VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 426

ISSN 1213-4198

Ing. Petr Hradil

Analýza působení polotuhých mechanických spojů v dřevěných konstrukcích

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

Ing. Petr Hradil

ANALÝZA PŮSOBENÍ POLOTUHÝCH MECHANICKÝCH SPOJŮ V DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍCH

ANALYSIS OF SEMI-RIGID BEHAVIOUR OF MECHANICAL JOINTS IN TIMBER STRUCTURES

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor:	Teorie konstrukcí
Školitel:	doc. Ing. Bohumil Straka, CSc.
Oponenti:	prof. Ing. Jiří Studnička, DrSc. doc. Ing. Ferdinand Draškovič, Ph.D. doc. Ing. Ján Kanócz, CSc.
Datum obhajoby:	25. 9. 2007

KLÍČOVÁ SLOVA
dřevo, spoje ocel-dřevo, vkládané styčníkové plechy, kolíky, tuhost

KEYWORDS
steel-to-timber connections, slotted-in plates, rigidity

Práce je k dispozici na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí
Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

V práci jsou publikovány závěry z výzkumu provedeného na pracovištích:

- Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně
- Laboratory of Bridge Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo.

© Petr Hradil, 2007
ISBN 978-80-214-3513-1
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD 5
1.1 Spoje s vkládanými styčníkovými plechy 5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 7
2.1 Zaměření práce 7
2.2 Metodika práce 7
3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY 8
3.1 Nelineární modely polotuhého chování spoje 8
3.2 Evropský nosný a přetvárný model 8
3.3 Chování spoje závislé na teplotě, vlhkosti a době trvání zatížení 11
3.4 Další přístupy 11
4 ANALÝZA SPOJŮ NAMÁHANÝCH TAHEM 12
4.1 Zkušební tělesa 12
4.2 Teoretická analýza řešených spojů 13
4.3 Experimentální analýza řešených spojů 13
4.4 Metoda vyhodnocení dat naměřených videoextenzometrem 14
4.5 Shrnutí analýzy spojů namáhaných tahem 15
5 ANALÝZA SPOJŮ NAMÁHANÝCH OHYBEM A SMYKEM 17
5.1 Zkušební tělesa 17
5.2 Teoretická analýza řešených spojů 17
5.3 Experimentální analýza řešených spojů 18
5.4 Vyhodnocení výsledků 18
5.5 Shrnutí analýzy spojů namáhaných ohybem 19
Vliv technologie a způsobu výroby spoje *20*
Vliv štíhlosti kolíkových spojovacích prostředků *20*
6 ZÁVĚR 21
7 LITERATURA A POUŽITÉ MATERIÁLY 22
8 CURRICULUM VITAE 26
9 ABSTRACT 27

1 ÚVOD

V dřevěných konstrukcích ovlivňují spoje zásadním způsobem chování a celistvost konstrukce. Jsou často nejslabším článkem konstrukčního sytému, a proto musí být věnovaná mimořádná pozornost jejich navrhování a optimalizaci. Dřevo je zde obvykle vystaveno složitému prostorovému namáhání a selhání spoje může být zapříčiněno několika různými způsoby porušení současně. V současnosti velice dobře zdokumentované chování spojů s jedním spojovacím prostředkem se nedá jednoduše zobecnit na spoje s více spojovacími prostředky. Existuje jen málo závěrů z experimentálních výzkumů takových spojů zejména vzhledem k jejich vysoké technické a finanční náročnosti. Nejpoužívanější analytické modely vychází z předpokladu ideálně pružně plastického chování dřeva, který nedokáže zohlednit možnost křehkého porušení jako je rozštěpení nebo blokové smykové porušení.

Optimálním návrhem geometrie spoje, jeho precizním provedením a přísnou kontrolou kvality a jakosti materiálu může být docíleno vysokých únosností a tuhostí mechanických spojů, které je možné dále zvyšovat využitím moderních materiálů a technologií.

1.1 SPOJE S VKLÁDANÝMI STYČNÍKOVÝMI PLECHY

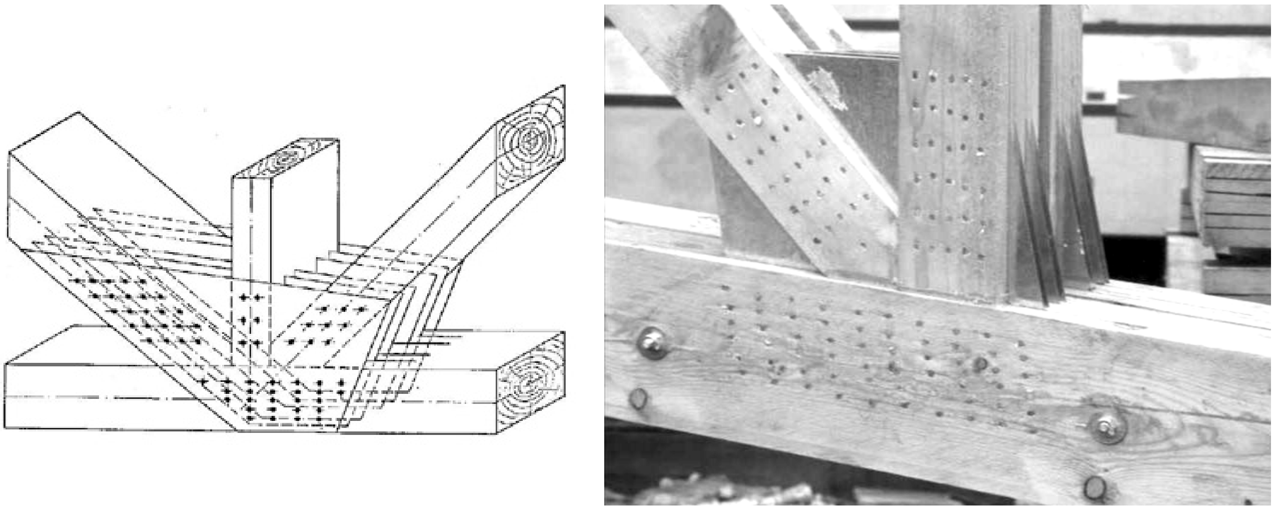
Požadované tuhosti a únosnosti spoje můžeme dosáhnout různými způsoby. Nejčastěji navrhované jsou mechanické spoje, kde dochází k přenosu sil kontaktem (případně třením) jednotlivých prvků mezi sebou nebo se spojovacími prostředky. Vedle spojů mechanických existují také lepené spoje, kde je využito vysoké adheze lepidla při namáhání spoje smykem nebo tahem.

Obecně můžeme mechanické spoje v dřevěných konstrukcích rozdělit podle způsobu namáhání jejich spojovacích prostředků. V případě, že zatížení působí v rovině kolmé na jejich osu, jsou tyto spojovací prostředky namáhány ohybem a střihem v jedné nebo více rovinách. Spojovací prostředky zatížené tahovou silou, která působí ve směru jejich osy, tomuto zatížení odolávají kontaktem ve styčných plochách a případně dalšími prvky jako například maticí, hlavou šroubu nebo závlačkou. Únosnost proti vytažení může být zvětšena závitem nebo vroubkováním.

Velkou skupinu mechanických spojovacích prostředků tvoří spojovací prostředky kolíkového typu, kde dochází k ohybu spojovacího prostředku a k otlačení stěny otvoru při přenosu sil mezi spojovanými prvky. Tradiční mechanické spoje s hřebíky, kolíky, svorníky, hmoždíky nebo vruty vykazují velké deformace během zatěžování. Také mnohdy nedokáží spolehlivě přenést opakované střídavé zatížení, což je důležitou podmínkou pro navrhování konstrukcí vystavených opakovanému cyklickému nebo dynamickému zatížení.

Mezi moderní spojovací prostředky, které mají vyšší únosnost a tuhost než klasické typy patří například spoje s přesnými šrouby, kdy část síly přenáší také tření v rovině střihu nebo spoje s expandovanou trubkou (Leijten, 1999). Oválné hřebíky byly vyvinuty pro spojování lepených lamelových prvků a výrazně přispívají ke zvýšení únosnosti a tuhosti konstrukcí (Foschi, 1973).

Moderní mechanické spoje dřevěných konstrukcí jsou často prováděny s použitím vnějších nebo vkládaných styčníkových desek (Pedersen et al., 1999). Takové spojení patří do skupiny spojů typu ocel-dřevo, které využívají vyšší pevnosti ocelových prvků k přenosu sil mezi připojovanými dřevěnými elementy. Účinného spojení dřeva a ocelového plechu bývá dosaženo vložením spojovacích prostředků kolíkového typu nebo například použitím ocelových desek s navařenými nebo prolisovanými trny.



Obr.1: Schéma spoje s vkládanými styčníkovými plechy typu Greim (vlevo) a příklad jeho použití v zastřešení sportovní haly ve Vrchlabí (vpravo).

Vložením styčníkové desky do vyřezaného otvoru v dřevěném prvku zajistíme nejen její účinnou ochranu před vnějšími vlivy, ale také zvýšíme únosnost a tuhost celého spoje. Styčníkový plech je chráněn také před vysokou teplotou a tím se zvyšuje požární odolnost spoje. Další výhodou je celé nebo částečné ukrytí ocelové části spoje, které také zvyšuje jeho estetickou hodnotu.

Mezi základní způsoby propojení styčníkové desky a dřevěného prvku patří vložení hladkých kolíků do předvrtaných otvorů. Tento systém vyžaduje přesné provedení všech částí, aby se zabránilo problémům při montáži.

