the reference of a single window (or doors) fitted with insulating glass. An opened single tenon and mortise was used as a corner joint on the smallest profile, which was replaced by a double, then triple tenon and mortise as the profile increased. Larger profiles allowed for thermally insulating double and triple glazing to be fitted, which helped with decreasing the heat transfer coefficient by as much as 75%, compared to single glazing (Hochberg *et al.* 2010). Through their glazing, windows represent a structural element that contributes to improving the energy performance of the entire building (Pantaleo *et al.* 2013). However, due to the weight of the insulating glass, increased demands are placed on the strength of the corner joints. Here it was necessary to achieve greater strength and stiffness of the corner joints, which increases along with the increasing bonded surface (Warmbier and Wilczyński 2000; Wilczyński and Warmbier 2003; Hajdarević and Šorn 2012). For utilizing passive

solar gains, glass surfaces also have tended to be maximized in the curtain walling of buildings, thereby again increasing the load on the corner joints of window sashes.

The IV 92 window profile with tenon and mortise in the corner joint is currently the most commonly used window profile. Dowel joints are the most frequent alternative to tenon and mortise (Bahlmann 2011; Hrovatin *et al.* 2013a; Pantaleo *et al.* 2013). Dowel joints provide many advantages for manufacturers. The top and bottom rails are always shorter by two widths of a bonded profile because they do not need material for the creation of joints, such as in the case for an opened tenon and mortise joint. Drilling dowels uses less energy than milling, and less waste is created. The production process is thus simplified and faster, due to the necessary profiles and holes for the dowels being formed by one machine. This increases manufacturing productivity and reduces production costs. The dowels are therefore able to compete with the tenon and mortise joint by accepting a lower strength (Efe *et al.* 2005; Hrovatin *et al.* 2013a; Ćmirzi *et al.* 2015). Despite the overall lower strength of dowel joints (Pantaleo *et al.* 2013), the experimental tests and modelling using the finite element method have established that dowelled window sashes with the application of structural silicon still have sufficient stiffness. Generally, the size of a bending moment and the stiffness of dowel joints can be affected by the dowel spacing, diameter, and depth of dowels (Warmbier and Wilczyński 2000). The comparison also showed that beech dowels in beech wood species have a higher strength than the oak species. Therefore, the wood species is also important.

Another fastener is the Hoffmann Dovetail Key joint (Joščák and Kollár 2007), and further research was performed for the substitution of the mentioned joints with a wooden ring (Hrovatin *et al.* 2013b). Table 1 shows that the variability of the strengths of joints is primarily affected by the type of corner joint, the type of adhesive, wood species, and the size of the profile, which, like the type of joints, relates to the size of the bonded surface. In addition, the glue line thickness (Hajdarević and Šorn 2012; Ratnasingam and Ioras 2013) and the temperature (Altinok and Kiliç 2004) also affect the strengths of the joints. The wood moisture content can have an effect with a different type of adhesive on the breaking strength too (Tankut 2007; Bomba *et al.* 2014). The measurement results are dependent on the methodical measurement procedure, which is not unified for testing the corner joints of wooden windows. Pantaleo *et al.* (2014) also mentioned that there are no specific procedures for testing rectangular corner joints. At this time only one standard for testing the corner joints of plastic windows, EN 514 (2000), has been proposed.

The present research included the testing of the corner joints of window profiles in the angular plane under compression or tension under normal conditions until a load at maximum force (F_{max}) was attained. However, the values of the joints can also be measured in the elastic area, such as in Podlena and Borůvka (2016), wherein it was determined, when comparing profiles IV 78 and IV 92, that the values of stiffness from the elastic area (10% and 40%) correlate (0.69 to 0.84) to the values from the maximum stiffness. During the testing of the corner joints, the progressions of forces derived from the moving crosshead of the testing machines are recorded depending on the displacement. As Table 1 shows, the force is also the most frequently monitored variable, but its value depends on the arm length. According to the size of the displacement, through the trigonometric function, the change in the inner angle is calculated for rectangular joints (Simeonova *et al.* 2015). The bending moment (M) is directly proportional to the size of the loading force and moment arm (l) (Eckelman 1971), and the resulting stiffness of the corner joints is calculated using the proportion of the bending moment to the change in the internal angle (c) (Erdil *et al.* 2005).

Table 1. Summary of the Various Corner Joints Applied to Wooden Windows Tested in Compression and Tensile Testing in the Angular Plane of Window Sash

Type of Load	Type of Corner Joint	Name of Adhesive	Wood Species	Size of Profile (mm)	Ultimate Strength (N)	Angular Deformation (°)	Bending Moment (Nm)	Stiffness (Nm/rad)
Tensile	Double tenon and mortise ¹	PVAc, Mekol 1141	Pine	68	832.5	-	-	-
		PVAc, Duplit AL-NBU	Pine	68	1030	-	-	-
	Double tenon and mortise ²	-	Spruce	68	-	0.68	369.6	9369
	Double tenon and mortise ³	-	Spruce	78	-	-	-	4130
	Triple tenon and mortise ³	-	Spruce	92	-	-	-	7882
	Wooden ring ¹	PVAc, Mekol 1141	Pine	68	1170	-	-	-
		PVAc, Duplit AL-NBU	Pine	68	1115	-	-	-
	Dowel joints ¹	PVAc, Mekol 1141	Pine	68	530	-	-	-
Hoffman Dovetail Key ²	-	Spruce	68	-	0.65	310.2	8278	
Compression	Double tenon and mortise ⁴	(PVAc, two-component D4 + 5% Turbo hardener 303-5)	Black Locust	55	9251.8	-	-	-
			Sessile Oak	55	9037	-	-	-
			Scots Pine	55	5432.9	-	-	-
	Double tenon and mortise ⁵	PVAc, Kleiberit 303	Pine	60	2080	-	-	-
			Fir		1781	-	-	-
	Double tenon and mortise ²	-	Spruce	68	-	3.51	184.6	4149
	Double tenon and mortise ³	-	Spruce	78	-	-	-	4485
	Triple tenon and mortise ³	-	Spruce	92	-	-	-	6658
	Hoffman Dovetail Key ²	-	Spruce	68	-	3.40	245.9	5232
Double tenon and mortise ⁶	PVAc, Protovil D4	Red oak	68	1342.9	-	264.7	-	

- This parameter is not specified.

1: Hrovatin *et al.* (2013a); 2: Joščák and Kollár (2007); 3: Podlena and Borůvka (2016); 4: Altinok *et al.* (2013); 5: Altinok *et al.* (2010); 6: Pantaleo *et al.* (2014)

Most researchers have only conducted tests on profiles IV 68 and smaller, which have now been replaced by bigger profiles. Measurements for this study were therefore performed on samples of window sashes with a profile IV 92 joined with a triple tenon and mortise, which was compared with a dowel joint. The bending moment calculated from the maximum load was selected as a characteristic for the strengths of the corner joints, which are comparable with the other joints.

EXPERIMENTAL

Materials

Test samples used were sash frames manufactured from spruce glued-laminated timber in accordance with the standard EN 14220 (2007) on profile IV 92 (Fig. 1a). The samples were supplied by window manufacturers conforming to their production standard. The length of each sample arm was measured as 350 mm. Batches of 51 corner joints were fitted with triple tenon and mortise (Figs. 1b and 2a), and the second series had 32 corner joints connected with five oak dowels (Figs. 1c and 2b). The dowels had dimensions of 8 mm x 50 mm with a spiral pattern on the surface. Two holes with diameters of 11 mm \pm 0.5 mm were drilled through the corner joint members using a radian drilling machine (TOS Svitavy, Czech Republic) to affix the samples by pins in the test grips (Podlena *et al.* 2015).

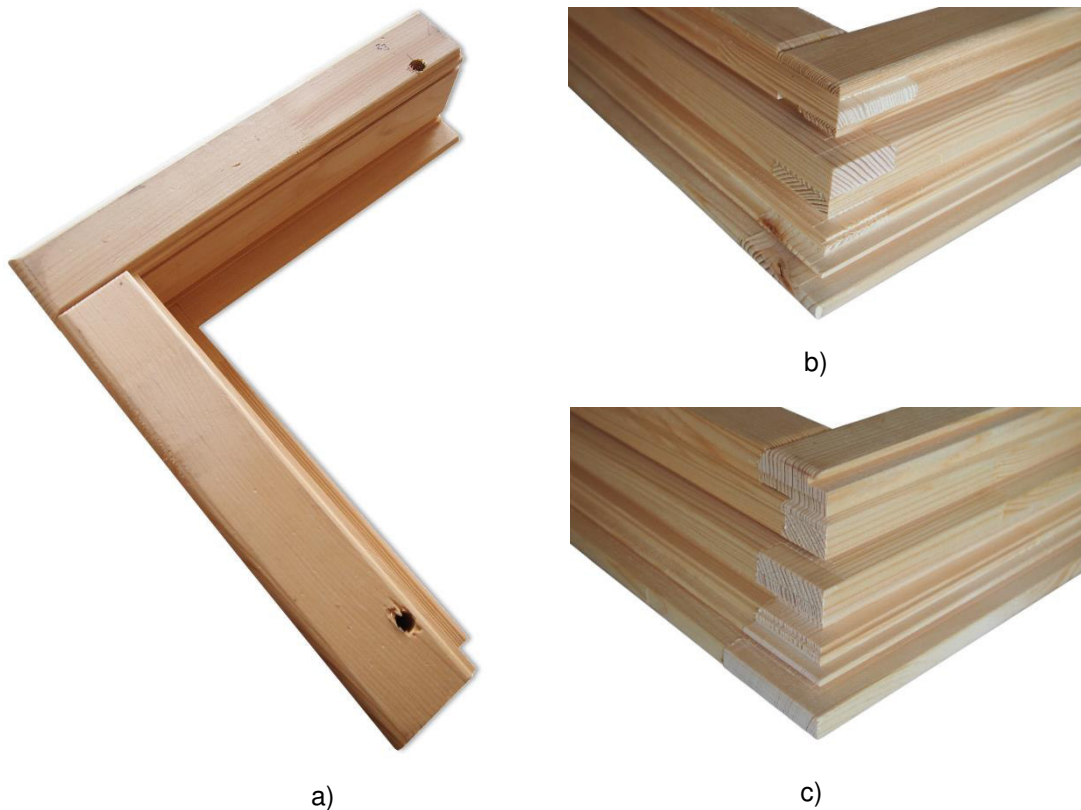


Fig. 1. Samples of the corner joints prepared for the bending test (a) with mortise and tenon (b), and dowel joints (c)

Tests were performed on bonded and milled corner joints whose surfaces did not have a completed surface treatment. The rabbates and grooves on the profiles differed in terms of the milling tools used by the window manufacturers. The outside rabbets of sash profiles were three-fold with grooves, which accommodate window fittings and rubber seals. The dimensions of the tested window profiles (including characteristic dimensions of corner joints) in mm are shown in Fig. 2.

