



**EVROPSKÁ UNIE**  
**EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ**  
**INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI**

## Výzkumná zpráva

**Zhotovitel:** VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební (dále jen FAST)  
Ludvíka Podéště 1875/17, 70833 Ostrava-Poruba

**Odpovědný zástupce zhotovitele:** Prof. Ing. Darja Kubečková Skulinová, Ph.D.  
děkanka FAST

**Zodpovědný řešitel:** doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.

a

**Objednavatel:** Moravskoslezský dřevařský klastr, o.s.  
Studentská 6202, 708 33 Ostrava – Poruba

**Zastoupený:** Ing. Jiří Pohloudek, prezident  
Ing. Miroslav Machala, druhý viceprezident

**IČ objednatele:** 270 03 949

**DIČ objednatele:** CZ 270 03 949

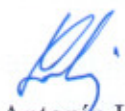
**Bankovní spojení objednatele:** RB 1091107499/5500

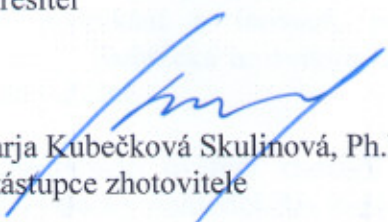
**Předmět výzkumné zprávy:**

- 1.1. Řešení příčnicku na dřevěné mostní konstrukci
- 1.2. Řešení připojení příčnicku na hlavní nosník

**15. 12. 2011**

V Ostravě, dne .....

  
doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.  
zodpovědný řešitel

  
Prof. Ing. Darja Kubečková Skulinová, Ph.D.  
odpovědný zástupce zhotovitele

## Obsah:

Úvod	2
Kap. 1. Experimentální ověření dřevěné mostní konstrukce ...	3
Kap. 2. Experimentální ověřování a numerické modelování připojení příčnicku na hlavní nosník ...	9
3. Závěr ...	25
4. Použité zdroje ...	25

## Úvod

Zkušenosti ze zahraničí i z ČR ukazují, že pro přemostění menších rozpětí (mezi 5 a 20 m) je výhodné ze statických, ekonomických i estetických důvodů použít dřevěný trémový most s hlavními nosníky z lepeného lamelového dřeva a s prvkovou mostovkou.

Obsahem výzkumné zprávy je shrnutí výsledku výzkumu připoje ocelového příčnicku na dřevěný hlavní nosník trémové mostní konstrukce. Výzkum byl prováděn v rámci projektu Rozvoj činnosti dřevařského klastru a zkvalitnění vazeb mezi VŠ a podnikatelskou sférou, projekt je spolufinancovaný z Operačního programu podnikání a inovace, program Spolupráce. Zhotovitelem projektu je Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Spolupracující organizací na projektu je Žilinská univerzita v Žilině.

Kapitola 1 obsahuje popis a výsledky experimentálního ověření chování reálné dřevěné mostní konstrukce. Kapitola 2 obsahuje popis a výsledky numerického modelování připoje ocelového mostního příčnicku k hlavnímu nosníku a jeho experimentální ověření na modelech.



## 1. Experimentální ověření dřevěné mostní konstrukce

### 1.1 Úvod - specifikace problematiky

V rámci výzkumného úkolu provedl Zhotovitel ve spolupráci s Katedrou stavebních konstrukcí a mostov ŽU v Žiline návrh jednotlivých nosných prvků a spojů dřevěných mostních konstrukcí. Z hlediska optimalizace návrhů jednotlivých nosných prvků a spojů těchto mostů, je potřebné provést teoretickou i experimentální analýzu chování těchto konstrukcí i jejich jednotlivých komponent. Z výše uvedených důvodů byl zrealizován projekt experimentálního ověření chování dřevěné nosné konstrukce mostu pod statickým i dynamickým zkušebním zatížením. Právě detaily navržené při realizaci projektu mostu, zejména detail připojení příčnicku na hlavní nosník, byl vedle standardních měření předmětem ověření v rámci realizované statické zatěžovací zkoušky.

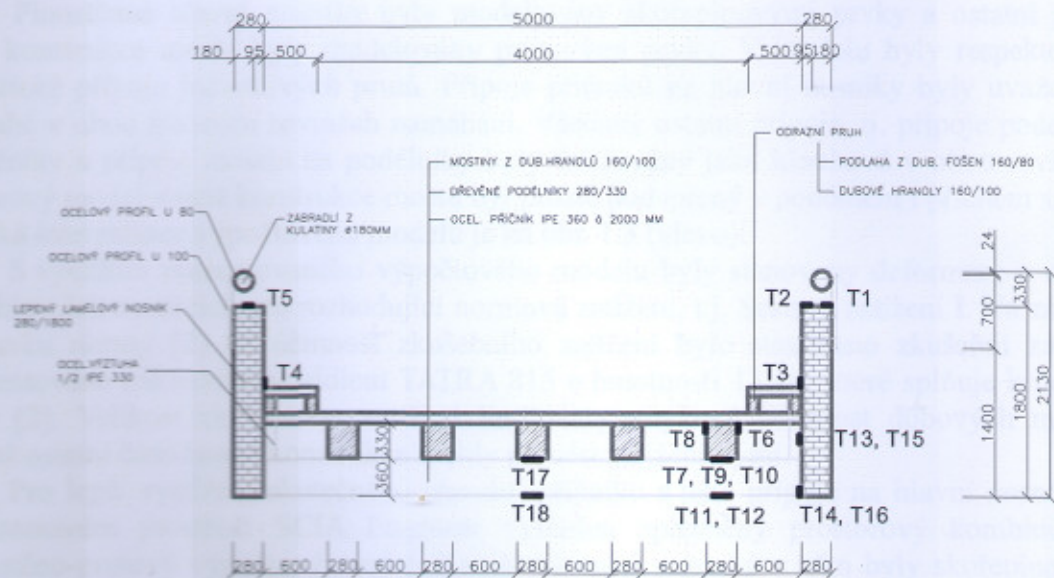
### 1.2 Popis mostní konstrukce

Nosnou konstrukci mostu tvoří dva hlavní dřevěné nosníky, ocelové příčnický, dřevěné podélníky nesoucí dřevěné mostiny a ocelové podmostovkové podélné ztužení. Teoretické rozpětí hlavních nosníků je 11,94 m, jejich celková délka je 12,24 m a výška je 1800 mm. Osová vzdálenost hlavních nosníků je 5,28 m a celková šířka mostu je 5,56 m. Hlavní nosníky jsou navrženy jako prostě podepřené plnostěnné trámy z lepeného lamelového dřeva profilu 280/1800 mm pevnostní třídy SA. V dolní části jsou navzájem propojené v šestinách rozpětí ocelovými polorámy, které jsou tvořeny příčnický z válcovaných profilů IPE 360 a svislými výztuhami navrženy z profilu T výšky 165 mm (1/2 IPE 330) navařenými na čelní desky připojují příčnicku na hlavní nosník. Samotný přípoj je řešen pomocí čelní desky z plechu tloušťky 15 mm a dvanácti svorníků  $\varnothing$  20 mm, umístěných ve dvou řadách po šesti. Ocelový polorám je navržen z oceli S 355.