Další možností je dřevěný prvek i s tenkým ocelovým plechem prorazit nastřelovacími hřebíky. Jindy se například používají samovrtné kolíky systému WS od SFS Intec. Existují také speciální typy spojů jako například systém MKD (Multi Krallen Dübel), kdy jsou ocelové trny přivařeny z obou stran styčníkové desky, a dřevěný prvek je na tyto trny ze dvou stran nalisován.

Přestože jsou spoje se vkládanými styčníkovými plechy ekonomicky méně výhodné než spoje s vnějšími plechy, mohou dosahovat větších tuhostí, únosností a lepších odolností.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce si klade za cíl teoreticky i experimentálně analyzovat působení mechanických spojů se vkládanými styčníkovými plechy v dřevěných konstrukcích. Na základě takto získaných znalostí je jedním z dílčích cílů definovat vztahy pro nelineárně polotuhé chování spojů namáhaných osovou silou a ohybem. Přestože spoje typu ocel-dřevo se vkládanými styčníkovými plechy jsou poměrně rozšířené, existuje jen málo závěrů z experimentů provedených na celých prvcích s více spojovacími prostředky. Jednotlivé dílčí cíle práce jsou:

- provést experimenty při namáhání osovou silou a při namáhání ohybem na několika základních typech spojů s použitím rostlého dřeva, lepeného lamelového dřeva a vrstveného dřeva KERTO
- měřit přetvoření a sledovat způsoby a rozsah porušení během zatěžování s využitím nových nedestruktivních nebo bezkontaktních metod
- provést regresní vyhodnocení zpracovaných závislostí zatížení a přetvoření pro testované spoje
- zhodnotit možnosti použití zkoumaných typů styčníků v dřevěných konstrukcích

2.1 ZAMĚŘENÍ PRÁCE

Práce se dále zaměřuje na problematiku skupinového působení spojovacích prostředků a experimentální analýzu moderních spojů se styčníkovými plechy s uplatněním novodobých měřicích metod. V rámci experimentální analýzy je cílem práce stanovit nebo ověřit charakteristiky spojů vybraného typu s ohledem na skupinové působení spojovacích prostředků, navrhnout metodiku zkoušení a efektivně využít výpočetní techniky pro automatizaci měření, sběr dat a vyhodnocování výsledků.

Experimenty byly navrženy s ohledem na získání co nejvíce potřebných údajů. Byly použity digitální měřící přístroje zaznamenávající průběžně měřené hodnoty. Experimenty vycházely z technických možností zkušebny Stavební fakulty VUT v Brně a laboratoře technické univerzity v Helsinkách. Finanční náročnost experimentů nebyla zanedbatelná, proto se při návrhu zkoušek dbalo na možnost opakovaně použít části zkušebních těles a upínacího zařízení. Vzhledem k těmto okolnostem bylo testováno také poměrně malé množství vzorků.

2.2 METODIKA PRÁCE

Jsou použity analytické přístupy vycházející z Evropského nosného a přetvárného modelu s cílem zohlednit faktory ovlivňující chování spoje při monotónním statickém zatěžování. Vliv změny teploty, vlhkosti, doby trvání zatížení a cyklického namáhání na spoj není experimentálně ověřen, je však možné takto vzniklé deformace stanovit na základě stávajících modelů a výsledků prezentovaných v této disertační práci.

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V minulosti se určovaly charakteristiky spojů s kolíkovými spojovacími prostředky na základě krátkodobých zkoušek s poměrně malým počtem zkoušených spojů. Vzhledem k velké rozmanitosti typů moderních spojů by bylo náročné stanovovat mezní únosnosti a další potřebné charakteristiky z výsledků experimentálních zkoušek na reprezentativních vzorcích každého typu a byl proto vytvořen analytický model popisující chování takových spojů.

3.1 NELINEÁRNÍ MODELY POLOTUHÉHO CHOVÁNÍ SPOJE

Při návrhu dřevěných konstrukcí se běžně nepoužívá nelineární modelování závislosti přetvoření spoje na zatížení. Přesto však uvažováním proměnné tuhosti styčníku můžeme mnohem výstižněji určit rozdělení vnitřních sil v konstrukci a její tvarové změny při zatížení.

Matematické modely

Existuje několik matematicky formulovaných modelů polotuhých styčníkových spojů. Jejich použití je však většinou podmíněno znalostí závislosti zatížení na přetvoření spoje například z experimentálních měření. Matematické modely vyjadřují závislost zatížení F (osového nebo ohybového) na přetvoření δ (posunutí nebo pootočení). Jedním z používaných modelů pro spoje dřevěných konstrukcí je Jaspartův tříparametrický model:

$$F = \frac{(a-b)\delta}{\left(1+\left[\frac{(a-b)\delta)}{c}\right]^{n}\right)^{\frac{1}{n}}} \qquad (3.1)$$

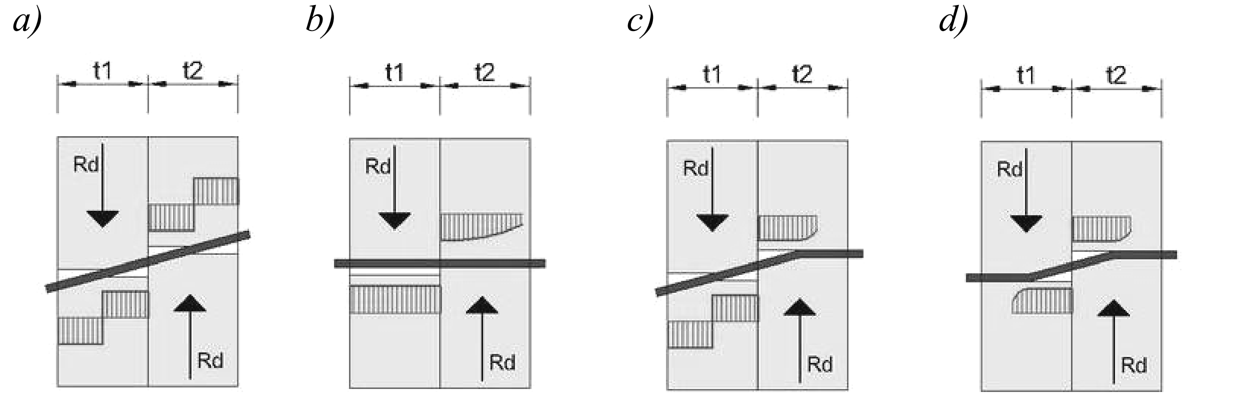
kde a, b a c jsou parametry vystihující tuhost spojení, δ je hodnota přetvoření

Mechanické modely

Nejčastěji používané mechanické modely využívají metody komponentů. Styčník reprezentuje soustava jednotlivých mechanických tuhých a poddajných součástí, jejichž parametry jsou získány převážně experimentálně.

3.2 EVROPSKÝ NOSNÝ A PŘETVÁRNÝ MODEL

Současný nosný a přetvárný model chování spoje se spojovacími prostředky kolíkového typu namáhanými na střih (EYM – European Yield Model) vychází z analýzy, která předpokládá ideálně pružně-plastické chování dřeva a tuho-plastické chování spojovacího prostředku (Johansen, 1949). Modely chování zde vyplývají z ohybového přetvoření spojovacích prostředků a deformace dřeva otlačením a zjednodušují analytický výpočet únosnosti kolíku při namáhání střihem. Teorie je založena a experimentálně ověřena (Möller, 1951) na spojích s jedním kolíkem. Spojovací prostředky jsou modelovány jako nosníky na deformovatelném podloží.

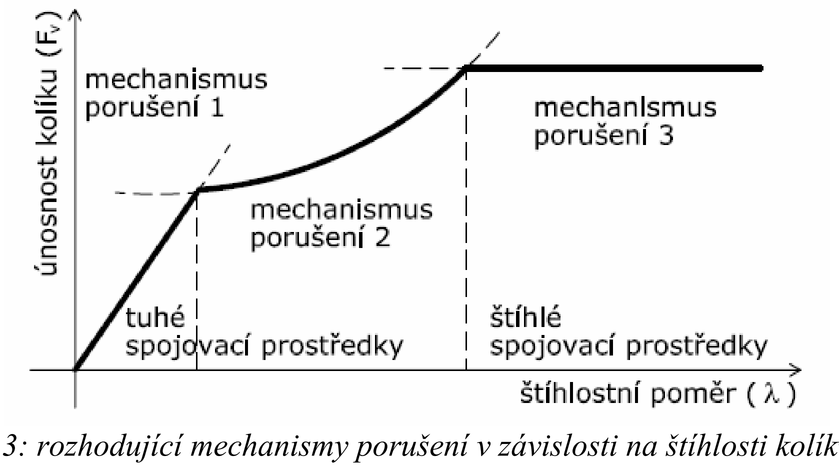


Obr.2: základní způsoby porušení jednostřižného spoje: (a) mechanismus 1a, (b) mechanismus 1b, (c) mechanismus 2, (d) mechanismus 3

Tento model byl dále upřesňován v závislosti na směru působící síly ke směru vláken (Smith, Whale, 1986), kdy se prokázalo, že směr působící síly nemá na únosnost spoje vliv pro spojovací prostředky o průměru do 8 mm. Uvažování osových sil ve spojovacích prostředcích umožnilo navýšit únosnost oproti hodnotám odvozeným z Johansenova modelu. Únosnost spojovacího prostředku namáhaného střihem a ohybem je tedy závislá také na jeho únosnosti ve vytažení.