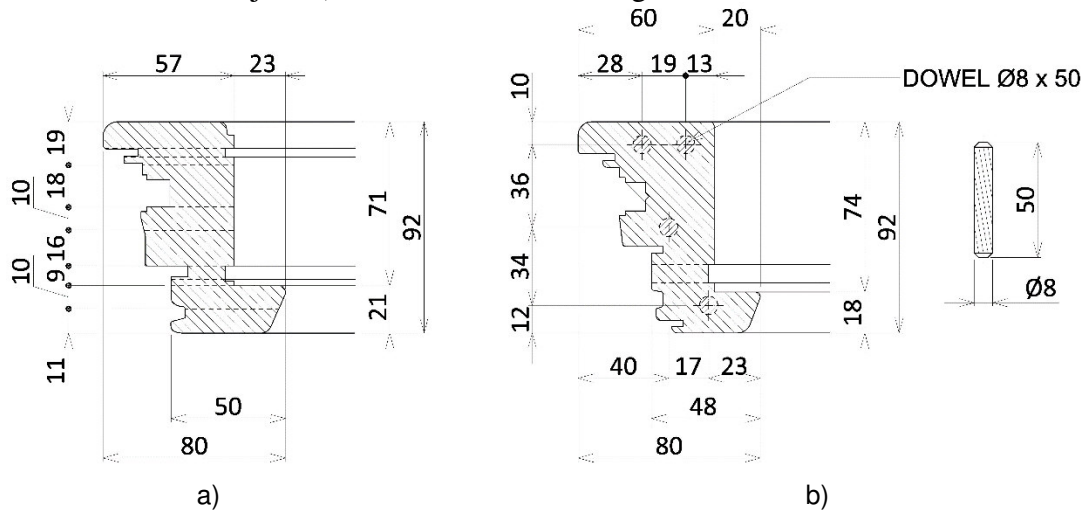


Fig. 2. Geometry of the window profiles IV 92 with triple mortise and tenon (a), and dowel joints (b) with dowel, in millimetres

The corner joints were bonded using thermoplastic dispersion of polyvinyl acetate (PVAc) adhesives with D4 durability class according to the standard EN 204 (2001). The series of samples with triple tenon and mortise were bonded using the adhesive D4 Leim 1K (GreenteQ, Gillingham, United Kingdom). The 1K Holzkaltleim D4 1K adhesive (Würth, Künzelsau, Germany) was used for the second series of joints. The selected characteristic properties specified in the technical sheets of the aforementioned adhesives are summarized in Table 2. The specified pH values of the adhesives were determined at a temperature of 20 °C according to ISO standard 976 (2013) and the viscosity of adhesives according to ISO 2555 (2015).

Table 2. Properties of Adhesives Applied on the Testing Samples

Type of Joint	Mortise and Tenon	Dowel Joints
Adhesive	GreenteQ, D4-Leim 1K	WÜRTH, 1K Holzkaltleim D4 1K
Density	1 g/cm ³	1.1 g/cm ³
pH Value	approx. 3.5	approx. 3
Viscosity	approx. 5000 to 6000 mPa.s	approx. 7000 mPa.s
Minimum Temperature of Film Formation	approx. + 8 °C	approx. +7 °C

Methods

To eliminate moisture content's effect on the strength of the joints, the equilibrium moisture content of all samples was stabilized in a climate chamber (Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Germany) with a temperature of 20 °C ± 2 °C and a relative humidity of 65% ± 5%. The corner joints samples were then taken for mechanical tests (a) b) c)

Fig.) in an angular plane of compression (Fig 3a), or tension (Fig 3b).

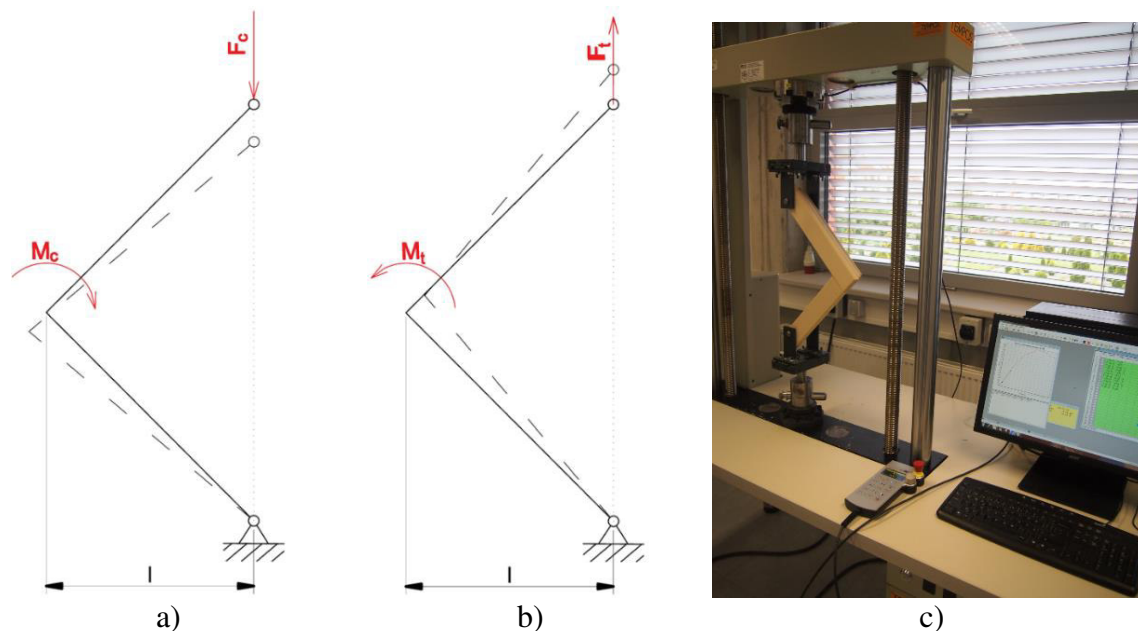


Fig. 3. Schematic of the bending tests for compression testing (a) and tensile testing (b) with setup of corner joints in the testing machine TIRA 50 (c)

The test machine used was the universal tensile testing machine TIRA 50 (TIRA GmbH, Schalkau, Germany) with a loading range up to 50 kN using TIRA software (TIRAtest, Version 4.6.0.40, Schalkau, Germany). The designed fixing component was mounted in the testing machine, and two pins affixed the test samples of the corner joints. Either a compression or tension test was performed with the same component according to the configured crosshead direction of displacement. Deformations in the holes of the member were neglected in both the methodological tests and both types of joints because they were not important in terms of overall deformations. During the test, the machine applied a constant load speed of 50 mm/min to adhere to the time course of the test of approximately 2 min. The values of the forces at maximum load in compression ($F_{c,max}$) and tension ($F_{t,max}$) were ascertained using the TIRA software. The resulting bending moments of the corner joints under compression ($M_{c,max}$) and tension ($M_{t,max}$) were then calculated according to the following Eqs. 1 and 2 according to the load method (Jivkov *et al.* 2008):

$$M_{c,max} \text{ (N} \times \text{m)} = F_{c,max} \text{ (N)} \times l \text{ (m)} \quad (1)$$

$$M_{t,max} \text{ (N} \times \text{m)} = F_{t,max} \text{ (N)} \times l \text{ (m)} \quad (2)$$

Perfect rigid members were expected during the calculations. The moment arm (l) is the perpendicular distance from the line action of the force to the axis of the rotation. The centre of moments is located at the intersection of the lines that are parallel with the edges of the members and pass through the centre of the pins in the fixing component. An analysis of variance (single-factor ANOVA) and a multiple comparison test (post-hoc Tukey) were

performed for a statistical assessment of the calculated results by software Statistica (StatSoft, Version 12. 0, Tulsa, Oklahoma, USA).

When comparing the triple tenon and mortise to the dowels, the impact of the size of the bonded surface, which was measured based on the given dimensions of the joints, was also taken into consideration. The bonded surfaces were added at the point of the members contact, regardless of the fibre orientation. Because the dowels are a type of fastener that penetrates into both members symmetrically, the total surface area of the dowels was calculated by adding up half of the surface of all five dowels with the contact surface of both members.

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the calculated bending moments for the corner joints of the window sashes on profile IV 92 are specified in Table 3. The data was divided according to the type of corner joints and load method used.

Table 3. Bending Moment Results

Bending Moment	Triple Tenon and Mortise		Dowel Joint	
	Compression	Tensile	Compression	Tensile
Mean (Nm)	325	344	168	167
Median (Nm)	335	338	166	170
Standard Deviation (Nm)	44	49	18	17
Specimens Counts	25	26	16	16
Minimum (Nm)	210	254	141	129
Maximum (Nm)	401	452	197	188
Coefficient of Variation (%)	13	14	11	10

The triple tenon and mortise tensile (344 Nm) achieved the highest bending moments, and it was followed by the values from the compression test (325 Nm). The size of the bending moment of the tensile tests was therefore 5% greater than that in the compression. The dowel joints were found to have approximately one-half of the tensile (167 Nm) and compression (168 Nm) test values compared to the triple tenon and mortise. Therefore, the result of the tensile test for the tenon and mortise achieved a 49% higher value when compared to the tensile test for the dowel joints. In terms of the compression test, the difference in the values was greater than 52%. In terms of the tensile and compression test values for dowel joints, the difference was less than 1%.