Na příčnický jsou v osových vzdálenostech po 880 mm položeny dřevěné podélníky (LLD SA) profilu 280/330 mm, které probíhají spojitě přes celou délku mostu. Na horní plochy podélníků jsou spojitě položeny mostiny z dubového dřeva 160/100 mm, které jsou k podélníkům připevněny dvojicí svorníků  $\varnothing$  16 mm. Mostiny jsou kladeny jedna vedle druhé s mezerami 2-3 cm.

Tuhost nosné konstrukce ve vodorovném směru je zajištěna podmostovkovým podélným ztužením z ocelových válcovaných uhelníků L 90×90×8 z materiálu S235. Na horních plochách hlavních nosníků je osazeno zábradlí, které je navrženo z krátkých sloupků profilu U 100 v osových vzdálenostech po 1,5 m a dřevěného madla z kulatiny  $\varnothing$  180 mm připevněného pomocí profilů U 80 na sloupky zábradlí.





Obr. 1.1: Příčný řez nosnou konstrukcí mostu

Spodní stavbu tvoří dvě původní železobetonové opěry, které byly rozšířeny dobetonováním nových železobetonových úložných prahů a závěrných zdí. Současně byly doplněny o nová železobetonová svahová křídla. Popis mostu doplňuje jeho příčný řez na obr. 1.1 s vyznačením vytipovaných míst měření napjatosti a pohled na most na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Pohled na most

### 1.3. Příprava zatěžovací zkoušky

V rámci přípravy zatěžovací zkoušky byly realizovány potřebné analýzy, jejichž záměrem bylo stanovit velikost a polohy zkušebního zatížení podle požadavků normy [2].

Most byl v duchu normy [1] navržen na zatížení silniční dopravou třídy B, přičemž rozhodující byl zatěžovací model Sestava zatížení I. Pro globální analýzu nosné konstrukce mostu byly vytvořeny dva prostorové výpočtové modely, pomocí nichž byly stanoveny požadované deformace a vnitřní síly zkoumaných konstrukčních prvků nosné konstrukce.

Jednodušší prostorový kombinovaný desko-stěno-prutový výpočtový model byl navržen v softwarovém prostředí programu SCIA Engineer, využívající metodu konečných



prvků. Plnostěnné hlavní nosníky byly modelovány skořepinovými prvky a ostatní prvky nosné konstrukce mostu byly modelovány prutovými prvky. V modelu byly respektovány excentrické přípoje jednotlivých prutů. Přípoje příčníků na hlavní nosníky byly uvažovány jako tuhé v obou hlavních rovinách namáhání. Všechny ostatní přípoje, tj. přípoje podélníků na příčníky a přípoje mostin na podélníky byly uvažovány jako kloubové v obou rovinách. Prostorový model nosné konstrukce mostu byl prostě podepřený v podélném i příčném směru. Grafická interpretace výpočtového modelu je na obr. 1.3 (vlevo).

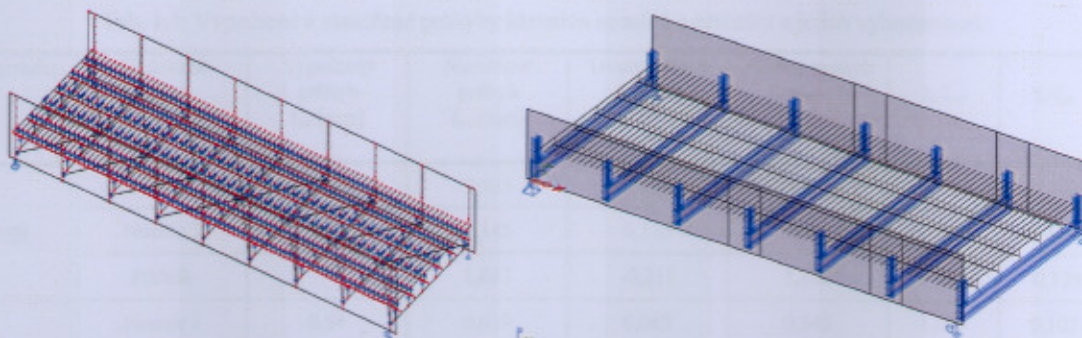
S využitím prezentovaného výpočtového modelu byly stanoveny deformace a vnitřní síly v hlavních nosnicích pro rozhodující normová zatížení, t.j. Sestava zatížení I. Na základě požadavku normy [2] na účinnost zkušebního zatížení bylo stanoveno zkušební zatížení reprezentované nákladním vozidlem TATRA 815 o hmotnosti 13,4 t, které splňuje kritérium normy [2]. Velikost zkušebního zatížení limitovala smyková únosnost dubových mostin, přičemž ostatní části nosné konstrukce mohly přenést zatížení vyšší.

Pro lepší vystižení skutečného chování příčnicku a jeho přípoje na hlavní nosník byl v programovém prostředí SCIA Engineer vytvořen zpřesněný prostorový kombinovaný desko-stěno-prutový výpočtový model. Kromě hlavních nosníků v něm byly skořepinovými prvky modelovány i všechny příčné ocelové polorámy. Ostatní prvky nosné konstrukce mostu, t.j. podélníky a mostiny byly modelovány prutovými prvky. Svorníky připojující čelní desku k hlavnímu nosníku byly modelovány pomocí prutových prvků s reálnými průřezovými i materiálovými charakteristikami. Plošný kontakt mezi čelní deskou a stěnou hlavního nosníku byl vzhledem k omezené možnosti programu nahrazen diskretně vloženými pruty ze stejného materiálu jako hlavní nosníky. Tyto „kontaktní“ pruty byly rozmístěny ve vhodně zvoleném ortogonálním rastru 25/40 mm u vyšetřovaného příčnicku, resp. 50/80 mm u ostatních příčníků. Všechny kontaktní pruty byly ve výpočtovém modelu vyloučeny z působení v tahu pomocí přiřazené nelinearity prutu. Geometrické schéma zpřesněného výpočtového modelu je znázorněno na obr. 1.3 (vpravo).