Štíhlost kolíku u vícestřižných spojů

Důležitým parametrem EYM popisujícím poddajnost vícestřižných spojů je účinná štíhlost kolíku λ_{ef}, která je definovaná jako poměr tloušťky středního dřevěného prvku a průměru kolíku.



Obr.3: rozhodující mechanismy porušení v závislosti na štíhlosti kolíku

Spoje s více spojovacími prostředky

Únosnost spoje s *n* spojovacími prostředky je často menší než *n* násobek únosnosti spoje s jedním spojovacím prostředkem. Jsou zde mnohdy rozhodující modely porušení mezi těmito prostředky jako například křehký lom, rozštěpení dřeva nebo blokové smykové porušení spoje. V takových případech je vždy únosnost spoje menší než únosnost stanovená z únosnosti jednoho spojovacího prostředku. Většinou se proto doporučuje stanovit efektivní počet n_{ef}.

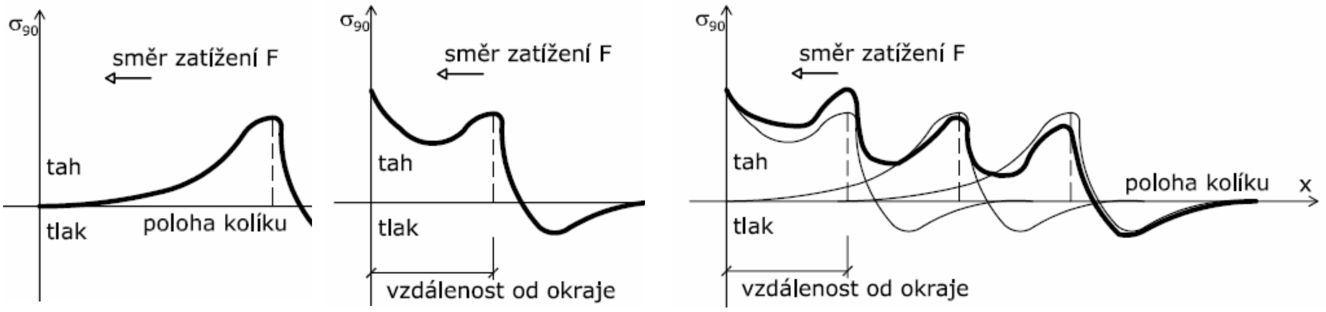
Nestejnoměrné rozdělení zatížení

Při namáhání osovou silou dochází také k nerovnoměrnému rozdělení zatížení mezi jednotlivé spojovací prostředky, které se částečně vyrovná v rámci plastických deformací ještě před porušením spoje. Nejvíce jsou namáhány spojovací prostředky na okraji spoje. Rozmístění, vzdálenosti mezi kolíky, vzdálenosti k okraji prvku a počet spojovacích prostředků mají proto na chování spoje podstatný vliv (Schmidt, Blass, Frasson, 2002).

Bylo prokázáno (Lantos, 1969), že ve spoji namáhaném osovou silou s kolíky v jedné řadě dochází k rozdělení vnitřních sil přibližně parabolicky, kdy nejvíce namáhané spojovací prostředky jsou na začátku a na konci řady. U kolíkových spojů se však běžně stává, že jeden nebo více spojovacích prostředků dosáhnou své únosnosti ještě předtím, než dojde k vyčerpání únosnosti celého spoje a zatížení se přerozdělí.

Porušení spoje při namáhání rovnoběžně s vlákny

Namáhání kolíků uspořádaných v řadě ve směru vláken může vést k rozštěpení dřeva v linii spojující spojovacích prostředků nebo mezi prvním kolíkem a okrajem dřevěného prvku nebo k blokovému smykovému porušení skupiny spojovacích prostředků. Vzdálenosti mezi kolíky a vzdálenost od okraje prvku ovlivňuje celkové normálové napětí kolmo k vláknům.



Obr. 4: průběh napětí kolmo k vláknům po délce prvku s jedním kolíkem a více kolíky v řadě

Teorii založenou na principech lomové mechaniky představil Jorissen (1998), kde síla při vytvoření smykové trhliny ve dvoustřižném spoji s kolíky v jedné řadě je:

$$2F_V = 2t\sqrt{\frac{G_c E_{0,mean} \sin\varphi [h - d\sin\varphi]}{h}} \tag{3.2}$$

kde G_c *je lomová energie (pro kolíkové spoje ve smrkovém dřevu* $G_c \approx 0{,}35\ Nmm/mm^2$*),* φ *je úhel tření (*$\varphi \approx 30°$*),* $E_{0,mean}$ *je střední hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny,* d *je průměr kolíku,* t *je tloušťka dřevěného prvku,* h *je výška dřevěného prvku.*

Tento vztah rozšiřuje základní modely porušení podle EYM o další podstatný vliv ve spojích s více spojovacími prostředky uspořádanými ve směru působící síly. Jako rozhodující se projevuje u tuhých spojovacích prostředků s nízkou štíhlostí.

3.3 CHOVÁNÍ SPOJE ZÁVISLÉ NA TEPLOTĚ, VLHKOSTI A DOBĚ TRVÁNÍ ZATÍŽENÍ

Spoje tvořené dřevěnými a ocelovými prvky jsou ovlivněny také dalšími deformacemi materiálu, které nejsou vyvolané přímo okamžitou hladinou zatížení. Dřevo v tomto ohledu vykazuje vysokou míru závislosti materiálových veličin a deformací na teplotě, vlhkosti a době trvání zatížení. Existuje několik způsobů stanovení poměrné deformace. Celková poměrná deformace se může například stanovit jako součet její elastické (ε_e) a neelastické (ε_{in}) složky

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{in}, \tag{3.3}$$

kde neelastickou deformaci způsobuje zejména viskoelastické (ε_{ve}) a mechanosorpční chování (ε_{ms}) materiálu. Dále některé modely uvažují s hygroexpanzí (ε_s) a hygrotermální deformací (ε_{ht}) zejména ve směru kolmém na směr vláken. Experimentálně je však nemožné rozlišit elastickou složku poměrné deformace od deformace závislé na čase, protože neexistuje způsob, jak zatížit vzorek okamžitě. Proto se pro experimentální stanovení parametrů pružné deformace používá smluvní čas 1 minuta a v analytickém modelu se elastické chování považuje za zvláštní případ viskoelastického chování v nekonečně malém časovém úseku. Po sloučení těchto dvou složek se může celková poměrná deformace vyjádřit následovně:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_{ht} + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{ms}. \tag{3.4}$$

Důležité jsou také změny mechanických vlastností oceli při vysokých teplotách, které jsou rozhodující při návrhu spojů s ocelovými prvky v konstrukcích s předpokládaným požárním zatížením.

3.4 DALŠÍ PŘÍSTUPY

V laboratořích ETH (Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich, Švýcarsko) od roku 1998 probíhal výzkumný projekt zabývající se faktory snižujícími únosnost spoje oproti zavedenému modelu (Mischler, 1999). Ve výzkumném centru VTT (Espoo, Finsko) byl zahájen v roce 2005 projekt zaměřený na sledování lomových poruch a nestandardních způsobů porušení spojů s více spojovacími prostředky kolíkového typu. Organizace SHR Timber Research (Wageningen, Holandsko) publikovala v roce 1999 závěry z analýzy chování více spojovacích prostředků se zahrnutím lomové mechaniky (Jorissen, 1999). Ve stejném roce byl ukončen evropský projekt COST nazvaný „Control of the semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections“. Na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně probíhá současně s mnoha dalšími výzkumnými projekty (Melcher, Karmazínová, 2004) výzkum v oblasti mechanických spojů s vkládanými styčníkovými plechy od roku 1996 (Straka, Melcher, 1998).

4 ANALÝZA SPOJŮ NAMÁHANÝCH TAHEM

Ve spolupráci s odbornými pracovišti Fakulty stavební byly provedeny zkoušky základních typů mechanických spojů s vkládanými ocelovými plechy. Na experimentech se podíleli také pracovníci ústavu kovových a dřevěných konstrukcí, ústavu fyziky a ústavu stavebního zkušebnictví. Cílem zkoušek bylo porovnat reálné působení spojů na navržených vzorcích s výsledky matematické analýzy (Vejpustek, Kubza, 2002) a ověřit použitelnost nových bezkontaktních a nedestruktivních metod při testování dřevěných prvků s ocelovými spojovacími prostředky.

4.1 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Pro experimentální analýzu byly zhotoveny čtyři série zkušebních těles s vkládanými styčníkovými plechy. Tělesa byla vyrobena podle spojů použitých v reálných konstrukcích z konstrukčního řeziva 160x160 mm. Jako materiál bylo ve všech případech použito jehličnaté dřevo smrku ztepilého (*Picea abies*).

Tab. 1: tělesa pro zkoušky spojů namáhaných tahem

označení série	počet těles	typ spoje	materiál	počet spojů
PH	2	hřebíkový	rostlé dřevo	4
PK	2	kolíkový	rostlé dřevo	4
PMR	3	MKD	rostlé dřevo	6
PML	3	MKD	lepené lamelové dřevo	6

Zkušební vzorky s hřebíkovými spoji (PH) byly provedeny s dvaceti hřebíky průměru 3,1 mm strojně oboustranně zaraženými do vzorku s 1 mm tenkými ocelovými plechy. Kolíkové spoje (PK) byly provedeny s dvaceti kolíky průměru 6 mm zaraženými do otvorů v dřevěném prvku a v 5 mm tlustém ocelovém plechu. Posledním typem analyzovaného spojení byl systém MKD (Multi Krallen Dübel). Výroba spoje MKD spočívá ve vlisování styčníkové desky z masivního plechu s oboustranně přivařenými trny mezi dvě samostatné části dřevěného prvku. Deska je povrchově upravena žárový zinkováním. Pro pilotní experimenty byly zhotoveny vzorky z rostlého dřeva (PMR) i z lepeného lamelového dřeva (PML).