A significant difference ($P = 0.000147$) was demonstrated at 95% confidence between the bending moments for the triple tenon and mortise and for the dowel joints. In contrast, significant difference between type of loading (compressions and tension) for the triple tenon and mortise ($P = 0.3109$) or dowel joints ($P = 0.999985$) was not demonstrated. Furthermore, significant difference was not also proven between the average values of the maximum load on an angular plane of a window sash in compression or tensile tests for the tested triple tenon and mortise or dowels (Fig. 4).

The failure modes examples are presented in Fig. 5. Failure modes occurred in the wood and joint in both cases, so that used adhesives provided sufficient strength. Samples of triple tenon and mortise joint were damaged in the tests as a result of the joint rotation according to the type of load. The triple tenon and mortise is an open type of joint

whose bonded surfaces adhered with the side surfaces several times. Through the multiplicity of the tenon, the bonded surface was thus increased, and so was the strength of the joint. Dowel joints were pulled out of the wood on the inner side during tensile test, or on the outer side during compression test. This behaviour explains the different failure mode of the dowels in the Fig 5b. For the expression of the stress distribution in the wooden window frame connected with dowels, Pantaleo *et al.* (2013) previously used finite element modelling.

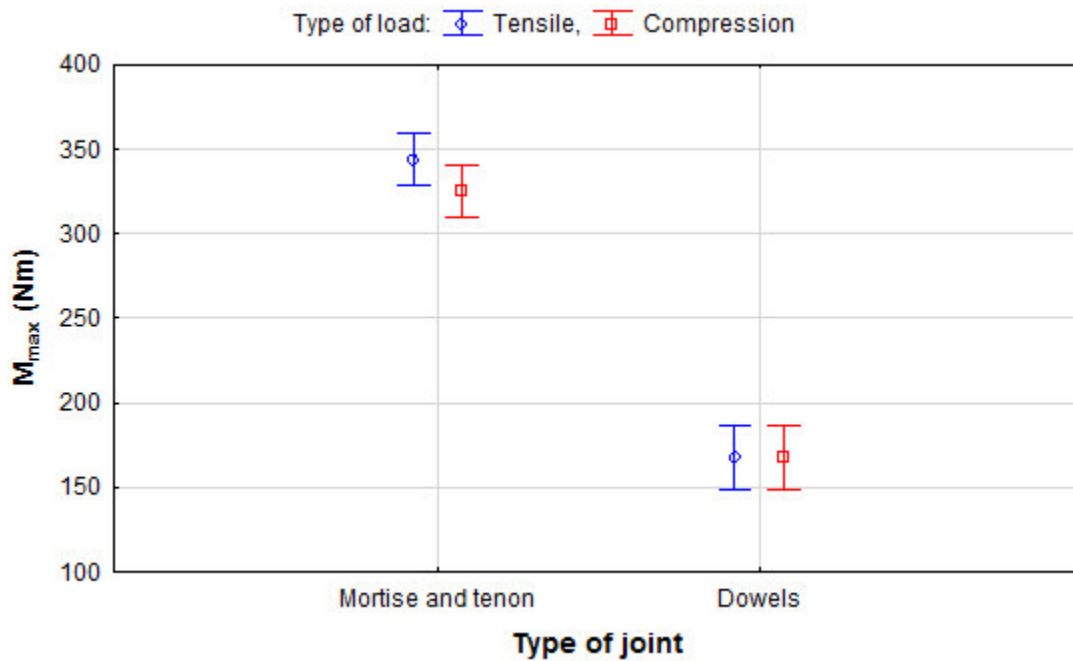


Fig. 4. ANOVA results (vertical bars denote 95% confidence interval); the X-axis represents the type of corner joint and the Y-axis represents ultimate bending strength



Fig. 5. Example of failure modes in compression: triple tenon and mortise (a) and dowel joint (b)

The fact that strength of the corner joint increases with increasing bonding surface was discussed in the Introduction, and such a dependency already has been established by many authors such as Warmbier and Wilczyński (2000), Wilczyński and Warmbier (2003),

and Hajdarević and Šorn (2012). Accordingly, higher bending moment values of the triple tenon and mortise could be partially explained through the size of bonded surfaces. The sum of the bonded surfaces achieved 10260 mm² for the tested triple tenon, but for the dowel joint the surface contact only achieved 7298 mm². Thus, a lower bending moment of dowel joint was expected. The overall bonded area of the dowel joint was given by the sum of the sizes of the contact surfaces of both members (3905 mm²) and half of the total surface area of five dowels with dimensions of 8 mm x 50 mm (3393 mm²). Therefore, only the surface of the dowels that penetrated the member of the second arm was taken into consideration. The 49% difference in bending moments in the tensile and 52% in the compression strengths between both joints could be partially explained by the smaller size of the bonded surfaces, wherein the bonded surface for the dowel joints was 29% smaller.

The results of the bending moments were partially comparable to the values specified in Table 1, as its size depended on the arm length. Joščák and Kollár (2007) tested a smaller 68 mm profile produced from a bonded spruce glued laminated timber with double tenon and mortise, which was compared to the Hoffmann Dovetail Key. The tenon and mortise in tensile mode showed 369.6 Nm in tension and 184.6 Nm in compression mode, whereas on the same profile the Hoffmann Dovetail Key only achieved 310.2 Nm in tension, but 245.9 Nm in compression. The large difference in compression or tension mode that these researchers achieved was interesting. A different double tenon and mortise, which was made from red oak, achieved average values of 264.7 Nm in compression with another 68 mm profile (Pantaleo *et al.* 2014). Based on the results of the bending moments of this research, the authors confirmed that the tenon and mortise joints had the highest strength of all of the researched types of joints. However, the diversity of the samples and methodological procedures did not allow for a comparison of the findings of all the other studies with sufficient precision.

When comparing dowel joints, it is important to emphasize that the window manufacturer used uncommon oak dowels on the test samples of this research. The findings from other studies show that the strength of the tested dowel joint can be optimized using beech dowels, or by increasing the number of dowels in the corner joint, which increases the bonded surface of the joint. The question remains to what extent these changes would weaken the cross-section of the members.

CONCLUSIONS

1. In the IV 92 window profile, the triple tenon and mortise joint achieved a bending moment value of 344 Nm at a load in an angular plane for tension, and 325 Nm for compression. A statistically significant difference ($P = 0.3109$) at a confidence level of 95% was not demonstrated among the results of the tensile and compression values for tenon and mortise.
2. In the IV 92 window profile, the dowel joints demonstrated significantly lower values of bending moments in the tensile test at 167 Nm, and 168 Nm in the compression test. A statistically significant difference ($P = 0.999985$) at a confidence level of 95% was also not demonstrated among the results of dowel joint tensile and compression tests.
3. *Via* a single-factor analysis of variance test, a statistically significant difference ($P = 0.000147$) at a confidence level of 95% was demonstrated for the bending

moments for triple tenon and mortise and for dowel joints. Specifically, this was a 49% difference in the tensile test and 52% in compression between both joints.

4. The bonded surface of the tested triple tenon and mortise (10261 mm²) had a 29% greater bonded surface size compared to the dowel joints (7298 mm²) that were commercially made, which significantly affected the rigidity of the corner joints, and the size of the bending moment.
5. Given the measured results and the increasing demands and requirements for load bearing of fillings of a frame structure, it was better to particularly prioritize tenon and mortise as a type of corner joint for large windows. Adversely, dowel joints could be used successfully for smaller windows.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was conducted with the financial support from the Internal Grant Agency of the Faculty of Forestry and Wood Sciences at the Czech University of Life Sciences Prague, Project No. B01/16.

REFERENCES CITED

- Altinok, M., Döngel, N., Sögütlü, C., and Doruk, Ş. (2010). "Determination of diagonal compression performance of the wooden joinery corner joints with mortise and tenon," *Journal of Forestry Faculty* 10(2), 96-101.
- Altinok, M., Doruk, Ş., Arslan, A. R., and Gürleyen, L. (2013). "Determination of the effects of wood types and impregnation process in performance of the window frames corner joints," *Wood Research* 58(2), 275-284.
- Altinok, M., and Kiliç, A. (2004). "Determination of bonding performances of modified polyvinylacetate (PVAC) and Klebit 303 (K.303) adhesives in different hot-surroundings," *Journal of Engineering Sciences* 10(1), 73-80.
- Bahlmann, H. (2011). "Fensterelement," in German, (<https://www.google.com/patents/DE102011103196B4?cl=de>), 26 November 2016.
- Bomba, J., Šedivka, P., Böhm, M., and Devera, M. (2014). "Influence of moisture content on the bond strength and water resistance of bonded wood joints," *BioResources* 9(3), 5208-5218. DOI: 10.15376/biores.9.3.5208-5218.
- DIN 68 121-1 (1993). "Timber profiles for windows and window doors; dimensions, quality requirements," German Institution for Standardization, Berlin, Germany.
- Eckelman, C. A. (1971). "Bending strength and moment-rotation characteristics of two-pin moment resisting dowel joints," *Forest Products Journal* 21(3), 35-39.
- Efe, H., Zhang, J., Erdil, Y. Z., and Kasal, A. (2005). "Moment capacity of traditional and alternative T-type end-to-side-grain furniture joints," *Forest Products Journal* 55(5), 69-73.
- EN 14220 (2007). "Timber and wood-based materials in external windows, external door leaves and external doorframes -Requirements and specifications," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 204 (2001). "Classification of thermoplastic wood adhesives for-non-structural