Bylo rozhodnuto zaznamenat kromě průhybů obou hlavních nosníků a vytipovaného příčnicku i měření napjatosti ve vytipovaných místech obou hlavních nosníků, jednoho z příčníků spolu s jeho přípojem na hlavní nosník a ve vytipovaných místech jednoho z podélníků.

Po prohlídce mostu in situ se ukázalo nereálné sledování průřezů hlavních nosníků ve středu jejich rozpětí, protože Bařův kanál je využíván jako plavební prostor pro turistické plavby, takže tu nebylo možné aplikovat relativní snímače deformací. Proto bylo dohodnuto zaměřit deformace hlavních nosníků v místě druhého krajního příčnicku, t.j. ve vzdálenosti 1,99 m od uložení nosné konstrukce na huštěnovickou opěru, který byl dostupný ze břehu. Současně byl sledován i tento příčník měřením průhybu ve středu jeho délky a napjatost ve vytipovaných místech podle obr. 1.1. Sledována byla rovněž napjatost krajního podélníku a obou hlavních nosníků ve středu jejich délky ve třech místech průřezu podle obr. 1.1. Pro uvedení měření místa byly přizpůsobeny tři polohy zkušebního zatížení. V první poloze bylo zkušební vozidlo umístěno do středu mostu symetricky vůči oběma hlavním nosníkům tak, že první zadní náprava vozidla byla situována nad středním příčnickem. Ve druhé poloze bylo vozidlo umístěno první zadní nápravou nad druhý krajní příčník mostu tak, aby jeho podélný obrys licoval s podélnou hranou zvýšeného obrubníku. Třetí poloha byla podobná, jen s posunem vozidla do neúčinnější polohy vzhledem ke středu krajního podélníku. Vypočtené hodnoty průhybů hlavních nosníků a příčnicku a rovněž hodnoty vypočtených napětí hlavních nosníků a podélníku jsou uvedeny v tab.1.1 a 1.2.





Obr. 1.3: Výpočtové modely nosné konstrukce mostu (zpřesněný model – vpravo)

#### 1.4. Realizace zatěžovací zkoušky

Po zapojení snímačů průhybů a poměrných přetvoření byly zaznamenány počáteční hodnoty měřených veličin v jednotlivých místech. Následně se zkušební zatížení postavilo do první polohy do středu mostu. V časových intervalech po 10 min. byly odečítány a zaznamenávány měřené veličiny. Průhyby hlavního nosníku a příčnicku byly zaznamenávány odporovými snímači TR 50, které snímaly i zatlačení ložisek. Napjatost vytipovaných průřezů byla zaznamenávána pomocí měřených poměrných přetvoření, snímaných tenzometry LY 41-20/120, nalepenými na dřevěných prvcích a tenzometry LY 11-6/120, nalepených na ocelovém příčnicku. Naměřené poměrné deformace byly zaznamenávány aparaturou SPIDER 8. Sedání podpor mostu se kontrolovalo geodeticky nivelačním přístrojem. Současně byla měřena teplota vzduchu a teplota a vlhkost sledovaných prvků nosné konstrukce. Po ustálení měřených veličin (cca 1 hod.) opustilo zkušební zatížení mostní konstrukci a odečetly se zbytkové deformace. Následně se popsany postup zatěžování opakoval i pro zbylé dvě zatěžovací polohy.

K vypracování hodnověrného teoretického modelu je třeba znát co nejpřesnější hodnoty skutečných materiálových charakteristik materiálů použitých na mostě. Jedná se zejména o materiálové charakteristiky dřevěných nosných prvků (hlavních nosníků i podélníků), k jejichž stanovení je možné použít několik nedestruktivních metod (ultrazvuk, rezonanční metodu, penetrační metodu aj. – viz [3]). Pomocí penetrační metody využívající přístroj PILODYN 6J a naměřené vlhkosti dřeva (elektrickým vlhkoměrem) byla stanovena hustota dřeva ( $\rho_{g,k} = 355 \text{ kg/m}^3$ ) a následně i průměrný modul pružnosti podél vláken ( $E_{0,mean,g} = 7992 \text{ MPa}$ ). Penetrační metoda využívající PILODYN 6J je založena na měření hloubky vniku ocelového trnu do dřeva vháněného energií 6 Joule. Hloubka vniku poměrně dobře koreluje s hustotou dřeva. Bylo provedeno přibližně 120 měření, která byla následně statisticky vyhodnocena. Průměrná vlhkost dřeva činila 12,65%.

#### 1.5. Vyhodnocení výsledků zatěžovací zkoušky a porovnání s modely

Naměřené průhyby hlavních nosníků a příčnicku, naměřená poměrná přetvoření průřezů a z nich stanovená napětí vytipovaných prvků byly vyhodnoceny podle předepsaných postupů a kritérií uvedených v normě [2]. Výsledky vyhodnocení a srovnání naměřených a vypočtených veličin jsou uvedeny v tab. 1.1 a 1.2.



Tab. 1.1: Vypočtené a naměřené průhyby hlavních nosníků a příčnicku a jejich vyhodnocení

Zatěžovací poloha	Sledované místo	Vypočtený průhyb $f_{cal}$ [mm]	Naměřený průhyb $f_{tot}$ [mm]	Trvalý průhyb $f_r$ [mm]	Pružný průhyb $f_e = f_{tot} - f_r$	$f_e/f_{cal}$	$f_r/f_{tot}$
Střed mostu	Nosník 1	1,09	0,925	0,120	0,805	0,739	0,130
	Nosník 2	1,23	1,145	0,135	1,010	0,821	0,118
	Příčnick	2,05	1,637	-0,211	1,848	0,901	-0,129
Druhý krajní příčnick	Nosník 1	0,54	0,610	0,065	0,545	1,009	0,107
	Nosník 2	1,11	1,160	0,095	1,065	0,959	0,082
	Příčnick	3,44	2,837	-0,002	2,839	0,825	-0,001
Podélník	Nosník 1	0,54	0,545	-0,020	0,565	1,046	-0,037
	Nosník 2	1,11	1,130	0,015	1,115	1,005	0,013
	Příčnick	3,22	2,746	-0,083	2,828	0,878	-0,030