Stanovení materiálových charakteristik

Před zahájením experimentů byly zdokumentovány rozměry těles včetně jejich materiálových vad a imperfekcí. Z výsledků šetření bylo možné konstatovat, že vzorky jsou vyrobeny z jehličnatého konstrukčního dřeva odpovídající jakostní třídě S10 (dříve SI) v systému vizuálního třídění. Některé doporučené charakteristické hodnoty vlastností materiálu byly upřesněny ze zkoušek malých bezvadných těles a z měření během zatěžování.

4.2 TEORETICKÁ ANALÝZA ŘEŠENÝCH SPOJŮ

Hřebíkový spoj

Únosnost spoje F_V a modul prokluzu K_{ser} byly stanoveny s využitím stávajících teoretických modelů a naměřených hodnot geometrických a materiálových parametrů spoje.

$$F_V = 8 \cdot n_{ef.} \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1} d t_1 = 2{,}13\ kN \\ f_{h,1} d t_1 \left[\sqrt{2 + \dfrac{4M_y}{f_{h,1} d t_1^2}} - 1 \right] + \dfrac{F_{ax}}{4} = 1{,}29\ kN \\ 2{,}3\sqrt{M_y f_{h,1} d} + \dfrac{F_{ax}}{4} = 1{,}43\ kN \\ t\sqrt{\dfrac{G_c E_{0,mean} \sin\varphi \left[h - d \sin\varphi\right]}{h}} = 1{,}04\ kN \end{array} \right\} = 167\ kN \qquad (4.1)$$

$$K_{ser} = 0{,}04 \rho^{1,5} d^{0,8} = 903\ N/mm \qquad (4.2)$$

Kolíkový spoj

Podobným způsobem byl řešen i spoj s dvaceti kolíky.

$$F_V = 150\ kN,\ K_{ser} = 3197\ N/mm \qquad (4.3)$$

Spoj MKD

Spojení styčníkovou deskou s přivařenými trny vystihuje nejlépe model dvou jednostřižných spojů s tlustým styčníkovým plechem, kde se uvažuje vetknutí na straně styčníkové desky. Bylo třeba také stanovit zatížení při porušení koutového svaru mezi trnem a styčníkovou deskou.

$$F_V = 153\ kN,\ K_{ser} = 1827\ N/mm \qquad (4.4)$$

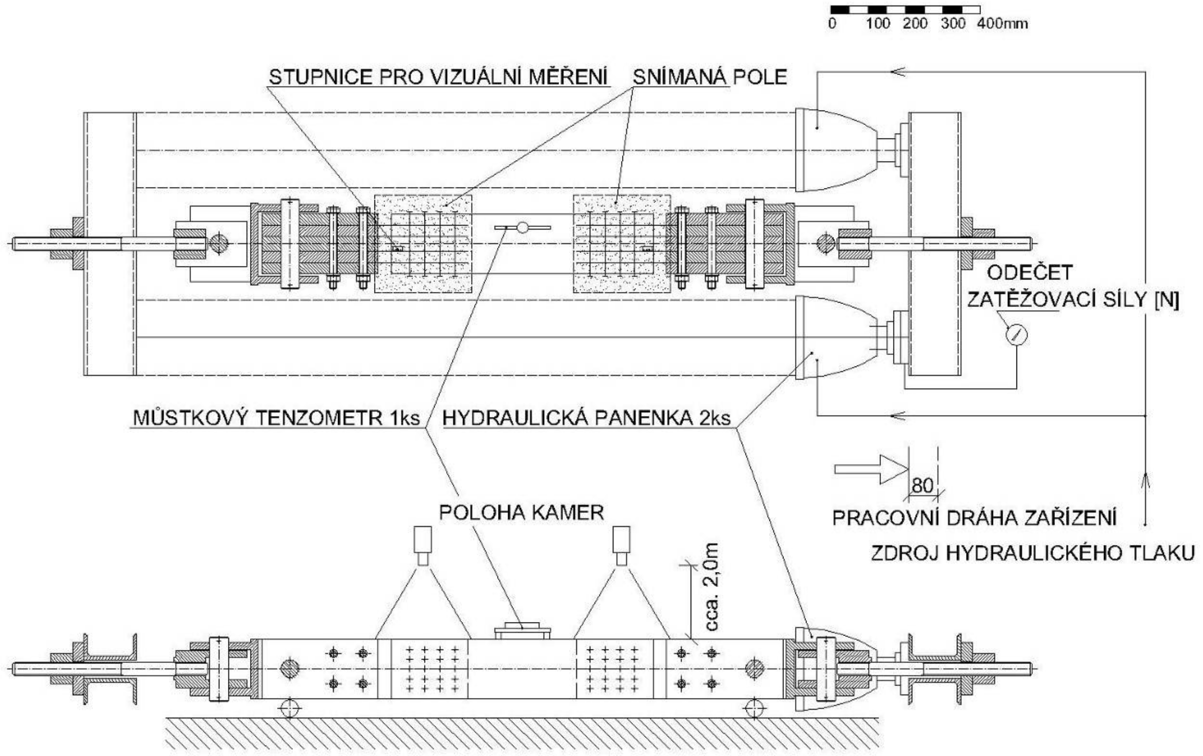
4.3 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA ŘEŠENÝCH SPOJŮ

Spoje byly zatěžovány tahovou silou a jejich odezva v průběhu zatížení byla sledována novými měřícími metodami (Straka, Vejpustek, Hradil, 2004). Následovalo vyhodnocení naměřených údajů s cílem určit maximální zatížení, modul prokluzu, průběh napětí a přetvoření testovaných spojů. Naměřené a vyhodnocené údaje se také využily pro zjištění tvaru a způsobu porušení jednotlivých typů spojů a určení tuhosti, poddajnosti a vlivu imperfekcí na chování spojů.

Provedení experimentů

Upínací zařízení bylo navrženo se dvěma na sebe kolmými klouby, aby se omezil možný vliv excentrického zatěžování na testovaný vzorek. Během zatěžování bylo měřeno a digitálně zaznamenáváno vysunutí ocelových plechů, deformace v oblasti spojů a ve střední části vzorku současně s akustickou odezvou vznikajících poruch ve spoji. Další měření prokluzu spoje probíhalo bezkontaktně s využitím

videoextenzometru. Zatěžování zahrnovalo tuhostní i pevnostní etapu, kdy se těleso odtíží po dosažení 0,4 násobku předpokládané únosnosti spoje.



Obr.5: návrh zatěžovací stolice

Zjištění poruch a tvaru porušení spojovacích prvků

Pro zjištění případných poruch, skutečného tvaru a pozice spojovacích prvků před provedením experimentu a po něm byly vybrané vzorky radioskopicky snímkovány ve spolupráci s ústavem stavebního zkušebnictví.

4.4 METODA VYHODNOCENÍ DAT NAMĚŘENÝCH VIDEOEXTENZOMETREM

Byla zpracována metoda předpokládající zavedení lokálního souřadného systému shodného s orientací vláken dřevěného tělesa s nejméně jedním pevným bodem *A*. Tento bod je součástí upínacího zařízení nebo kovové části spoje. Transformované souřadnice jsou počítány v každém měřeném čase zvlášť.

$$x^T = rCOS\alpha^T = \sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2}\,COS(\varphi - ARCTG\frac{y-y_A}{x-x_A})$$
$$y^T = -rSIN\alpha^T = -\sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2}\,SIN(\varphi - ARCTG\frac{y-y_A}{x-x_A}) \qquad (4.5)$$

Výsledkem vyhodnocení jsou pracovní diagramy pro každý vzorek zapsané nezávisle při měření snímačem posunutí a kamerou a případně navržená korekce vyplývající z jejich vzájemného posunutí v časové ose.