- applications," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 514 (2000). "Unplasticized polyvinylchloride (PVC-U) profiles for the fabrication of windows and doors. Determination of the strength of welded corners and T-joints," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Erdil, Y. Z., Kasal, A., and Eckelman, C. A. (2005). "Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints," *Forest Products Journal* 55(12), 209-213.
- Hajdarević, S., and Šorn, Š. (2012). "Effect of the spread adhesive thickness and surface on strength and stiffness of joint," in: *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, UAE, Dubai, pp. 571-574.
- Hochberg, A., Hafke, J. -H., and Raab, J. (2010). *Open/Close: Windows, Doors, Gates, Loggias, Filters*, Birkhäuser, Basel, Switzerland.
- Hrovatin, J., Prekrat, S., Berginc, J., Šernek, M., Zupančič, A., Oblak, L., and Medved, S. (2013a). "Strength comparison of joints at window frames," *Drewno: Prace Naukowe, Doniesienia* 56(189), 127-135. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.030.09
- Hrovatin, J., Zupančič, A., Šernek, M., and Oblak, L. (2013b). "The fracture moment of corner joint bonded by different glues," *Drvna Industrija* 64(4), 335-340. DOI: 10.5552/drind.2013.1248
- ISO 2555 (2015). "Plastics - Resins in the liquid state or as emulsions or dispersions - Determination of apparent viscosity by the Brookfield Test method," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 976 (2013). "Rubber and plastics - Polymer dispersions and rubber latices - Determination of pH," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- İmirzi, H. Ö., Smardzewski, J., and Döngel, N. (2015). "Method for substitute modulus determination of furniture frame construction joints," *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 39, 775-785. DOI: 10.3906/tar-1406-92.
- Jivkov, V., Marinova, A., and Johannes, A. (2008). "Influence of the temperature on the bending strength and stiffness characteristics of glued corner joints of frame structural elements made from solid beech wood," in: *NABYTOK*, Technická univerzita, Zvolen, (pp. 1-10).
- Joščák, P., and Kollár, P. (2007). "Strength characteristics of Hoffmann-Schwalbe corner joints of window sash," in: *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, pp. 291-295.
- Pantaleo, A., Ferri, D., and Pellerano, A. (2013). "Wooden window frames with structural sealants: Manufacturing improvements and experimental validation of a finite element model," *Journal of Adhesion Science and Technology* 28(2), 115-135. DOI: 10.1080/01694243.2013.827093.
- Pantaleo, A., Ferri, D., and Pellerano, A. (2014). "Tests for outdoor window profiles: 90° mortise tenon corner joints strength assessment," *Wood Material Science and Engineering* 11(1), 25-35. DOI: 10.1080/17480272.2014.939712
- Podlena, M., and Borůvka, V. (2016). "Stiffness coefficients of mortise and tenon joints used on wooden window profiles," *BioResources* 11(2), 4677-4687. DOI: 10.15376/biores.11.2.4677-4687.
- Podlena, M., Borůvka, V., and Bomba, J. (2015). "The strength determination of corner joints used for wooden windows," in: *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, pp. 149-153.
- Ratnasingam, J., and Ioras, F. (2013). "Effect of adhesive type and glue-line thickness on

- th fatigue strength of mortise and tenon furniture joints," *European Journal of Wood and Wood Products* 71, 819-821. DOI: 10.1007/s00107-013-0724-1.
- Simeonova, R., Marinova, A., and Jivkov, V. (2015). "Study on stiffness coefficients under bending test of end corner detachable joints of structural elements made of plywood," *Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design* 1(7), 59-66.
- Tankut, N. (2007). "The effect of glue and glueline thickness on the strength of mortise and tenon joints," *Wood Research* 52(4), 69-78.
- Warmbier, K., and Wilczyński, A. (2000). "Strength and stiffness of dowel corner joints: Effect of joints dimensions," *Folia Forestalia Polonica* 31(seria B), 29-41.
- Wilczyński, A., and Warmbier, K. (2003). "Effect of joint dimensions on strength and stiffness of tenon joints," *Folia Forestalia Polonica* 34(seria B), 53-66.

Article submitted: December 26, 2016; Peer review completed: March 30, 2017; Revised version received and accepted: April 13, 2017; Published: April 25, 2017.
DOI: 10.15376/biores.12.2.4202-4213

Článek 3: Axial Loading of Different Single-pin Dowels and Effect on Withdrawal Strength (Podlena et al. 2018)

Axial Loading of Different Single-pin Dowels and Effect on Withdrawal Strength

Milan Podlena, Štěpán Hýsek,* Jiří Procházka, Martin Böhm, and Jan Bomba

Withdrawal strengths of commercially available hardwood dowels were examined in this work. Multi-grooved dowels with a straight surface pattern and with pre-glued polyvinyl acetate (PVAc) were tested. Additionally, standard dowels with different single- and multi-grooved surface patterns were also tested, which were not pre-glued. Standard dowels were bonded with two types of PVAc and one type of polyurethane (PUR) adhesive. The influence of the type of dowel, the surface pattern, the dowel diameter, and the type of adhesive used on the dowel joint strength were investigated. Lower average strengths were observed for single-grooved dowels with a spiral pattern (4.9 MPa); failures generally occurred at the first or second thread of the spiral groove. For the pre-glued dowels, there were differences in the observed strengths, which depended upon how the PVAc adhesive was activated. Lower withdrawal strengths were noted for the pre-glued dowels when they were activated by dipping them in water (3.0 MPa) *versus* adding water directly to the pre-drilled holes (4.7 MPa to 5.4 MPa).

Keywords: Multi-grooved; Single-grooved; Pre-glued; Wood; Dowels; Withdrawal strength; Adhesive

Contact information: Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, 165 21 Prague 6 – Suchbát, Czech Republic; *Corresponding author: hyseks@fld.czu.cz

INTRODUCTION

Wooden dowels are one type of fastener for joints in wooden constructions. There are currently a wide range of types and sizes of wooden dowels available on the market. Their nominal dimensions are usually given in SI (Metric) or customary (English) units. To apply joints in structures, it is first necessary to understand their load bearing behavior to select the correct joint design with respect to the material parameters. For this study, some of the dowels have already been tested *via* the methods shown in Fig. 1.

The first group of methods are strength tests measuring the load bearing capacity of dowel joints under compression (Figs. 1a to 1c) and tension (Fig. 1d) under a bending moment. Dalvand *et al.* (2014) and Zhang and Eckelman (1993) ascertained that the diameter of the dowel and depth of penetration have a significant effect on the bending moment for tests under compression. For example with 19-mm plywood, the highest strength was achieved when increasing the dowel size from 6 mm to 8 mm. However, when the dowel size was increased to 10 mm, there was a decrease in the bending moment (Dalvand *et al.* 2014). When multi-pin dowel connection is used, it depends, in addition to the diameter and depth of the dowels, also on the number of dowels and their spacing (Derikvand and Ebrahimi 2015). Moreover, bending moment can be also derived during the testing of torsional strength (Fig. 1e). This method is a different case of dowel testing for furniture frames (Zhang *et al.* 2002b).

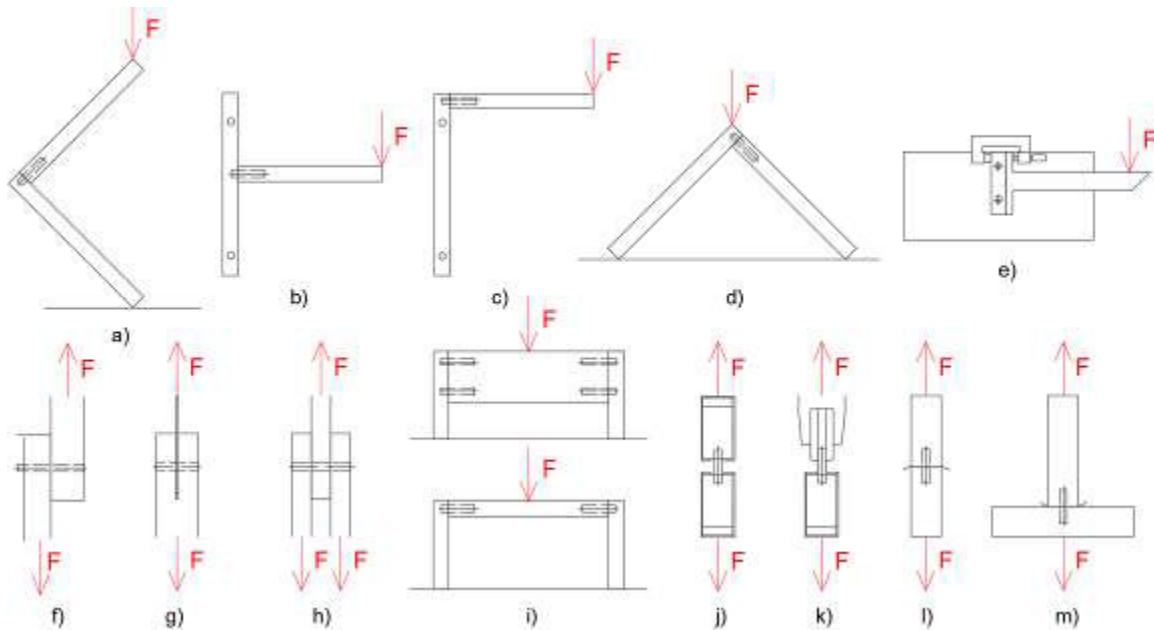


Fig. 1. Methods of dowel testing: a) Compression loading test of “L” type corner joint (Šimek *et al.* 2010; Dalvand *et al.* 2014; Derikvand and Ebrahimi 2015); b) Compression loading test of “T” type corner joint (Eckelman 1971, 1979; Zhang *et al.* 2001); c) Compression loading test of “L” type corner joint (Ahmad *et al.* 1993); d) Tension loading test of “L” type corner joint (Zhang and Eckelman 1993; Tankut 2005; Yerlikaya 2012); e) Torsional test (Zhang *et al.* 2002b); f) Single-shear test (Bocquet *et al.* 2007; Milch *et al.* 2017); g) Double-shear test (steel-to-timber) (Dorn *et al.* 2013); h) Double-shear test (timber-to-timber) (Santos *et al.* 2009; Oudjene and Khelifa 2010; Resch and Kaliske 2010); i) Lateral test test (Zhang *et al.* 2002a); j) Edge withdrawal test (Ahmad *et al.* 1993); k) Edge withdrawal test (Uysal 2005; Yapici *et al.* 2011; Özcan *et al.* 2013); l) Edge withdrawal test (Eckelman 1969; Jensen *et al.* 2001); and m) Face withdrawal test (Eckelman and Cassens 1985; Uysal 2005; Özcan *et al.* 2013)

Dowels are also often subjected to the shear stress in timber engineering (*e.g.*, beams) in two main stresses. The first is a single shear dowel-type joint (Figs. 1f) (Bocquet *et al.* 2007; Milch *et al.* 2017). A shear plane is located between two members that are connected with a dowel. A double shear testing (Figs. 1g and 1h) has been tested in relation with steel-to-timber (Dorn *et al.* 2013) and with timber-to-timber connections (Santos *et al.* 2009; Oudjene and Khelifa 2010). These investigations tend to be analysed by finite element modeling that helps to determinate the load-carrying capacity without experimental testing (Santos *et al.* 2009; Oudjene and Khelifa 2010; Resch and Kaliske 2010). Moreover, Zhang *et al.* (2002a) reported about lateral shear strengths for horizontal and vertical rail directions for furniture applications (Fig. 1i).