Podle normy [2] je vyhovující chování nosné konstrukce mostu při statické zatěžovací zkoušce dané splněním následujících kritérií:

Dřevěné nosné prvky:

$$0,60 \leq f_e/f_{cal} \text{ resp. } \sigma_e/\sigma_{cal} \leq 1,10$$

$$f_r/f_{tot} \text{ resp. } \sigma_r/\sigma_{tot} \leq 0,30$$

Ocelové nosné prvky:

$$0,80 \leq f_e/f_{cal} \text{ resp. } \sigma_e/\sigma_{cal} \leq 1,05$$

$$f_r/f_{tot} \text{ resp. } \sigma_r/\sigma_{tot} \leq 0,10$$

kde  $f_{cal}$ ,  $\sigma_{cal}$  je vypočtený průhyb, resp. napětí;

$f_{tot}$ ,  $\sigma_{tot}$  je naměřený celkový průhyb, resp. napětí po zohlednění zatlačení ložisek;

$f_r$ ,  $\sigma_r$  je naměřený trvalý průhyb, resp. napětí při zohlednění trvalého zatlačení ložisek.

Tab. 1.2: Vypočtená a naměřená napětí hlavních nosníků a krajního podélníku

Zatěžovací poloha	Prvek	Průřez	Vypočtené napětí $\sigma_{cal}$ [MPa]	Naměřené napětí $\sigma_{tot}$ [MPa]	Zbytkové napětí $\sigma_r$ [MPa]	Pružné napětí $\sigma_e = \sigma_{tot} - \sigma_r$ [MPa]	$\sigma_e/\sigma_{cal}$	$\sigma_r/\sigma_{tot}$
Střed mostu	Nosník 1	T1	-1,390	-1,178	-0,126	-1,052	0,757	0,107
		T2	-0,950	-0,848	-0,061	-0,787	0,829	0,072
		T3	0,080	0,086	0,016	0,070	0,874	0,187
	Nosník 2	T4	0,090	0,101	0,010	0,091	1,011	0,099
		T5	-1,025	-0,792	-0,116	-0,676	0,659	0,147
Podélník	Podélník	T6	-1,402	-0,622	0,014	-0,636	0,454	-0,023
		T7	1,482	0,864	0,095	0,769	0,519	0,110
		T8	-1,439	-0,893	0,176	-1,069	0,743	-0,197



Pomocí zpřesněného výpočtového modelu byla nelineárním výpočtem, zohledňujícím lokální nelinearity v kontaktu mezi čelní deskou a stěnou hlavního nosníku, stanovena napětovo-deformační odezva příčnicku na zatížení zkušebním vozidlem ve všech vyšetřovaných místech. Porovnání těchto hodnot se skutečně naměřenými hodnotami napětí a průhybů je uvedeno v tab. 3.

Tab. 1.3: Vypočtené a naměřené hodnoty napětí [MPa] a průhybů [mm] na příčnicku

	Pod krajním podélníkem				Ve vetknutí do hlavního nosníku				Uprostřed		
	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	Průhyb
Naměřené hodnoty	-10,99	-17,54	18,45	14,41	6,91	-0,40	-0,96	-0,40	-42,10	42,34	2,84
Vypočtené hodnoty	-14,79	-13,47	18,24	19,05	5,05	-8,71	5,49	-5,74	-27,12	32,08	1,90

### 1.6. Závěry ze zatěžovací zkoušky

Závěrem je možné konstatovat, že ani jeden z teoretických výpočtových modelů nevystihuje úplně skutečné chování nosné konstrukce mostu. Z vyhodnocení výsledků statické zatěžovací zkoušky prezentovaného v tab. 1.1 a tab. 1.2 je zřejmé, že hlavní nosníky mostu se chovají podle předpokladů statického výpočtu a zvoleného výpočtového modelu. Deklarují to výsledky naměřených průhybů a napětí. V podélníku a příčnicku jsou však výsledky už méně přesvědčivé. V prvním, staticky jednodušším výpočtovém modelu, jsou výsledky ovlivněny zejména dokonale tuhým přípojem ocelového polorámu na hlavní dřevěný nosník. Ve druhém, zpřesněném a staticky náročnějším výpočtovém modelu, je napětová odezva v horní pásnici příčnicku výrazně ovlivněna špičkou napětí v místě diskrétního připojení podélníků modelovaných prutovými prvky. Podobně i napětí na čelní desce jsou ovlivněna lokálními špičkami napětí v místě připojení diskrétních kontaktních prutů, modelujících plošný kontakt mezi čelní deskou a stěnou hlavního nosníku. Dalším faktorem, který může výrazně ovlivnit výsledky statického výpočtu, je poddajnost všech přípoju dřevěných konstrukčních prvků, která nebyla v obou výpočtových modelech zohledněna. Na druhé straně i výsledky experimentálního měření mohou vykazovat určitou chybu, jejíž vliv se zvyšuje se snižujícími se absolutními hodnotami napětí.

Následně byl proto vyšetřovaný konstrukční detail podroben dalšímu experimentálnímu výzkumu, tentokrát v laboratorních podmínkách, a také podrobnější numerické analýze s využitím softvéru ANSYS.



## 2. Experimentální ověřování a numerické modelování připojení příčnicku na hlavní nosník

### 2.1 Úvod

Z predbežnej statickej a dynamickej analýzy navrhnutých konštrukcií s drevenými hlavnými plnostennými nosníkmi a dolnou mostovkou, v ktorej sú vhodne aplikované oceľové konštrukčné prvky, vyplynul ako jeden z kľúčových konštrukčných detailov prípoj oceľového priečnicka na drevený hlavný nosník. Tento konštrukčný detail bol okrem iného podrobnejšie sledovaný aj pri numerickej a experimentálnej analýze jestvujúceho dreveného mosta (viz predchozí kapitoly).