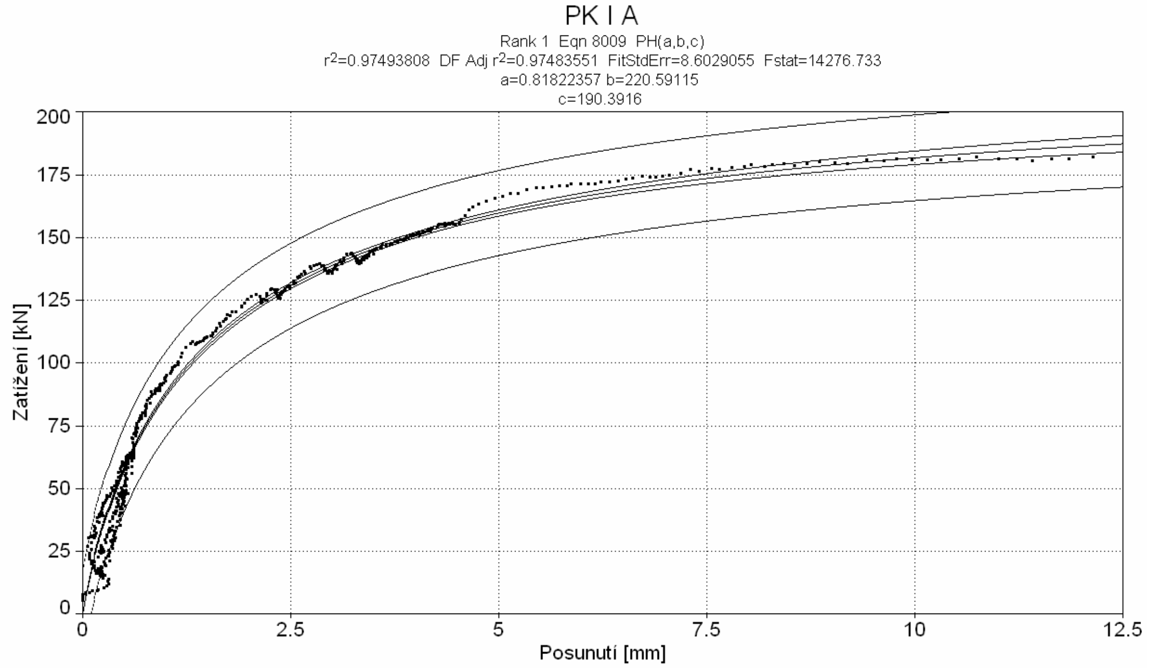
4.5 SHRNUTÍ ANALÝZY SPOJŮ NAMÁHANÝCH TAHEM

Teoretický model založený na Johansenových vztazích dává poměrně přesnou představu o únosnosti a způsobu porušení spojů s mechanickými spojovacími prostředky. Drobné rozdíly vznikají zejména díky jevům způsobeným více spojovacími prostředky, které nejsou v modelu zahrnuty. Pro modelování idealizované nelineární závislosti zatížení a posunutí byl použit **obecný tříparametrický model**, kde je neznámý pouze parametr nelinearity *„a"* a **rozšířený tříparametrický model** o počáteční prokluz *„d"*:

$$F = \frac{K_{ini}\delta}{\left[1+\left(\frac{\delta}{\delta_u}\right)^a\right]^{1/a}},\; F = \frac{b(\delta+d)}{\left(1+\left[\frac{b(\delta+d)}{c}\right]^a\right)^{\frac{1}{a}}} \qquad (4.6)$$

kde „a" je neznámý parametr nelinearity a „b", „ c" a „d" jsou tvarové parametry funkce, které byly vyšetřovány jako další neznámé parametry

Tato metoda byla aplikována opakovaně pro počáteční nastavení prokluzu na -1,0 mm, -0,5 mm, 0 mm, 0,5 mm a 1,0 mnm, aby se zohlednilo počáteční nastavení měřících přístrojů a skutečný počáteční prokluz vzorku. Pro výpočet nelineární regrese byly použity metody se statistickým rozdělením Pearson VII.



Obr. 6: idealizace nelineárního chování kolíkového spoje

Hřebíkové spoje (PH)

Bylo zjištěno, že při modelování nelineárního chování spoje tříparametrickým modelem bude nelineární chování spoje nabývat hodnoty parametru $a \geq 0{,}5$. U vzorku PH-II se vyskytovaly trhliny v několikanásobně větší míře, zatímco těleso PH-I s minimálním objemem trhlin se chovalo méně poddajně.

Tab.2: vyhodnocení parametrů nelineárního modelu hřebíkových spojů

Vzorek	3 nebo 4 parametry				1 parametr
	a	b	c	d	a
PHI-A	2,898	134	136	0,000	3,402
PHI-B	1,578	195	139	0,136	1,891
PHII-A	1,210	179	235	0,000	0,942
PHII-B	1,971	111	279	0,000	0,819

Kolíkové spoje (PK)

Kolíkový spoj je i při vysoké míře přetvoření nad 20 mm schopen přenášet zatížení odpovídající jeho stanovené únosnosti. Spoj typu ocel-dřevo s jedním vloženým styčníkovým plechem má tendenci se během zatěžování rozevírat, jeho únosnost by tedy mohla být větší při zabránění rozevření dřevěných částí spoje například použitím kolíků se závity na koncích nebo vložením několika svorníků.

Tab.3: vyhodnocení parametrů nelineárního modelu kolíkových spojů

Vzorek	3 nebo 4 parametry				1 parametr
	a	b	c	d	a
PKI-A	0,818	221	190	0,000	0,550
PKI-B	1,412	234	47,9	0,000	0,967
PKII-A	4,519	169	72,0	-3,150	0,981
PKII-B	4,039	163	115	0,000	0,876

Spoje typu MKD (PMR, PML)

U spojů MKD byla zjištěna poměrně vyšší tuhost i únosnost zkoušených vzorků vzhledem ke spojům s hřebíky nebo kolíky. Tato skutečnost vychází nejen z teoreticky stanovené vysoké únosnosti, ale i z kvalitnějšího použitého dřeva s minimálním množstvím a rozsahem materiálových vad.

Tab. 4: vyhodnocení parametrů nelineárního modelu spojů typu MKD

Vzorek	1 parametr	3 nebo 4 parametry			
	a	a	b	c	d
PMRI-A	1,259	0,982	344	156	0,137
PMRI-B	1,153	1,244	320	146	0,000
PMRII-A	1,301	4,317	268	59,0	0,079
PMRII-B	1,566	1,356	273	228	0,203
PMRIII-A	1,294	2,135	278	101	0,052
PMRIII-B	1,347	0,842	330	294	0,153
PMLII-A	2,304	2,080	295	200	-0,233
PMLII-B	1,343	1,482	339	181	-0,426
PMLIII-A	2,589	1,425	340	228	-0,192
PMLIII-B	1,368	0,707	559	316	-0,379

5 ANALÝZA SPOJŮ NAMÁHANÝCH OHYBEM A SMYKEM

V rámci analýzy chování mechanických spojů byly provedeny ve spolupráci se Sillanrakennustekniikan laboratorio, TKK (Laboratory of Bridge Engineering, Helsinki University of Technology) a laboratoři VTT v Espoo zkoušky mechanických spojů s vkládanými ocelovými plechy namáhanými ohybem. Cílem experimentů bylo doplnit poznatky z tahových zkoušek o vliv rozdílného směru namáhání v jednotlivých spojovacích prostředcích, porovnat působení spojů v rostlém dřevě a vrstveném překližkovém trámu z materiálu KERTO-S a

KERTO-Q. Pro experimentální část práce bylo využito zkušebny Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto (Department of Civil and Environmental Engineering), která také poskytla materiál a dílny pro výrobu zkušebních těles. Experimentů se účastnili jako pozorovatelé pracovníci laboratoří VTT v Espoo, Technické univerzity v Budapešti a člen finského parlamentu. Zatěžovací stolice byla také předvedena v rámci 5. symposia AECEF v Espoo (2005).

5.1 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Pro experimentální analýzu byly zhotoveny dvě série zkušebních těles se vkládanými styčníkovými plechy. Tělesa byla vyrobena podle spojů použitých v reálných konstrukcích. Zkušební vzorky byly vyrobeny z konstrukčního řeziva 150x300 mm a opatřeny svorníkem zamezujícím rozevření dřevěných částí prvků. Jako materiál první série (SOLID) bylo použito dřevo ze severského smrku (*Picea abies*). Dřevo bylo vizuálně zařazené do jakostní třídy T2 podle INSTA 142, která v souladu s CEN/TC 124.215 odpovídá pevnostní třídě C24 podle EN 338. Druhá série zkušebních těles byla vyrobena z trámů z lepeného vrstveného dřeva KERTO. Trámy byly slepeny ze tří svisle vrstvených lamel. Vnější vrstvy byly vyrobeny z 51 mm tlusté lamely KERTO-S a vnitřní vrstva z 51 mm tlusté lamely KERTO-Q. Jednotlivé dýhy byly také vyrobeny ze dřeva severského smrku (*Picea abies*) a slepeny formaldehydovým lepidlem.

5.2 TEORETICKÁ ANALÝZA ŘEŠENÝCH SPOJŮ

Teoretické zatížení při porušení vzorku (největší síla vnesená hydraulickým lisem) V_{max} pro sérii SOLID a KERTO bylo stanoveno s využitím stávajících teoretických modelů a naměřených hodnot geometrických a materiálových parametrů spoje, kde složky sil působící na jeden kolík od posouvající síly a momentu jsou:

$$F_{m,i} = \frac{K_\alpha r_i}{K_r} M = \frac{r_i}{\sum r_i^2} M = 4{,}62 \cdot 10^{-3} r_i V\,,\; F_{v,i} = \frac{V}{n} = 0{,}04V \qquad (5.1)$$

kde r_i je vzdálenost kolíku od teoretického středu otáčení

Potom je únosnost tělesa:

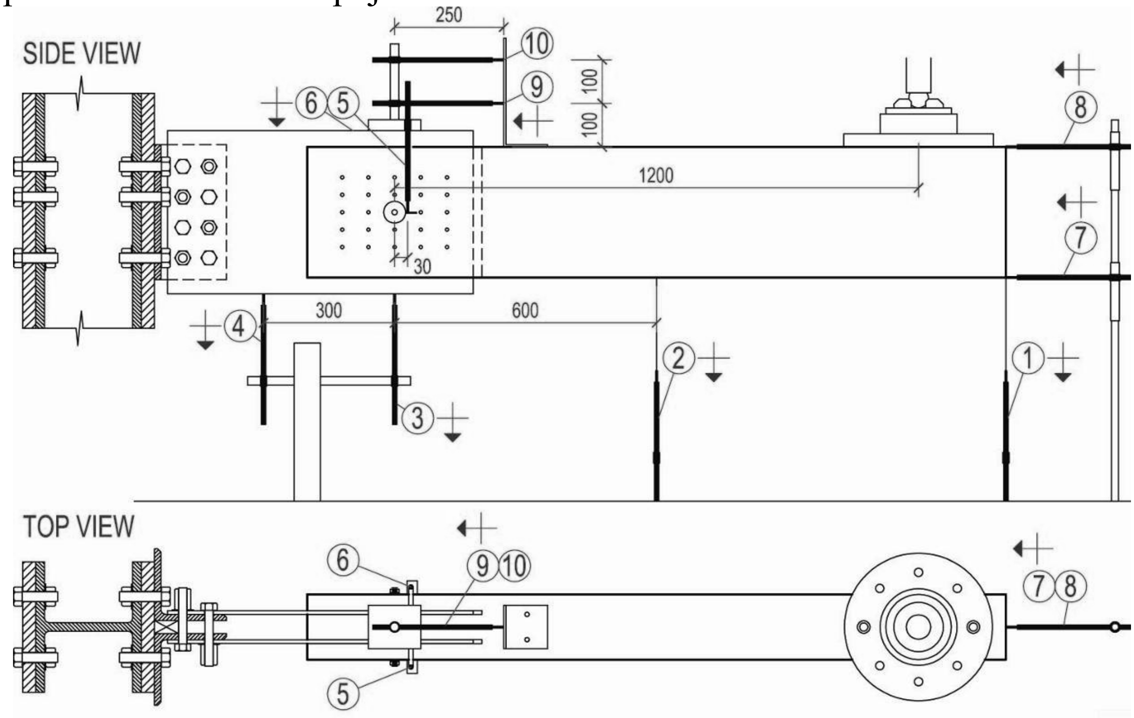
$V_{\max} = 21{,}0\,kN$ pro sérii SOLID a $V_{\max} = 27{,}3\,kN$ pro sérii KERTO (5.2)

5.3 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA ŘEŠENÝCH SPOJŮ

Spoje byly zatěžovány ohybovým momentem a posouvající silou a jejich odezva v průběhu zatížení byla sledována přiloženými snímači. Následovalo vyhodnocení naměřených údajů s cílem určit maximální zatížení, tuhost a další závislosti napětí a přetvoření testovaných spojů.

Provedení experimentů

Zkušební těleso bylo osazeno snímači posunutí navrženými tak, aby jejich hodnoty mohly být použity ke zpětné analýze parametrů tuhosti spoje a dřevěného prvku. Byl stanoven rozsah přetvoření v daném místě při dosažení přibližně dvojnásobné únosnosti, než byla předpokládána (50 kN) a podle něj vybrány vhodné snímače s odpovídající rozlišovací schopností. Na toto zatížení byla také navržena zatěžovací stolice, zejména vysokopevnostní šroubový přípoj ocelových plechů k nosnému rámu a počítačem řízené hydraulické čerpadlo. Zatěžování zahrnovalo tuhostní i pevnostní etapu, kdy se těleso odtížilo po dosažení 0,4 násobku předpokládané únosnosti spoje.



Obr.7: zatěžovací stolice, umístění a orientace snímačů

5.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Výsledný tvar a poloha zatěžovaného tělesa jsou složeny z několika na sobě nezávislých přetvoření. Jedná se o pootočení, svislý prokluz spoje a deformace dřevěného prvku vlivem ohybu a smyku. Při každém ze čtyř uvedených způsobů přetvoření se aktivují rozdílné snímače. Velikost posunutí v měřených oblastech je závislá na čtyřech parametrech. Modul pružnosti a modul pružnosti ve smyku ovlivňuje deformaci dřevěného prvku a modul prokluzu s ohybovou tuhostí spoje ovlivňuje pootočení a prokluz prvku ve spoji.

Metody vyhodnocení parametrů přetvoření

Zjednodušená metoda vyhodnocení parametrů přetvoření vychází ze skutečnosti, že modul pružnosti a modul pružnosti ve smyku jsou přibližně konstantní během zatěžování, a proto je nutné určit zejména modul prokluzu spoje K_t a jeho ohybovou tuhost K_r. Tyto veličiny se budou chovat nelineárně a jejich velikost bude klesat se zvyšující se hladinou zatížení.

$$K_t = \frac{1}{2}\left(\frac{F}{u_5} + \frac{F}{u_6}\right), \qquad K_r = \frac{FL}{\arctan\left(\frac{u_9 + x_9}{y_9^*}\right) - \arctan\left(\frac{x_9}{y_9}\right)} \tag{5.3}$$

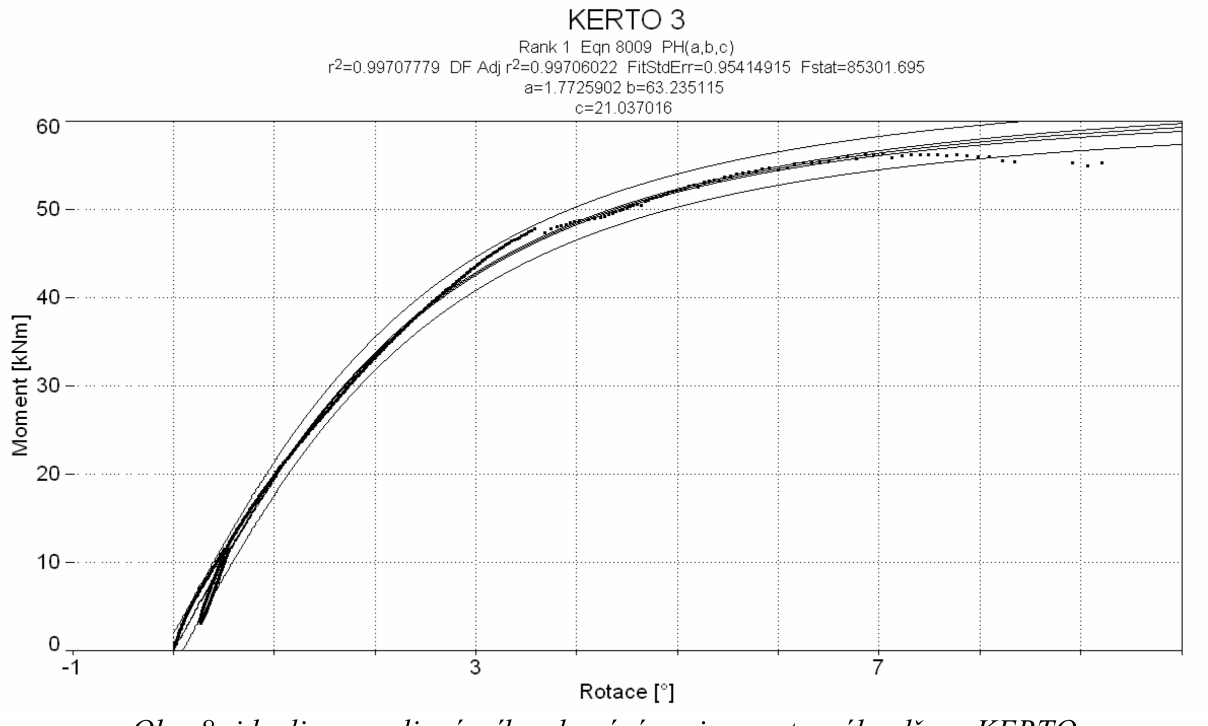
Komplexní metoda doplňuje vypočítaný modul prokluzu a ohybovou tuhost zjednodušenou metodou o modul pružnosti a modul pružnosti ve smyku stanovené přímo z měření.

$$E = \frac{2 y_7 x_{7,8}^2 FL}{I_y\left(u_7 - u_8 - 2 y_7 \tan\frac{FL}{K_r}\right)}, \qquad G_1 = \frac{x_1 F}{\left(u_1 - u_{1,T} - u_{1,R} - u_{1,G} - u_3\right)A} \tag{5.4}$$

kde L je rameno působící síly, u_i jsou posunutí snímačů a x_i,y_i jejich souřadnice

5.5 SHRNUTÍ ANALÝZY SPOJŮ NAMÁHANÝCH OHYBEM

Spoje namáhané současným působením ohybu a smyku byly modelovány také tříparametrickým modelem (viz. kap. 4). Z použitých modelů a aplikovaných regresních metod byla vybrána varianta s nejmenší odchylkou od naměřených hodnot. Nejčastěji se jednalo o metodu Pearson VII s matematickým modelem o třech (a,b,c) nebo čtyřech (a,b,c,d) neznámých parametrech.



Obr. 8: idealizace nelineárního chování spoje z vrstveného dřeva KERTO

U spojů v rostlém dřevě došlo ke ztrátě únosnosti vytvořením trhlin při působícím ohybovém momentu přibližně 35 kNm. Trhliny byly způsobené překročením pevnosti v tahu kolmo k vláknům. Jejich nelineární chování se projevilo jen velice mírně oproti spojům KERTO s vyšší pevností v tahu kolmo k vláknům a tedy i vyšší celkovou únosností.