Edge withdrawal tests (Figs. 1j to 1l), or face withdrawal tests (Fig. 1m), can be summarized in the last group of testing methods. For example, beech dowels with diameters of 6 mm, 8 mm, and 10 mm were used in the control samples of particleboard and medium-density fiberboard (MDF). The highest withdrawal strength was observed when using 6-mm dowels with particleboard, whereas for MDF, the highest strength was observed for 10-mm dowels (Kurt *et al.* 2009). This noted difference is explained by the boards' composition and their homogeneity. Of all of the above-mentioned tests, this method aptly measures the shear stress of dowels in different materials; hence, this method was selected for the testing of various dowels in this investigation.

EXPERIMENTAL

Materials

Rectangular prisms (20 mm × 20 mm × 75 mm) that were used to anchor the tested dowels were fabricated from beech wood (*Fagus sylvatica*) (Jaroslav Blažek, Roudnice nad Labem, Czech Republic). Prior to processing, the wood was left at room temperature (20 °C). The mass and volume of the test samples were determined and used to calculate density in accordance with ČSN 49 0108 (1993); the moisture content of the prisms was measured in accordance to ČSN 49 0103 (1979). These property values were ascertained once the sample mass was stabilized when the specimen was conditioned in a climate controlled chamber at 20 °C and 65% relative humidity.

Two rectangular prism members were axially connected using one dowel with an adhesive; a hole was drilled in the centre of each specimen to accommodate the dowel. Each hole was drilled using a horizontal drilling machine VD 20 R (Houfek, Golčův Jeníkov, Czech Republic) perpendicular to the prism face using a spiral drill bit (8-mm diameter) to a depth of 21 mm. A glued dowel was first inserted into the hole and pressed down to the bottom.

Then, the polyethylene film (30 mm × 30 mm × 0.2 mm) was rolled over the dowel. The film had an 8-mm circular hole made with a hollow punch tool. The film limits face-to-face gluing of the two prism members by excess adhesive extrusion during joint assembly. Hence, the withdrawal strength test is limited to shear stresses.

The test specimens were then clamped according to the configuration shown in Fig. 2 for 24 h for the adhesive to cure completely. The glued specimens were then conditioned in a constant climate chamber HPP750 (Mettmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Germany) at 20 °C and 65% relative humidity until constant mass was obtained.

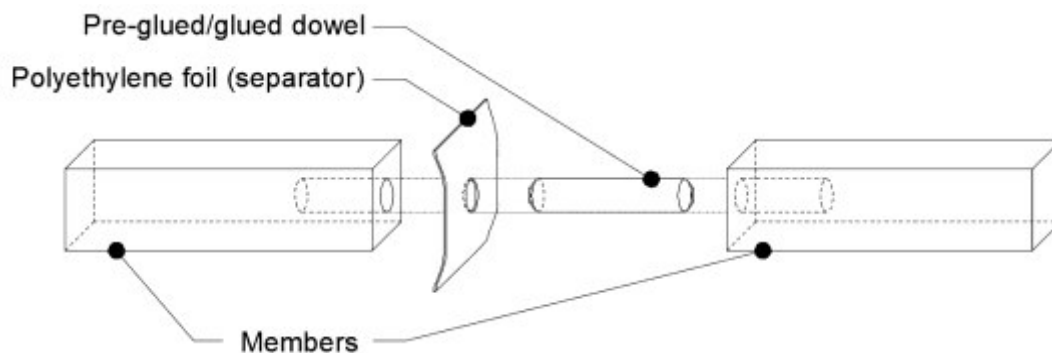







Fig. 2. Assembly of a typical test specimen used for the withdrawal test

The tested dowels had a cylindrical shape with a circular cross-section; the edges on the ends were chamfered (2 mm × 2 mm). Five hardwood dowels with different surface designs and characteristics were tested, all of which were obtained from commercial manufacturers (Table 1). A total of 12 test specimens was prepared for each series of the dowel. The dimensions of the dowels were checked using a sliding caliper (Kinex Measuring, Prague, Czech Republic) for calculating the surface area of dowels that are used for joint strength determinations.

Table 1. Designs and Characteristics of the Tested Dowels

Dowel Type	Surface Pattern		Adhesive	Wood Species	Dowel Dimension	Company and Location
Multi-grooved	Straight		Re-moisturizing PVAc (Pre-glued Dowel)	Beech	8 mm × 38 mm	HandyCT, Bridgeport, CT, USA
			Re-moisturizing PVAc (Pre-glued Dowel)		8 mm × 40 mm	KWB Germany GmbH, Stuhr, Germany
			None			Marušik Holz, Ostrava, Czech Republic
	Helical					
Single Grooved	Spiral			Maple	7.94 mm × 50.8 mm*	Rockler Woodworking and Hardware, Medina, MN, USA

* Reduced to 40 mm

Pre-glued dowels had applied re-moisturizing polyvinyl acetate (PVAc) adhesives on the surface, and they are activated when contacted with water. The adhesives were activated according to the instructions provided by the dowel's manufacturers. Pre-glued dowels manufactured by HandyCT were activated by water added directly to the hole of the prism member, which was filled to 1/3 of the hole's opening (*ca.* 0.35 mL) using a pipette. Alternatively, the dowels manufactured by KWB Germany GmbH were dipped for 5 s in water, allowed to drain for 5 s, and then inserted into the holes of the prism members to be joined.

When gluing standard dowels (*i.e.*, not pre-glued), the dowels and the holes of the prism members were coated with 0.2 g of the selected adhesive; the mass of the adhesive was weighed on a laboratory scale PS 4500.R2 (Radwag Váhy, Šumperk, Czech Republic). Two types of thermoplastic PVAc adhesives and one polyurethane (PUR) adhesive (Table 2) were examined. The glues are single-component adhesives and classified into durability grading according to the EN 204 (2001) standard. Tests of adhesives were performed in accordance to the EN 205 (2003) standard to measure and compare the differences in joint shear strengths.

Table 2. Classification of Dowel Adhesives Used in This Study from Product Datasheets

Adhesive Type	PVAc		PUR
Manufacturer and Location	H. B. Fuller Europe GmbH, Zurich, Switzerland	Adolf Würth GmbH & Co. KG, Künzelsau, Germany	Lear, Brno, Czech Republic
Product Name	Rakoll GXL 4	1K-Holzkalteim D4	Lear D4
Durability Class	D4		D4 (C4)
Density	1 g/cm ³	1.1 g/cm ³	*
pH Value	<i>ca.</i> 3.5	<i>ca.</i> 3	*
Viscosity	5500 mPa·s	<i>ca.</i> 7000 mPa·s	4000 to 6000 mPa·s

* Not specified in manufacturer's datasheet

Methods

Dowel strength testing was performed using a TIRATEST 2850 universal testing machine (TIRA GmbH, Schalkau, Germany); measured values were recorded using TIRATEST System 4.6.0.40 software (TIRA GmbH, Schalkau, Germany). The testing machine was equipped with clamps for the standard tensile test (Fig. 3). Once the sample was clamped in the axis of the applied load force, a tensile force was applied to the test specimen by the machine. The crosshead speed was set to a constant 10 mm/min. During the tensile test, the stresses and strains were recorded, as well as the maximum force exerted (F_{max}) when the test joint failed. Tensile tests were conducted at a constant temperature of 20 °C; tests were performed on specimens that were immediately removed from the climate conditioning chamber.

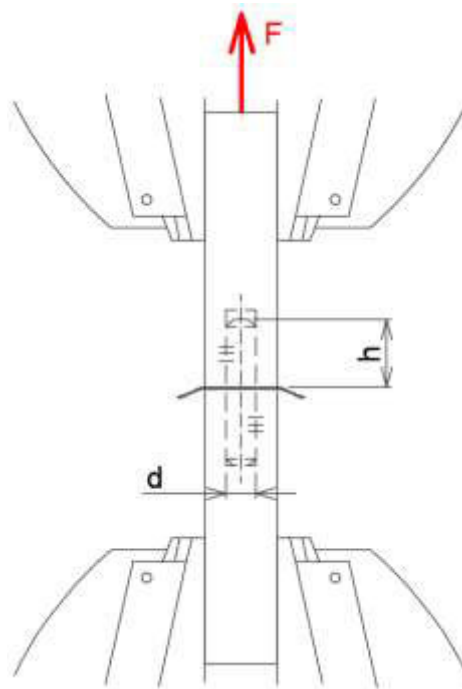


Fig. 3. Withdrawal strength test set-up of a sample with the universal testing machine

The withdrawal strength (σ), or shear stress, was calculated for each test specimen according to Eq. 1, based on the area of the surface area (A) from which the joint failed at F_{max} . The equation for calculating the withdrawal strength of the dowel is (Uysal 2005; Yapici *et al.* 2011; Özcan *et al.* 2013) as follows:

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{F_{max} \text{ (N)}}{A \text{ (mm}^2\text{)}} = \frac{F_{max} \text{ (N)}}{2\pi r \times h \text{ (mm}^2\text{)}} = \frac{F_{max} \text{ (N)}}{2\pi \left(\frac{d}{2}\right) \times h \text{ (mm}^2\text{)}} = \frac{F_{max} \text{ (N)}}{\pi d \times h \text{ (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

The bonded surface area was based on the cylindrical shape of the dowel with height h (mm) and diameter d (mm) as shown in Fig. 3. The resulting data were analyzed using descriptive statistics and an analysis of variance (ANOVA) with Statistica computer software (StatSoft Inc., version 13.3, Tulsa, OK, USA). A one-way analysis of variance was used and the Tukey test was employed in order to determine the significant differences between group means. A significance level of $\alpha = 0.05$ was used.