Z dôvodu zabezpečenia stability hlavného nosníka voči klopeniu bol v predbežných analýzách vyšetrovaných nosných konštrukcií tento prípoj uvažovaný ako dokonale tuhý, čo malo zároveň priaznivý vplyv na celkovú tuhosť konštrukcie ako aj jej dynamické vlastnosti. Na druhej strane je však takáto úvaha v rozpore s obvykle zaužívaným postupom, keď prípoje drevených konštrukčných prvkov s mechanickými spájacími prostriedkami sú vzhľadom na ich poddajnosť pri globálnych analýzách uvažované ako nominálne kĺbové. Je zrejmé, že sa jedná o dva extrémne prípady vymedzujúce hranice pre skutočné pôsobenie tohto prípoja, ktoré závisí od jeho konštrukčného usporiadania. Problematika polotuhých prípojov je veľmi dobre a podrobne preskúmaná predovšetkým v aplikáciách oceľových konštrukcií ako aj pre prípady kombinovaných oceľo-betónových uzlov, avšak v prípade drevených konštrukcií ako aj kombinovaných dreveno-ocelových konštrukcií nie je stále dopracovaná. Oproti oceľovým konštrukciám sa situácia komplikuje najmä v súvislosti s nehomogenitou a anizotropiou dreva ako aj v dôsledku nelineárneho správania sa dreva v otláčení.

V snahe vystihnúť skutočné správanie prípoja oceľového priečnicka na drevený hlavný nosník pomocou čelnej oceľovej dosky a svorníkov bol tento konštrukčný detail modelovaný detailnejšie s využitím nelineárnych prútových prvkov. Avšak ani tento krok nevedol k uspokojivejším výsledkom z hľadiska porovnania priebehu vypočítaných hodnôt normálových napätí na oceľovom priečnicku s hodnotami nameranými na reálnej konštrukcii počas statickej zaťažovacej skúšky. Navyše, uvedený spôsob modelovania tohto prípoja je pomerne náročný a pre praktické modelovanie nie veľmi vhodný.

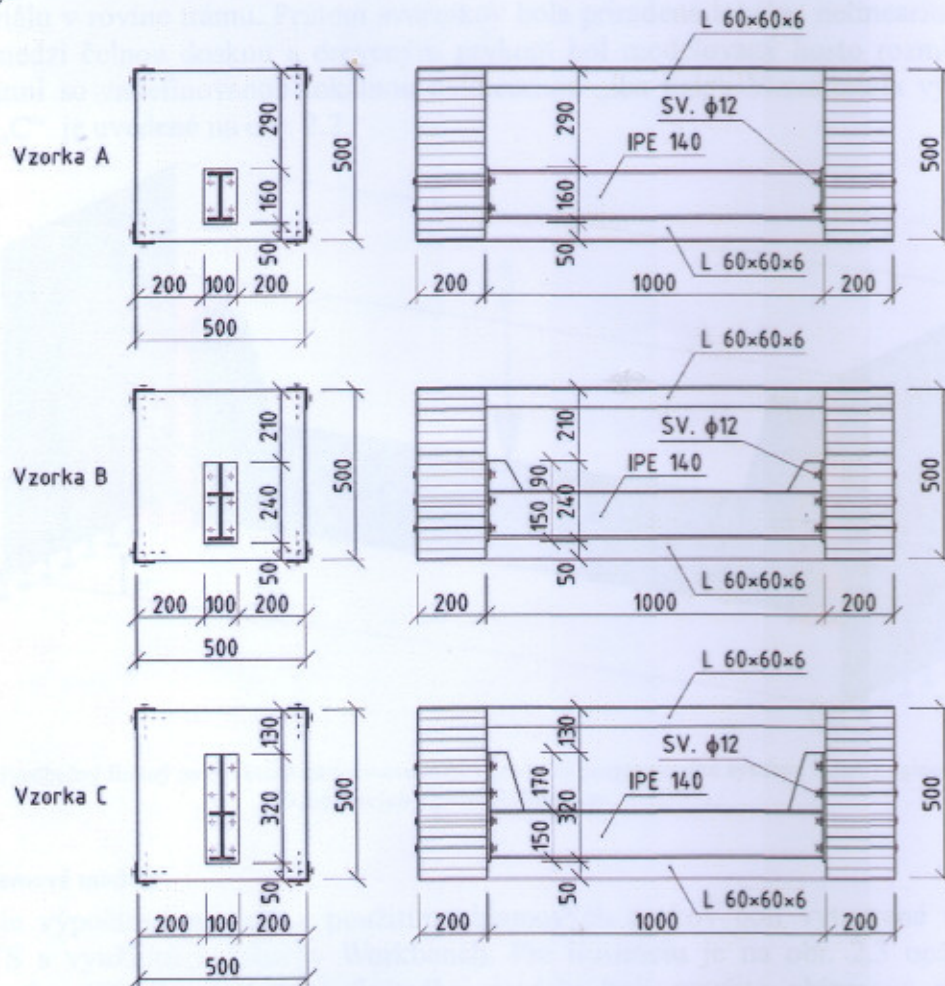
Z tohto dôvodu, ako aj s ohľadom na už uvedené závery predbežných analýz, sme sa rozhodli vykonať ďalšiu, detailnejšiu experimentálnu a teoretickú analýzu vyšetrovaného problémového konštrukčného detailu, na základe ktorej by bolo možné navrhnúť určité odporúčania pre jeho praktické modelovanie pomocou bežne používaných softvérových produktov využívajúcich metódu konečných prvkov pre statickú a dynamickú analýzu konštrukcií.

Experimentálna analýza vyšetrovaného detailu je založená na laboratórnom testovaní špeciálne pripravených skúšobných vzoriek. Pre podrobnú numerickú analýzu sledovaného detailu sme za účelom možnej vzájomnej konfrontácie využili programové prostredia softvérových produktov SCIA Engineer a ANSYS, využívajúcich metódu konečných prvkov. Kým prvý z uvedených programov predstavuje typický príklad bežne používaného programu vhodného pre praktické modelovanie nosných konštrukcií stavieb, druhý produkt je všeobecne považovaný za jeden z najuniverzálnejších programových systémov, nachádzajúcich veľmi široké uplatnenie v rôznych oblastiach výskumu. Vzhľadom na značnú náročnosť práce s týmto systémom je však na druhej strane jeho využitie pre potreby praktického navrhovania stavebných konštrukcií menej bežné. Pre detailnejšiu teoretickú analýzu prípoja vhodnejšiu na praktické dimenzovanie sme preto využili aparát, ktorý ponúka pre výpočet uzlov v konštrukciách metóda komponentov. Táto metóda vychádza z prác realizovaných v sedemdesiatych a osemdesiatych rokoch minulého storočia v Holandsku (napr. Zoetemeijer), pričom bola vyvinutá pôvodne pre navrhovanie uzlov oceľových konštrukcií, o zásadách ktorého pojednáva norma STN EN 1993-1-8. Jej aplikácia na nami vyšetrovanom konštrukčnom detaile je založená na výsledkoch predchádzajúcej numerickej a experimentálnej analýzy.