Tab.5: vyhodnocení parametrů nelineárního modelu série SOLID

Vzorek	3 nebo 4 parametry				1 parametr
	a	b	c	d	a
SOLID 1	1,423	76,3	14,1	0,067	0,746
SOLID 2	1,209	55,3	22,1	0,027	0,934
SOLID 3	0,583	256	26,9	0,031	0,999

Tab.6: vyhodnocení parametrů nelineárního modelu série KERTO

Vzorek	3 nebo 4 parametry				1 parametr
	a	b	c	d	a
KERTO 1	1,508	62,1	22,1	0,000	1,177
KERTO 2	1,885	62,6	21,7	0,000	1,363
KERTO 3	1,773	63,2	21,0	0,000	1,293

Vliv technologie a způsobu výroby spoje

Radioskopické šetření (Hobst, Anton, Vítek, 2003) v rámci experimentální analýzy spojů typu ocel-dřevo (Straka, Vejpustek, Hradil, 2003) potvrdilo předpoklad, že technologie provedení spoje, tolerance při výrobě a způsob aplikace spojovacích prostředků vnáší do spoje výrobní imperfekce, které se ve velké míře podílí na porušení spoje křehkým lomem nebo rozštěpením dřeva. Přesnost umístění spojovacích prostředků a předvrtaných otvorů ve styčníkovém plechu ovlivňuje rozdělení zatížení na jednotlivé kolíky (Wilkinson, Rowlands, 1981).

Vliv štíhlosti kolíkových spojovacích prostředků

Malá účinná štíhlost kolíků může způsobit křehký lom a rozštěpení dřeva dříve než dojde k vyrovnání napětí mezi všechny spojovací prostředky, takže výsledná pevnost spoje je mnohem nižší než zavedené předpoklady v rámci EYM. Při vysoké štíhlosti naopak dochází k plastické deformaci kolíků a nadměrnému prokluzu spoje, ovšem experimentální analýza (Mischler, Prion, Lam, 2000) ukázala, že v těchto případech je dosaženo pevnosti stanovené podle evropského modelu. Optimální návrh průměru kolíku by potom měl respektovat mezní štíhlost ($\lambda_{ef} = \lambda_y$).

$$d = \left(\frac{k}{t}\right)^2 \cdot \frac{M_{y,d}}{f_{h,d}} \tag{5.5}$$

kde k je součinitel geometrie spoje (viz. kap. 2), t je šířka dřevěného prvku, $M_{y,d}$ a $f_{h,d}$ jsou návrhové hodnoty plastického momentu únosnosti kolíku a pevnosti v otlačení dřevěného prvku.

6 ZÁVĚR

Na Fakultě stavební v Brně a v Espoo byly provedeny experimenty na spojích typu ocel-dřevo se vkládanými styčníkovými plechy při namáhání osovou silou, ohybem a smykem s využitím nejen rostlého řeziva, ale také moderních materiálů na bázi dřeva jako jsou lepené lamelové dřevo nebo vrstvený překližkový trám z lamel KERTO-S a KERTO-Q. Byly testovány základní typy spojovacích prostředků, tedy kolíky, hřebíky a moderní spoje MKD v příslušných typických geometrických uspořádáních jako například jedna nebo dvě vložené ocelové desky, případně více tenkých ocelových plechů.

Výsledky regresní analýzy ukázaly, že se tyto mechanické spoje chovají při svém namáhání výrazně nelineárně a při použitém matematickém modelu je hodnota parametru nelinearity převážně v rozmezí 0,5 a 2, může však dosáhnout hodnoty až 4. Jeho velikost je závislá také na přesnosti počátečního nastavení tuhosti a únosnosti spoje, kdy se výsledky získané teoreticky mohou od skutečných hodnot lišit.

Popis chování spoje pomocí matematického modelu je možné zpřesnit rozšířením základního souboru neznámých o další parametry. Tyto údaje by měly vycházet z podrobného průzkumu odezvy spoje na vnější vlivy v laboratorních podmínkách a v reálných konstrukcích.

Při použití moderních měřících metod jako jsou počítačem řízené zatěžování a odečítání výsledků se dosáhne přesnějších výsledků, které vedou k menšímu rozptylu stanovených parametrů matematického modelu. Tato metoda byla použita v Espoo při měření série SOLID a KERTO, zatímco při experimentech na sériích PH, PK, PMR a PML byly spoje zatěžovány ručně řízeným čerpadlem.

Sledované typy spojů jsou vhodné ve vysoce namáhaných dřevěných konstrukcích například pro velká rozpětí nebo při dynamickém namáhání. Mohou dosahovat vyšších únosností než předpokládá jednoduchý model používaný v současných normativních předpisech, ale objevují se u nich i porušení při nižší hladině zatížení, zejména trhliny způsobené překročením pevnosti rovnoběžně s vlákny.

Spoje s kolíkovými spojovacími prostředky se chovají při vysokém zatížení poddajně, tedy i při vysokých hodnotách přetvoření mohou zatížení přenášet, v některých případech dokonce zvyšují svou tuhost vlivem zvýšení tření styčníkových desek způsobeného deformací kolíkových spojovacích prostředků.

Použitím materiálu s vyšší pevnosti kolmo k vláknům jako je například vrstvené dřevo KERTO-Q je možné zvýšit únosnost těchto spojů, ne však jejich tuhost. Ohybová tuhost i moduly prokluzu naopak závisí na počátečním stavu spoje, zejména na počtu a velikosti trhlin vzniklých při jeho výrobě.

7 LITERATURA A POUŽITÉ MATERIÁLY

AICHER, S. Structural Adhesive Joints including Glued-in Bolts. *Timber Engineering*. Larsen, H.J., Eds, Wiley & Sons, 2003

BLASS, H.J., EHLBECK, J. Simplified Design of Connections with Dowel-Type Fasteners. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, Working Commission CIB-W18, paper 31-7-8, Savonlinna, Finsko, 1998

COST C1 "Control of the semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections", proceedings of the second state of the art workshop, Ed.F.Wald, Praha, 1994, 400 p.

COST C1 "Control of the semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections", proceedings of the international conference, Ed. R.Maquoi, Liege, 1998, 580 p.

DEAN, J.A., STEWART, W.G., CARR, A.J. The seismic behaviour of plywood sheated shearwalls, In *New Zealand J. Timber Constr.* 2(3)., Nový Zéland, 1986.

Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 1 Navrhování a konstrukční materiály, Aut. překlad B.Koželouh, 1. vyd. Zlín: KODR, 1998. 400 p.

EHLBECK, J., GÖRLACHER, R., WERNWR, H. Determination of perpendicular-to-grain tensile stresses in joints with dowel-type fasteners. Proc. of the *CIB W18 Meeting*, Berlin, 1989, Paper 22-7-2

FOSCHI, R.O. *Stress Analysis and Design of Glulam Rivet Connections for Parallel-to-Grain Loading of Wood.* Report VP-X-116, Department of the Environment Canadian Forestry Service, Western Forest Products Laboratory, Vancouver, BC, Kanada, 1973

GROSSMAN, P.U.A, NAKAI, T. Deflection of wood under intermittent loading, In *Wood Science and Technology,* Vol. 21, No. 4*,* Springer Berlin / Heidelberg, Německo, 1987, p.349-360

HALLER, P., WEHSENER, J., OFFERMANN, P., FRANZKE, G., ENGLER, T. Reinforcement of timber joints with load-adapted textile structures, In *Wood Focus Oy*, Lahti, Finsko, 2001

HANHIJÄRVI, A. *Modelling of creep deformation mechanisms in wood*, Ph.D. dissertation, Helsinki University of Technology, VTT Publications 231, Finsko, 1995

HANKINSON, R.L. Investigation of Crushing Strength of Spruce at Varying Angles of Grain. *Air Service Information Circular III*, No. 259, US Air Service, Washington, USA, 1921

HOBST, L., ANTON, O., VÍTEK, L. X-Ray Control of Timber Structures Connectors with Steel Plates. Proc. *Non-destructive Testing of Civil Materials and Constructions, Workshop NDT CMC 2003*, Brno, 2003, p.7-10

JOHANSEN, K.W. Theory of timber connections, *International association for bridge and structural engineering*, no. 98, 1949, p.249 – 262

JOHNSSON, H. *Plug-Shear Failure in Nailed Timber Connections, Avoiding Brittle and Promoting Ductile Failures*, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Division of Timber Structures, Department of Civil and Environmental Engineering, Luleå, Švédsko, 2004, pp.182

JORISSEN, A. *Double shear timber connections with dowel type fasteners,* Ph.D. dissertation, Delft University Press, Delft, Nizozemí, 1998

JORISSEN, A. Double shear timber connections with dowel type fasteners, In *HERON*, *vol.44, no.3*, Nizozemí, 1999, p.163-186

JUTILA, A., SALOKANGAS, L. *Bending and Torsion of a Horizontally Curved Girder*, Teknillisen korkekoulun sillanrakennustekniikan julkaisuja, TKK-SRT-35, Helsinki University of Technology, Espoo, 2005, 18 p.

KANGAS, J., AALTO, K., KEVARINMÄKI, A. Modelling of the Block Tearing Failure in Nailed Steel-to-Timber Joints, *International Council for Research and Innovation in Building and Construction,* Working Commission CIB-W18, paper 30-7-2, Vancouver, BC, Kanada, 1997

KANÓCZ, J. Analýza priečně namáhaného klincového spoja použitím nelineárnej teórie. In. *Inžinierske stavby,* roč. 43, 1995, č. 2-3. s. 61-65

KOŇAS, P. Numerická simulace šíření vybraných fyzikálních polí ve dřevě, Autoreferát, *PhD Thesis*, MZLU v Brně, Brno, 2003, 45p.