RESULTS AND DISCUSSION

The withdrawal strengths of the commercially available dowels of Table 1 were evaluated and compared in this study. The results are presented in Table 3. The dependence of withdrawal strengths of the dowels was influenced by the following factors: dowel type, surface pattern, adhesive type, and dowel diameter. The average density of the beech test specimens was 766 kg/m³ when conditioned at 20 °C and 65% relative humidity; the moisture content of the specimens was 11.9%.

Table 3. Withdrawal Strength Results of the Tested Dowels

Dowel Type	Multi-grooved								Single Grooved		
Surface Pattern	Straight		Straight			Helical			Spiral		
Dowel Manufacturer	HandyCT	KWB Germany GmbH	Marušik Holz						Rockler Woodworking and Hardware		
Adhesive	Re-moisturizing PVAc (Pre-glued Dowel)	Re-moisturizing PVAc (Pre-glued Dowel)	Rakoll GXL 4	1K-Holzkalteim D4	Lear D4	Rakoll GXL 4	1K-Holzkalteim D4	Lear D4	Rakoll GXL 4	1K-Holzkalteim D4	Lear D4
Mean (MPa)	4.7	3.0	6.7	6.6	7.5	6.9	7.9	6.8	4.9	4.9	6.0
Median (MPa)	4.6	2.8	6.5	6.3	7.8	6.7	7.9	6.8	5.1	4.9	6.3
Standard Deviation (MPa)	0.5	0.5	1.1	1.3	1.5	0.8	1.0	1.5	0.8	0.6	0.9
Minimum (MPa)	4.2	2.4	5.1	4.6	4.7	5.8	6.4	4.4	3.8	4.2	4.5
Maximum (MPa)	5.7	4.0	9.0	8.4	9.4	8.3	9.7	9.2	6.6	5.9	7.6
Coefficient of Variation (%)	10.3	16.9	16.6	19.2	20.4	11.2	13.0	21.7	17.1	11.9	15.4
Number of Valid Replications	12										

A one-way ANOVA was performed using a 95% significance level ($\alpha = 0.05$) to ascertain statistical differences in withdrawal strengths of dowels from HandyCT (4.7 MPa) and KWB Germany GmbH (3.0 MPa) (Fig. 4). The ANOVA indicated that the withdrawal strength differences with these dowels were statistically significant. Both beech dowel designs were multi-grooved with a straight surface pattern, and they were conditioned to constant mass so that the moisture content was stabilized. In this case, these factors could be excluded from contributing to the withdrawal strength difference. Otherwise, different moisture content in the PVAc adhesive can decrease joint strength (Tankut 2007; Bomba *et al.* 2014). Before gluing, the color of re-moisturizing adhesives indicated that PVAc covers the entire surface of all dowels with a sufficient quantity of adhesive. However, the activation method of re-moisturizing PVAc adhesive was observed as a main effect to the withdrawal strength.

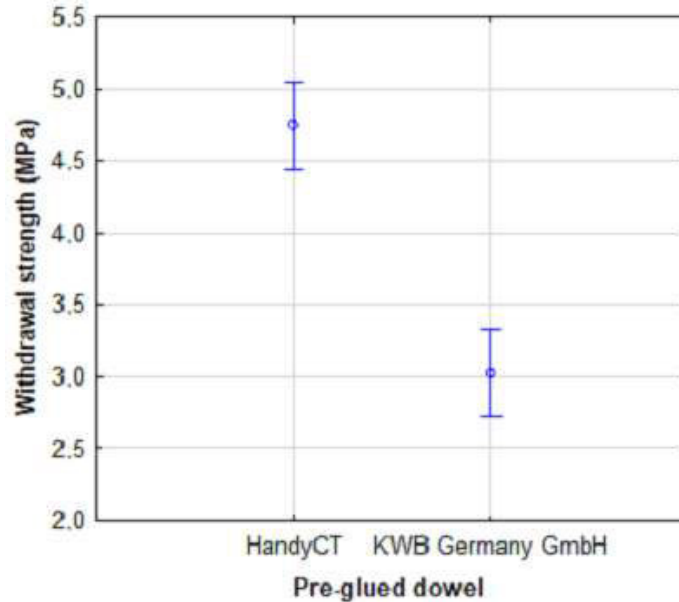


Fig. 4. Comparison of withdrawal strength of pre-glued dowels with one-way ANOVA at a 95% significance level ($\alpha = 0.05$)

The adhesive with pre-glued dowels from HandyCT was activated by water addition to the pre-drilled holes according to the instructions provided by HandyCT. The withdrawal strength of the pre-glued dowels from HandyCT (4.7 MPa) was statistically higher ($p < 0.05$) when compared to those from KWB Germany GmbH (3.0 MPa). According to the instructions from KWB Germany GmbH, the pre-glued PVAc adhesive on the dowel was activated by dipping the dowel in water. However, when the dowel was placed into the hole, the adhesive was wiped from the dowel's surface, and the adhesive remained at the edge at the top of the hole. It is visible in the section of test specimens after loading that adhesives did not leave any colour stain inside of the hole in comparison to the other application method (Fig. 5). Thus, the adhesive did not connect the dowel with the adherend and a poor bond was created, which resulted in a low withdrawal strength. Therefore, the dowels from KWB Germany GmbH were retested using the same glue activation method as dowels from HandyCT, *i.e.*, the adhesive was activated with water in the pre-drilled hole. This test confirmed that the method of activating the adhesive of pre-glued dowels affected its withdrawal strength. The withdrawal strength of KWB GmbH dowels increased to 5.4 MPa when the adhesive was activated *via* the addition of water into the hole. Due to the coloured adhesive, the section of test specimens shows how uniformly was the adhesives spread out over the entire area of the hole with an activation of PVAc in a hole (Fig. 5).

The shear strength of commercial adhesives on standard dowels without pre-gluing was performed on test specimens in accordance with the EN 205 (2003) standard under controlled conditions. It was observed that the strongest joints were obtained by using Rakoll GXL 4 adhesive (17.0 MPa), which was followed by 1K-Holzkalteim D4 adhesive (13.7 MPa), followed by the weakest joints obtained with Lear D4 adhesive (11.8 MPa). A statistically significant difference was observed among these shear strength values ($p < 0.05$) using the various adhesives.

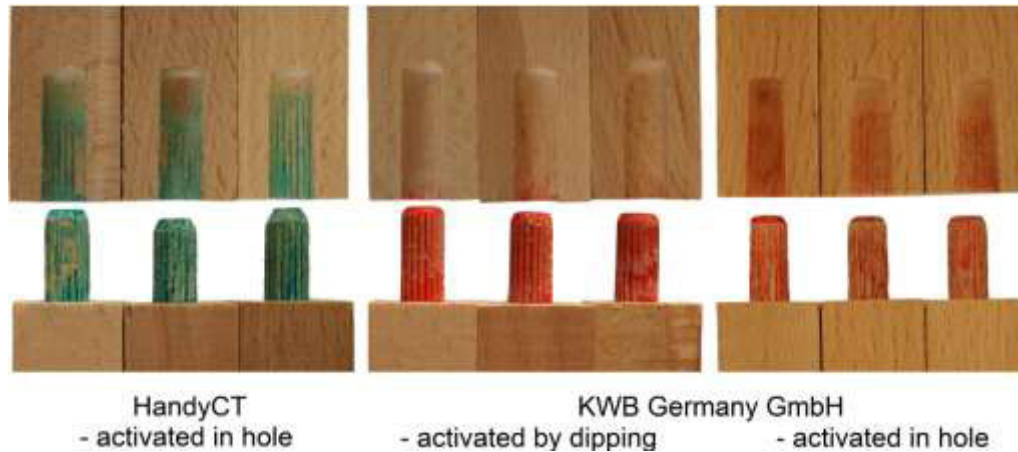


Fig. 5. Failure of pre-glued dowels

However, when collectively comparing the measured shear strengths of various dowel surface patterns (*i.e.*, straight, helical, and spiral) with the individual adhesives, it was observed that the specific adhesive used did not have a statistically significant effect on the strength of the dowel joints ($p > 0.05$). Hence, when comparing the withdrawal strength of the dowels, it is necessary to take into account other factors than just the adhesive used, such as the dowel's wood species, grooved surface pattern, and diameter.

A sufficient amount of commercial adhesive was always applied when preparing the test specimens, which was observed when excessive adhesive was expelled when inserting the dowel into the pre-drilled hole. This was especially observed for the PUR adhesive (Lear D4) as it foamed during its curing. This foaming of the PUR adhesive likely caused the high coefficient of variation of the withdrawal strength (15.4% to 21.7%) when compared to PVAc adhesives (11.2% to 19.2%), which has been suggested by Hýsek *et al.* (2018). The chamfered edges of all the dowels assisted in their complete insertion into the pre-drilled holes. Then, the adhesive was distributed to the sides of the hole through the different surface pattern of dowels.

The effect of the surface groove patterns of dowels manufactured by Marušík Holz was evaluated. Both multi-grooved dowels with straight and helical grooving were manufactured from beech wood where wood fibers were compressed. It helped to provide a better-bonded surface, due to the wood swelling. The most often observed cohesive failure mode was a combined failure, taking place both in the adherend and in the adhesive layer. The same failure mode was observed for all tested adhesives. As can be seen, the fractions of adherend partially remained on the dowels after loading (Figs. 6a and 6b).

Multi-grooved dowels with a helical pattern had the highest average withdrawal strength value (7.9 MPa) when bonded with 1K-Holzkaltleim D4 (PVAc adhesive). In contrast, multi-grooved dowels with a straight pattern had a value 6.6 MPa, which was 16.5% lower than that of the helical pattern. The expectation was that the multi-grooved dowels with helical grooving will have the highest withdrawal strength of all tested dowels due to: the larger surface area, swelling of the compressed fibers, and the possibility of better adhesive layering on the surface. When the joints were bonded with Rakoll GXL 4 (PVAc adhesive), the multi-grooved dowels with a helical surface pattern yielded an average withdrawal strength that was only 2.9% higher than that of the multi-grooved dowels with a straight surface pattern (6.9 MPa *versus* 6.7 MPa, respectively).