## 2.2 Návrh a príprava experimentálneho modelu

Za účelom overenia skutočného pôsobenia prípoja ocelového konštrukčného prvku na drevený nosný prvok bolo navrhnutých a pripravených celkovo deväť skúšobných vzoriek. Vzorky pozostávali z dvoch drevených blokov z lepeného lamelového dreva pevnostnej triedy GL24h rozmerov 200×500×500 mm, spojených v dolnej časti nosníkom z valcovaného profilu IPE 140, navrhnutého z ocele S355. Drevené bloky, predstavujúce hlavné plnostenné nosníky nosnej konštrukcie mosta alebo lávky, boli spojite podoprené pevným ložiskom na jednom, resp. posuvným ložiskom na druhom konci. Ocelové nosníky predstavujúce priečniky mostovky boli na tieto drevené bloky pripojené pomocou ocelových svorníkov, resp. závitových tyčí priemeru  $\phi 12$  mm pevnostnej triedy 5.6, a to v troch rôznych variantoch usporiadania spoja s označením A, B, C. Jednotlivé varianty sa od seba vzájomne odlišovali počtom radov skrutiek nad priečnikom a tomu zodpovedajúcou výškou výstuhu čelnej dosky (obr. 2.1). V každom variante boli vyhotovené po tri skúšobné vzorky.



obr. 2.1: Usporiadanie laboratórných skúšobných vzoriek

Predmetom experimentu bolo vyšetrovanie tuhosti samotného prípoja ocelového priečnika na drevený nosník. Aby sme eliminovali pootočenie oboch drevených blokov pri priečnom zaťažení priečnika, boli oba tieto prvky vo všetkých štyroch rohoch stabilizované ocelovými tyčami z ocelových valcovaných uholníkov L 60×60×6 mm, pripojenými pomocou ocelových skrutiek do dreva priemeru  $\phi 8$  mm. Horné uholníky pritom plnili funkciu rozpier, uholníky v spodnej časti pôsobili ako ťahadlá.

## 2.3 Predbežná numerická analýza prípoja

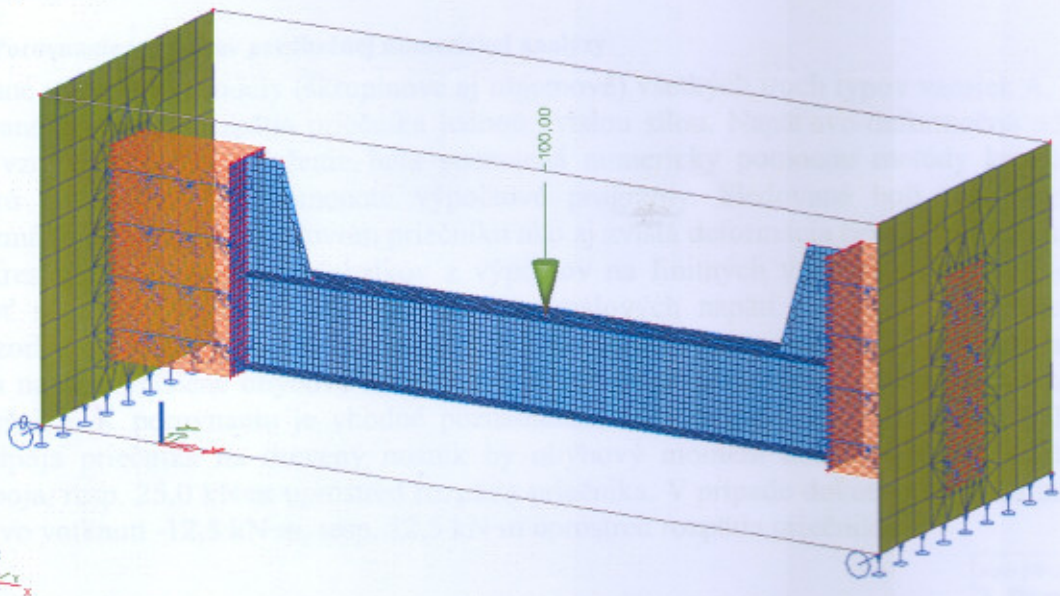
Pre všetky tri uvedené typy skúšobných vzoriek boli za účelom predbežnej statickej analýzy



spracované numerické výpočtové modely pomocou dvoch spomínaných softvérových produktov využívajúcich metódu konečných prvkov.

### 2.3.1 Škrupinové modely

Najskôr boli spracované výpočtové modely všetkých variantov vyšetřovaného konštrukčného detailu s využitím programového prostredia SCIA Engineer. Drevený trám ako aj oceľový priečník vrátane čelných dosiek a výstuh bol modelovaný pomocou škrupinových konečných prvkov s priradením príslušnej hrúbky jednotlivých častí, stužujúce uholníky a svorníky pripájajúce priečník k drevenému trámu boli modelované prúťovými prvkami. Efekt zatlačenia svorníkov do dreveného prvku bol zohľadnený pomocou líniového pružného podopretia prúťov modelujúcich svorníky, pričom tuhosť podopretia bola stanovená z modulu pružnosti dreva v smere kolmo na vlákna. Ako materiál bolo uvažované lepené lamelové drevo pevnostnej triedy GL24h so zodpovedajúcimi štandardnými fyzikálno-mechanickými vlastnosťami, pričom bola zohľadnená aj ortotropia materiálu v rovine trámu. Prúťom svorníkov bola priradená lokálna nelinearita typu „iba ťah“. Kontakt medzi čelnou doskou a dreveným prvkom bol modelovaný husto rozmiestnenými diskretnými prúťmi so zadanou lokálnou nelinearitou „iba tlak“. Vizualizácia výpočtového modelu vzorky „C“ je uvedená na obr. 2.2.