KOPONEN, S. *Embedding, characteristic of wood in grain direction*, Julkaisu/Report 25, Talorakennustekniikan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu, Espoo, Finsko , 1991

KOPONEN, S. *Modelling the bahaviour of dowel type joints in wooden structures*, Julkaisu/Report 26, Talorakennustekniikan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu, Espoo, Finsko, 1991

KOPONEN, S., KANERVA, P. *Summary of European KERTO-LVL tests with mechanical fasteners*, Julkaisu/Report 29, Talorakennustekniikan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu, Espoo, Finsko , 1992

KUKLÍK, P., DOLEJŠ, J. Nondestructive Evaluation of Structural Timber, In *WCTE '98 - 5th World Conference on Timber Engineering*, vol.1, Montreaux, Švýcarsko,1998

LANTOS, G. Load distribution of a row of fasteners subjected to lateral load., In *Wood Science.* Vol. 1. (3)., 1969, p.129-136.

LEICHTI, R. J., HYDE R. A., FRENCH M. L., CAMILLOS, S. G. The continuum of connection rigidity in timber structures, *Wood and Fibre Science*, Vol. 32, No. 1, 2003, p. 11–19

LEIJTEN, A.J.M. Locally reinforced timber joints with expanded tube fasteners, In *HERON*, *vol.44, no.3*, Nizozemí, 1999, p131-161

LODYGOWSKI, T., GLAPIAK, M. The influence of dowel pre-tension on stiffness of timber joint, *Building Research Journal*, Vol. 51, No. 4, 2003

MADSEN, B., et al. *Behaviour of timber connections*, published by Timber Engeneering Ltd., 2000, BC, Kanada

MCLAIN, T.E., THANGJITHAM, S.Bolted wood joint yield model., *Journal of the Structural Division*, 1983, ASCE 109(8): 1820-1835.

MELCHER, J. a kol. *Teorie, spolehlivost a mechanismus porušování staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí.* Výzkumný záměr MSM 261100007

MELCHER, J., KARMAZÍNOVÁ, M. Experimentální výzkum na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí FAST VUT v Brně – od historie k současnosti, In *Sborník československé konference „EXPERIMENT 04“*, VUT v Brně, 2004, s. 315-326

MISCHLER, A. Dowelled timber connections with high efficiency, Proc. of *the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM), 1st Symposium on Timber Engineering*, , Stockholm, Švédsko, 1999, p.99-108.

MISCHLER, A.,PRION, H., LAM, F. Load-carrying behaviour of steel-to-timber dowel connections, Proc. of the *World Conference of Timber Engineering 2000*, Whistler Resort, BC, Kanada, 2000, 8 p.

MÖLLER, T. En ny metod för beräkning av spikförband, In *Report No. 117*, Chalmers University of Technology, Švédsko, 1951

PAZDERA L., SMUTNÝ J., KOŘENSKÁ M., JANOŠTÍK D., PROUZOVÁ P., VYROUBAL P. Využití akustické emise pro měření spojů kov-dřevo při zkoušce na tah, *42nd International Conference, Experimental Stress Analysis*, 2004, Kašperské Hory, pp. 205-208

PEDERSEN, M.U., CLORIUS, C.O., DAMKILDE, L., HOFFMEYER, P. Dowel Type Connections with Slotted-in Steel Plates., Proc. of the *CIB W18 Meeting*, Gratz, Rakousko, 1999, p.17.

PŘIBÁŇ, M., HORA, P. Prostorová lokalizace zdrojů AE v tlustostěnných konstrukcích, *Czech Comitee of the European Mechanics Society Colloquium*, CDM UT AVČR, Plzeň, 2002, 8p.

SALOKANGAS, L., JUTILA, A. *Follow-up Tests of the Uusisalmi Bridge*, Nordic Timber Bridge Project, Helsinki University of Technology, Laboratory of Bridge Engineering, Nordic Wood, Espoo, 1999

SCHMID, P. *Metodika zpracování výsledků bezkontaktního měření videoextenzometrem Messphysik ME 46*, 2001, Fakulta stavební VUT v Brně

SCHMIDT, M. BLASS, H. J., FRASSON, R. P. M. Effect of Distances, Spacing and Number of Dowels in a Row on the Load Carrying Capacity of Connections with Dowels, Failing by Splitting, In. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, *Working Commission W18* - Timber Structures, Kyoto, Japan, 2002, 12 p.

SMITH, I.A., WHALE, L.R.J. Mechanical timber joints, In *TRADA Research report 18/86*, Hughenden Valley, UK, 1986

STRAKA, B., MELCHER, J. *Analýza dřevěných konstrukcí se styčníkovými plechy ve Frýdlantu nas Ostravicí, Zastřešení centrální tenisové haly 1998, zastřešení sportovní haly*, Brno, 1997/98.

STRAKA, B. Conclusions from Theoretical Analysis, Construction and Behaviour of Timber Spatial Structures, In: Proceedings of *the 6th World Conference on Timber Engineering*, Whistler, BC, Kanada, 2000, 6 p.

VAN DER PUT, T.A.C.M. Tension perpendicular to the grain at notches and joints. Proc. of the *CIB W18 Meeting*, Lisabon, Portugalsko, 1990, Paper 23-10-1

VEJPUSTEK, Z., KUBZA, K. Modelování dřevěných spojů programem ANSYS . In *VII. Vedecká konferencia s medzinárodnou účasťou*. 1st. ed. Košice: TU v Košiciach, Stavebná Fakulta, Košice, Slovensko, 2002, vol. 8, p.191-194

WILKINSON, T.L., ROWLANDS, R.E. Analysis of mechanical joints in wood, In *Journal of Experimental Mechanics,* 21(11), UK, 1981, p. 408-414

ČSN ISO 609-1: 1996. Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

ČSN ISO 7144: 1997. Dokumentace Formální úprava disertací a podobných dokumentů. Praha: Český normalizační institut, 1997. 21 s.

8 CURRICULUM VITAE

Jméno:	Petr Hradil
Kontaktní adresa:	Řadová 442, 73934 Šenov u Ostravy
Telefon:	+420 777 743 288
E-mail:	petr.hradil@post.cz
Datum narození:	21.4.1979
Národnost:	česká

Vzdělání:	2002-2004	Fakulta stavební VUT v Brně doktorský studijní program obor: Teorie konstrukcí státní doktorská zkouška: 2004
	1997-2002	Fakulta stavební VUT v Brně magisterský studijní program obor: Pozemní stavitelství státní závěrečná zkouška: 2002 (s vyznamenáním)
	1993-1997	Gymnázium Ostrava-Hrabůvka se zaměřením na programování a výpočetní techniku maturitní zkouška: 1997 (s vyznamenáním)
Odborné zkušenosti:	2003	Kovoprojekta, a.s., Brno pozice: projektant
	1998-2001	VUT v Brně, výzkumné pracoviště DP FCE pozice: programátor, výzkumný asistent

Jazykové znalosti:	anglický jazyk - komunikativní znalost slovem i písmem francouzský a finský jazyk - základní znalost
Práce s PC:	CAD programy (AutoCAD, příp. Allplan, Archicad) FEM programy (Nexis, Lusas, příp. Ansys) grafické programy (Photoshop, Corel, 3DS MAX apod.) programovací jazyky (Pascal, php)

Kurzy a další vzdělání:	2004	professional English course při FAST, VUT v Brně
	1997	řidičský průkaz skupiny B

Záliby: turistika, trekking, umění, hudba, botanika, práce s PC, navrhování internetových stránek, propagační grafika

9 ABSTRACT

The dissertation is focused on the analysis of semi-rigid behaviour of steel-to-timber connections with slotted-in steel plates particularly on determining their non-linear behaviour, rotational and transitional rigidity, loading capacity and failure mode. Generally mechanical joints are modelled either as fully rigid or ductile joints. In reality, however their behaviour is semi-rigid both in rotation and translation. This simplification leads to uneconomical design and in particular cases even to unsafe design. The experimental analysis of mechanical joints subjected to tension and bending includes the development of new analytical approaches considering non-destructive and contactless measurements.

Joints are the most critical components of timber structural systems and often govern the overall strength, serviceability, durability, and fire resistance. Modern timber and timber-based structures thus require also new innovative connections. It is needed to describe the behaviour of a single specific fastener and the whole connection system as well in joint development.

Experimental and theoretical analysis with proper evaluation methods (to obtain characteristic values and nominal design values) is the base of design procedure for new types of high-strength optimised joints. Such connections have to fully satisfy the essential requirements that the entire structural system is statically stable, individual elements meet strength and stiffness requirements, and global deflections do not exceed appropriate limits.

The analytical approach was launched in the 1930's. Later it was continued with the development of Johansen's theory that nowadays forms the base for European Yield Model and the Eurocodes. The theory is based on the behaviour of a single fastener. The group behaviour of fasteners as well as splitting and plug-shear failure was introduced in the late 1980's by Mischler et. al. Nowadays there are hundreds of connections systems available all over the world and their further development and optimisation is the aim of many research laboratories.

In order to find out the real behaviour of steel-to-timber connection with slotted-in steel plates were tested six series of those joints in the laboratory of Department of Civil and Environmental Engineering at Helsinki University of Technology and Institute of Metal and Timber Structures at Brno University of Technology.

The aim of experiments was to determine load-dependent joint characteristic values as rotational rigidity, perpendicular-to-grain and parallel-to-grain transitional rigidity and supplementary values as rotational and bending capacity of connection, parallel-to-grain modulus of elasticity and shear modulus as governing attributes of beam deflection. Different failure modes as splitting, fastener yield and embedment, compressive and tensile cracks in sawn wood and plug-shear failure in laminated veneer lumber were initiated and observed within the experiments.