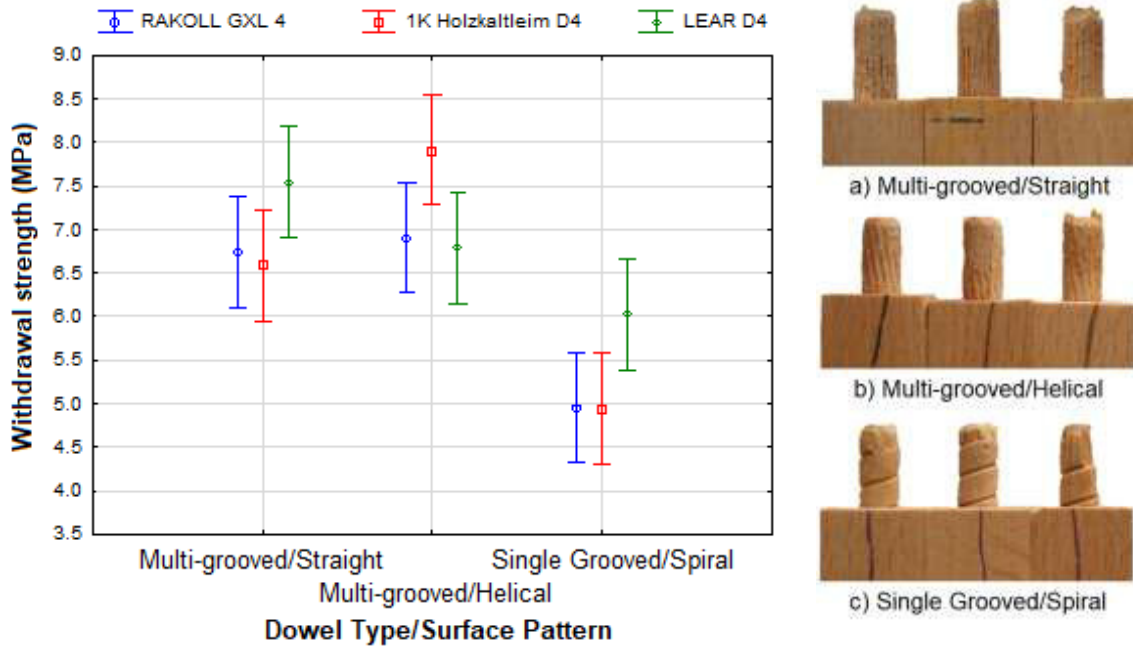


Fig. 6. Multiple means paired comparisons (*post hoc* Tukey test) of withdrawal strengths of dowel types at 95% significance level; failure mode of dowels (a – Multi-grooved/Straight; b - Multi-grooved/Helical; c – Single grooved/Spiral) bonded with Rakoll GXL 4 adhesive

In the case with the PUR adhesive (Lear D4), there was a 9.3% difference observed in the withdrawal strength of multi-grooved dowels with a straight *versus* helical surface pattern. A *post-hoc* data analysis was performed using Tukey’s test of multiple paired means to determine the least significance difference (LSD) at the 95% level ($\alpha = 0.05$). The results of this statistical analysis are presented in Table 4

Table 4. P-Values from Multiple Means Paired Comparisons from Table 3 Using the Tukey Test

		Multi-grooved /Straight			Multi-grooved /Helical			Single Grooved /Spiral		
		Rakoll GXL 4	1K-Holzkaltleim D4	Lear D4	Rakoll GXL 4	1K-Holzkaltleim D4	Lear D4	Rakoll GXL 4	1K-Holzkaltleim D4	Lear D4
Multi-grooved/ Straight	Rakoll GXL 4		1.000	0.684	1.000	0.195	1.000	0.004	0.004	0.805
	1K-Holzkaltleim D4	1.000		0.451	0.999	0.088	1.000	0.013	0.012	0.943
	Lear D4	0.684	0.451		0.882	0.996	0.744	0.000	0.000	0.027
Multi-grooved /Helical	Rakoll GXL 4	1.000	0.999	0.882		0.384	1.000	0.001	0.001	0.575
	1K-Holzkaltleim D4	0.195	0.088	0.996	0.384		0.237	0.000	0.000	0.002
	Lear D4	1.000	1.000	0.744	1.000	0.237		0.003	0.003	0.750
Single Grooved /Spiral	Rakoll GXL 4	0.004	0.013	0.000	0.001	0.000	0.003		1.000	0.308
	1K-Holzkaltleim D4	0.004	0.012	0.000	0.001	0.000	0.003	1.000		0.299
	Lear D4	0.805	0.943	0.027	0.575	0.002	0.750	0.308	0.299	

Statistical differences at 95% significance level in bold ($P < 0.05$)

The analysis indicated that there were no significant statistical differences (*i.e.*, $p > 0.05$) in strength among the multi-grooved dowels with straight *versus* helical patterns. When Ahmad *et al.* (1993) compared straight-grooved and spiral-grooved dowels, the highest withdrawal force was measured for spiral-grooved dowels. These dowels were manufactured from three various wood species (nyatoh, ramin, and rubberwood). A total difference 5.8% of average withdrawal force between spiral-grooved and straight-grooved dowels was measured. The same effect showed Eckelman and Cassens (1985) when dowels with various surface grooving were tested in two types of particleboards.

The worst performing dowels were those for which the adhesive was applied to the single-grooved spiral dowel. Figure 6c shows how the grooved spiral dowels failed. Although the shear strength of maple wood (11 MPa) is higher than beech wood (10 MPa) according to the DIN 68364 (2003) standard, the single-grooved spiral dowel made from maple was weaker than those dowels with a multi-grooved pattern made from beech, even with a low single-grooved angle. The joints made with single-grooved dowels always failed at the first to second thread, regardless of the type of adhesive used. The highest average strength of single-grooved spiral dowels was observed with the Lear D4 adhesive (6.0 MPa), likely due to foaming capability of PUR adhesives. Single-grooved spiral dowels bonded with both PVAc achieved 1.1 MPa less (4.9 MPa) than with PUR adhesive, and the difference was statistically significant ($p < 0.05$).

All of the tested dowels were commercially machine-made; their measured diameters (Table 5) had low coefficients of variations (0.7% to 1.1%), which indicated that the dowels were made with a high level of precision. The one-way ANOVA indicated that the diameters of pre-glued dowels from HandyCT and KWB Germany GmbH were significantly different ($p < 0.05$). In contrast, the diameters of multi-grooved straight and helical dowels (Marušik Holz) did not differ significantly ($p > 0.05$).

Table 5. Measured Diameters of the Tested Dowels Prior to Bonding

Dowel Type	Multi-grooved			Single Grooved
	Straight		Helical	Spiral
Pattern				
Dowel Manufacturer	HandyCT	KWB Germany	Marušik Holz	Rockler Woodworking and Hardware
Mean (mm)	8.11	8.01	7.93	7.86
Median (mm)	8.10	8.00	7.93	7.87
Standard Deviation (mm)	0.09	0.08	0.09	0.09
Minimum (mm)	7.97	7.90	7.65	7.67
Maximum (mm)	8.24	8.19	8.11	8.01
Coefficient of Variation (%)	1.1	1.0	1.1	1.1
Number of valid replicates	12		36	

The diameters of single-grooved dowels (7.86 mm) were the smallest amongst all the dowels tested; the manufacture of single-grooved dowels indicated they had a nominal diameter of 7.94 mm (*i.e.*, 5/16 in.) The manufacturers of the other dowel types indicated they had nominal diameters of 8 mm, whereas the measured diameters were between 7.65 mm for multi-grooved straight (Marušik Holz) to 8.24 mm for multi-grooved straight

(HandyCT (pre-glued)) dowels. The larger diameters for the pre-glued dowels were due to the applied adhesive layer on the dowels' surfaces, which resulted in tightly fitted joints being formed.

Differences in the diameters of the dowels also caused differences in the bond line thicknesses of the adhesive (up to 0.35 mm). However, the effect of the dowel diameters on withdrawal strengths was not statistically confirmed. Figure 7 illustrates this observation with multi-grooved dowels (with a straight pattern) glued with PVAc adhesives ($R^2 = 0.10$ and $R^2 = 0.23$). When testing different bond line thicknesses (0.01 mm to 0.10 mm) in dowel joints, Ratnasingam and Ioras (2015) reported that the highest fatigue and static strength is achieved with the smallest bond line thicknesses (0.01 mm) using a PVAc adhesive. Bomba *et al.* (2018) noted that the shear strength of joints with dowels, which were tested in accordance to EN 205 (2003), decreased as the bond line thickness of D4 grade adhesives was lowered from 0.5 mm to 0.1 mm. Therefore, the diameter of the single groove dowels in combination with a single groove as the primary influence on low withdrawal strength.