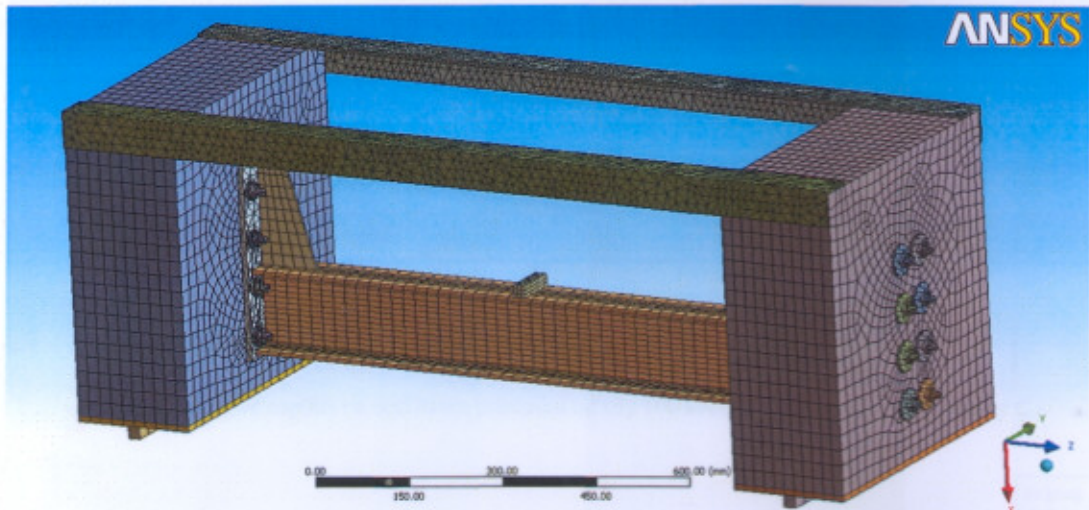


obr. 2.2: Predbežný finitný model konštrukcie vytvorenej v prostredí programového systému SCIA Engineer s využitím škrupinových a prúťových prvkov

### 2.3.2 Objemové modely

Presnejšie výpočtové modely s použitím objemových prvkov boli vytvorené v prostredí softvéru ANSYS s využitím nadstavby Workbench. Pre ilustráciu je na obr. 2.3 opäť uvedená vizualizácia vzorky „C“. Pri vytváraní finitného modelu boli použité objemové prvky typu SOLID186 a SOLID187. Tieto 20- a 10-uzlové 3D konečné prvky podporujú plasticitu, ortotropné vlastnosti a teóriu veľkých deformácií. Pri modelovaní bola snaha vystihnúť čo najvierohodnejšie pôsobenie skrutkového prípoja, preto na všetkých kontaktných plochách boli použité taktiež kontaktné prvky CONTA174 v kombinácii s prvkami TARGE170. Pomocou kontaktných prvkov bolo možné priblížiť sa skutočnej deformácii svorníkov ako i uvažovať preklz na styku čelnej dosky za pomoci zadania šmykového napätia, pri prekročení ktorého dôjde k otváraní kontaktu. Drevo bolo modelované ako lineárny ortotropný materiál s deviatimi nezávislými konštantami, pričom vzhľadom na absenciu materiálových skúšok boli zadávané normové hodnoty materiálových vlastností. Oceľ bola modelovaná s uvažovaním plasticity pomocou bilinéarneho pracovného diagramu.

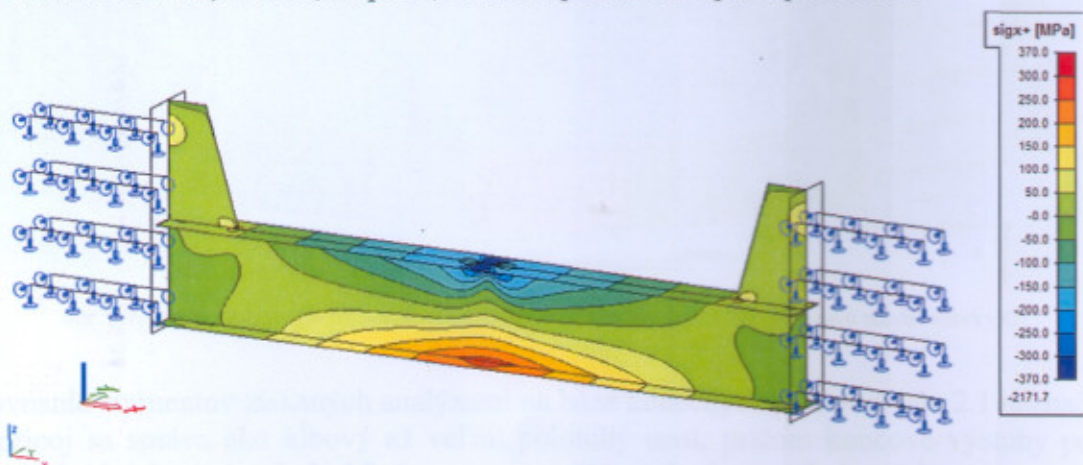




obr. 2.3: Predbežný finitný model konštrukcie vytvorenej v prostredí programového systému ANSYS s využitím 3D objemových prvkov

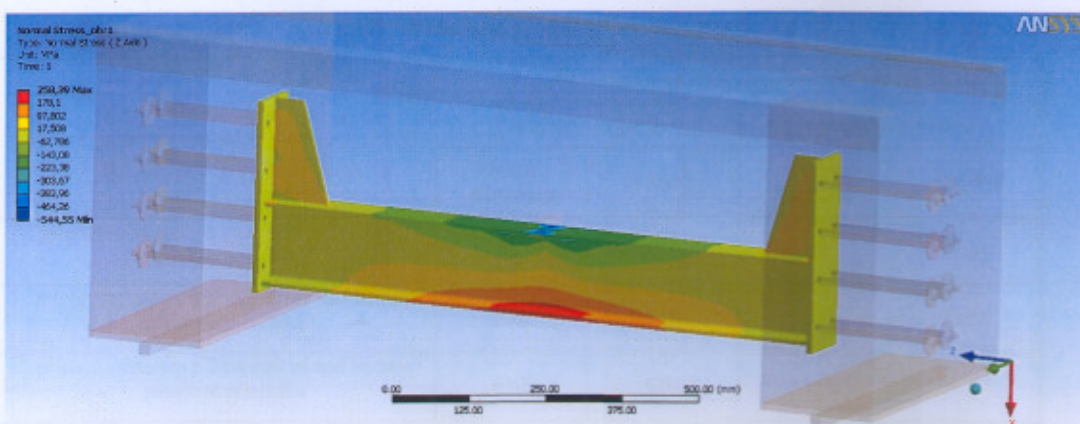
### 2.3.3 Porovnanie výsledkov predbežnej numerickej analýzy