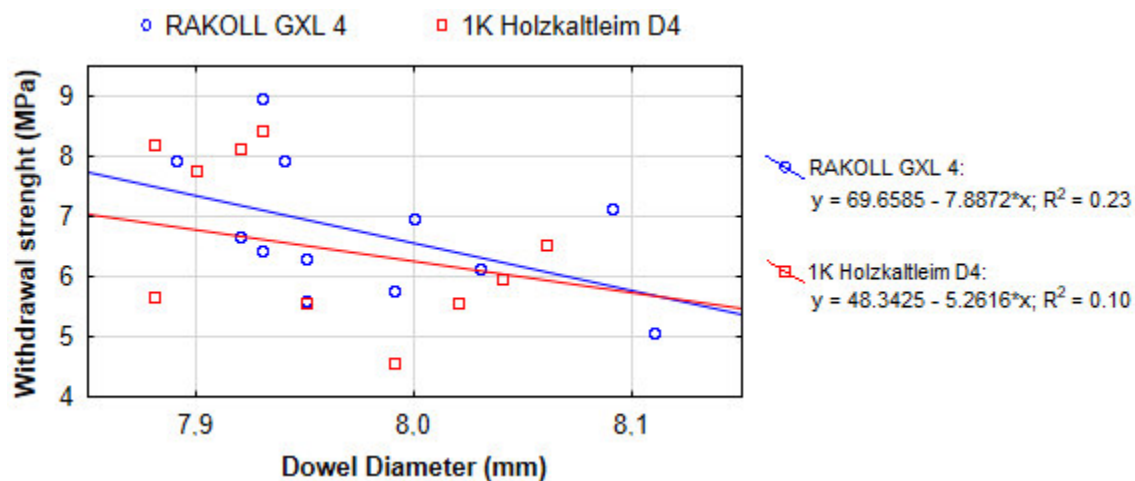


Fig. 7. Dependence of withdrawal strength on the diameter of multi-grooved dowels with a straight pattern (Marušik Holz) when using commercial PVAc adhesives

CONCLUSIONS

1. The highest average withdrawal strength (7.9 MPa) with the tested adhesives was measured for standard multi-grooved dowels with a helical pattern (Marušik Holz) with a PVAc adhesive (1K-Holzkalteim D4).
2. When comparing dowels with the same commercial adhesive, single-grooved dowels with a spiral pattern (Rockler Woodworking and Hardware) and glued with PVAc adhesive (Rakoll GXL 4 and 1K-Holzkalteim D4) had the lowest average withdrawal strength (4.9 MPa). Failure typically occurred after the first to second thread of the groove.
3. The differences in the withdrawal strengths of dowels with different multi-grooved patterns (straight and helical) were not statistically significant ($p > 0.05$) for any of the three adhesives tested.

4. The pre-glued dowels from KWB Germany GmbH were dipped for activation of the PVAc adhesive, which led to a visible wiping-off of the adhesive when the dowel was inserted, creating a poor bond, and thus resulting in a lower strength (3.0 MPa) compared to dowels from HandyCT (4.7 MPa) that were activated by the water from the hole.
5. However, the dowels from KWB Germany GmbH had a 44% higher withdrawal strength (5.4 MPa vs. 3.0 MPa) when activating the pre-glued adhesive using the instructions provided by HandyCT instead of those provided by KWB Germany GmbH.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was financially supported from the Internal Grant Agency of the Faculty and Forestry and Wood Sciences at Czech University of Life Sciences Prague, Project No. B01/18.

REFERENCES CITED

- Ahmad, S., Amin, A. H., Ali, R., and Tahir, H. M. (1993). "Withdrawal and bending strengths of dowels from three Malaysian timbers," *J. Trop. For. Sci.* 6(1), 74-80.
- Bocquet, J., Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H. R., Resch, L., and Michel, D. (2007). "Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels," *J. Adhes. Sci. Technol.* 21(3-4), 301-317. DOI: 10.1163/156856107780684585
- Bomba, J., Šedivka, P., Böhm, M., and Devera, M. (2014). "Influence of moisture content on the bond strength and water resistance of bonded wood joints," *BioResources* 9(3), 5208-5218. DOI: 10.15376/biores.9.3.5208-5218
- Bomba, J., Šedivka, P., Hýsek, Š., Fáber, J., and Oberhofnerová, E. (2018). "Influence of glue line thickness on the strength of joints bonded with PVAc adhesives," *Forest Prod. J.* (in press). DOI: 10.13073/FPJ-D-17-00038
- ČSN 49 0103 (1979). "Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach [Wood. Determination of moisture content at physical and mechanical testing]," Vydavateľství úradu pro Normalizaci a Měření [Publishing of the Office for Standards and Metrology], Prague, Czech Republic.
- ČSN 49 0108 (1993). "Drevo. Zisťovanie hustoty [Wood. Determination of density]," Vydavateľství úradu pro Normalizaci a Měření [Publishing of the Office for Standards and Metrology], Prague, Czech Republic.
- Dalvand, M., Ebrahimi, G., Tajvidi, M., and Layeghi, M. (2014). "Bending moment resistance of dowel corner joints in case-type furniture under diagonal compression load," *J. Forest Res.* 25(4), 981-984. DOI: 10.1007/s11676-014-0481-y
- Derikvand, M., and Ebrahimi, G. (2015). "Rotational stiffness of L-shaped dowel," in: *27th International Conference Research for Furniture Industry*, Gazi University, Ankara, Turkey.
- DIN 68364 (2003). "Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten [Characteristics of wood species - bulk density, modulus of elasticity and

- strengths],” Deutsches Institut für Normung [German Institute for Standardization], Berlin, Germany.
- Dorn, M., De Borst, K., and Eberhardsteiner, J. (2013). “Experiments on dowel-type timber connections,” *Eng. Struct.* 47, 67-80. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.09.010
- Eckelman, C. A. (1969). “Engineering concepts of single-pin dowel joint,” *Forest Prod. J.* 19(12), 52-60.
- Eckelman, C. A. (1971). “Bending strength and moment-rotation characteristics of two-pin moment resisting dowel joints,” *Forest Prod. J.* 21(3), 35-39.
- Eckelman, C. A. (1979). “Out-of-plane strength and stiffness of dowel joints,” *Forest Prod. J.* 29(8), 32-38.
- Eckelman, C. A., and Cassens, D. L. (1985). “Withdrawal strength of dowels from wood composites,” *Forest Prod. J.* 35(5), 55-60.
- EN 204 (2001). “Classification of non-structural adhesives for joining of wood and derived timber products,” European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 205 (2003). “Adhesives – Wood adhesives for non-structural applications- Determination of tensile shear strength of lap joints,” European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Hýsek, Š., Šedivka, P., Böhm, M., Schönfelder, O., and Beran, R. (2018). “Influence of using recycled polyurethane particles as a filler on properties of polyurethane adhesives for gluing of wood,” *BioResources* 13(2), 2592-2601. DOI: 10.15376/biores.13.2.2592-2601
- Jensen, J. L., Koizumi, A., Sasaki, T., Tamura, Y., and Iijima, Y. (2001). “Axially loaded glued-in hardwood dowels,” *Wood Sci. Technol.* 35(1-2), 73-83. DOI: 10.1007/s002260000076
- Kurt, S., Uysal, B., Özcan, C., and Yildirim, M. N. (2009). “The effects of edge banding thickness of uludag bonded with some adhesives on withdrawal strengths of beech dowel pins in composite materials,” *BioResources* 4(4), 1682-1693. DOI: 10.15376/biores.4.4.1682-1693
- Milch, J., Tippner, J., Brabec, M., Sebera, V., Kunecký, J., and Kloiber, M. (2017). “Experimental testing and theoretical prediction of traditional dowel-type connections in tension parallel to grain,” *Eng. Struct.* 152, 180-187. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.067
- Oudjene, M., and Khelifa, M. (2010). “Experimental and numerical analyses of single double shear dowel-type timber joints,” in: *World Conference on Timber Engineering 2010*, Trees and Timber Institute, National Research Council, Sesto Fiorentino, Italy, pp. 476-481.
- Özcan, C., Uysal, B., Kurt, S., and Esen, R. (2013). “Effect of dowels and adhesive types on withdrawal strength in particleboard and MDF,” *J. Adhes. Sci. Technol.* 27(8), 843-854. DOI: 10.1080/01694243.2012.727157
- Ratnasingham, J., and Ioras, F. (2015). “The fatigue characteristics of two-pin moment-resisting dowel furniture joints with different assembly time and glue thickness,” *Eur. J. Wood Wood Prod.* 73(2), 279-281. DOI: 10.1007/s00107-015-0886-0
- Resch, E., and Kaliske, M. (2010). “Three-dimensional numerical analyses of load-bearing behavior and failure of multiple double-shear dowel-type connections in timber engineering,” *Comput. Struct.* 88(3-4), 165-177. DOI: 10.1016/j.compstruc.2009.09.002
- Santos, C. L., Jesus, A. M. P., Morais, J. J. L., and Lousada, J. L. P. C. (2009). “Quasi-

- static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection,” *Constr. Build. Mater.* 23(1), 171-182. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.01.005
- Šimek, M., Haviarová, E., and Eckelman, C. (2010). “The end distance effect of knock-down furniture fasteners on bending moment resistance of corner joints,” *Wood Fiber Sci.* 42(1), 92-98.
- Tankut, A. N. (2005). “Optimum dowel spacing for corner joints in 32-mm cabinet construction,” *Forest Prod. J.* 55(12), 100-104.
- Tankut, N. (2007). “The effect of glue and glueline thickness on the strength of mortise and tenon joints,” *Wood Res.* 52(4), 69-78.
- Uysal, B. (2005). “Withdrawal strength of various laminated veneer dowels,” *Wood Fiber Sci.* 37(2), 213-219.
- Yapici, F., Likos, E., and Esen, R. (2011). “The effect of edge banding thickness of some trees on withdrawal strength of beech dowel pins in composite material,” *Wood Res.* 56(4), 601-612.
- Yerlikaya, N. Ç. (2012). “Effects of glass-fiber composite, dowel, and minifix fasteners on the failure load of corner joints in particleboard case-type furniture,” *Mater. Des.* 39, 63-71. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.02.024
- Zhang, J., Erdil, Y. Z., and Eckelman, C. A. (2002a). “Lateral holding strength of dowel joints constructed of plywood and oriented strandboard,” *Forest Prod. J.* 52(7/8), 83-89.
- Zhang, J., Erdil, Y. Z., and Eckelman, C. A. (2002b). “Torsional strength of dowel joints constructed of plywood and oriented strandboard,” *Forest Prod. J.* 52(10), 89-94.
- Zhang, J.-L., and Eckelman, C. A. (1993). “The bending moment resistance of single-dowel corner joints in case construction,” *Forest Prod. J.* 43(6), 19-24.
- Zhang, J.-L., Quin, F., and Tackett, B. (2001). “Bending strength and stiffness of two-pin dowel joints constructed of wood and wood composites,” *Forest Prod. J.* 51(2), 29-35.

Article submitted: March 2, 2018; Peer review completed: May 5, 2018; Revised version received and accepted: May 11, 2018; Published: May 17, 2018.

DOI: 10.15376/biores.13.3.5179-5192