Opísané výpočtové modely (škrupinové aj objemové) všetkých troch typov vzoriek A, B, C boli zaťažované uprostred rozpätia priečnika jednou zvislou silou. Napäťovo-deformačná odozva konštrukcie vzoriek na toto zaťaženie bola stanovená numericke pomocou metódy konečných prvkov, ktorú používajú oba spomenuté výpočtové programy. Sledované boli predovšetkým pozdĺžne normálové napätia na ocelovom priečniku ako aj zvislá deformácia priečnika. Ilustratívne grafické vykreslenie a porovnanie výsledkov z výpočtov na finitných výpočtových modeloch je možné vidieť na obr. 2.4 až obr. 2.7 vo forme normálových napätí a zvislých deformácií na priečniku vzorky „C“ od sily  $F = 100 \text{ kN}$ . Pre názornejšie porovnanie boli z vypočítaných normálových napätí vyčíslené ohybové momenty v mieste prípoja na drevený nosník a uprostred rozpätia priečnika. K porovnaniu je vhodné poznamenať, že v prípade uvažovania nominálneho klbového prípoja priečnika na drevený nosník by ohybový moment dosiahol hodnoty  $0 \text{ kN}\cdot\text{m}$  v mieste prípoja, resp.  $25,0 \text{ kN}\cdot\text{m}$  uprostred rozpätia priečnika. V prípade dokonalého votknutia by bol moment vo votknutí  $-12,5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , resp.  $12,5 \text{ kN}\cdot\text{m}$  uprostred rozpätia priečnika.

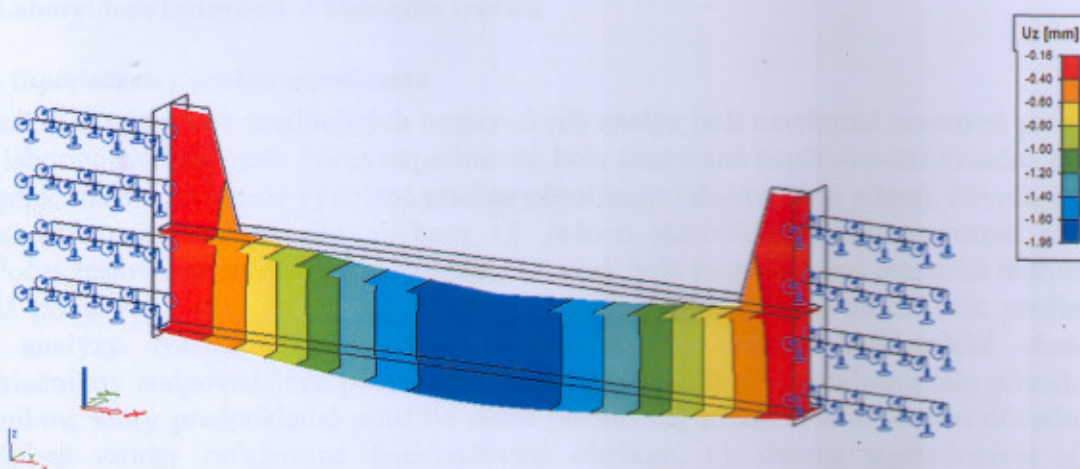


obr. 2.4: Normálové napätia na ocelovom priečniku od sily  $100 \text{ kN}$  – škrupinový model vzorky C

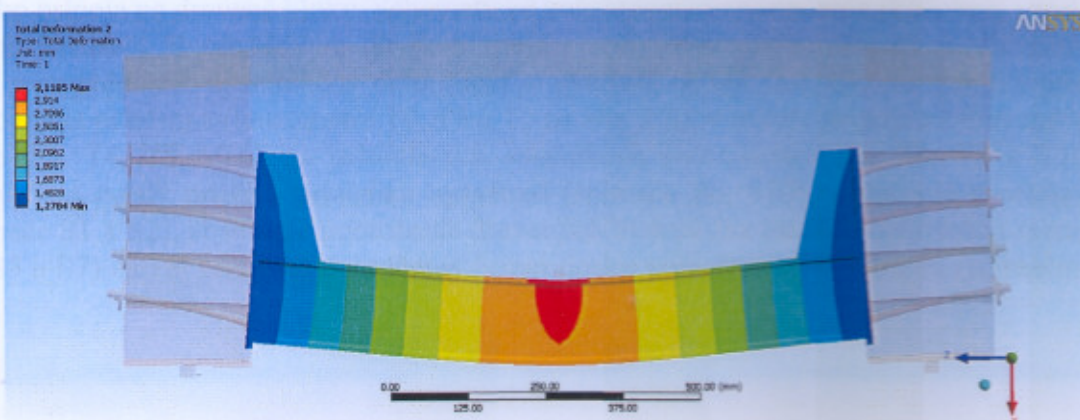




obr. 2.5: Normálové napätia na oceľovom priečniku od sily 100 kN – 3D objemový model vzorky C



obr. 2.6: Zvislé deformácie na oceľovom priečniku od sily 100 kN – škrupinový model vzorky C



obr. 2.7: Zvislé deformácie na oceľovom priečniku od sily 100 kN – 3D objemový model vzorky C

Porovnanie momentov získaných analýzami na báze konečných prvkov v tab. 2.1 naznačuje, že riešený prípoj sa správa ako kĺbový až veľmi polotuhý uzol, pričom koncové výstuhy podľa očakávania zvyšujú jeho tuhosť. Vzhľadom na vypočítané hodnoty ohybových momentov vo „votknutí“ do dreveného prvku je možné považovať modelovanie vyšetrovaného detailu prípoja oceľového priečnika na drevený nosník ako nominálne kĺbové za akceptovateľné predovšetkým v prípade konfigurácie prípoja zodpovedajúcej vzorke A, ale aj vzorky B. V prípade konfigurácie prípoja podľa vzorky C by už bolo vhodnejšie uvažovať pripojenie s čiastočnou ohybovou tuhosťou.



Tab. 2.1: Porovnanie vypočítaných ohybových momentov na priečniku od sily 100 kN uprostred

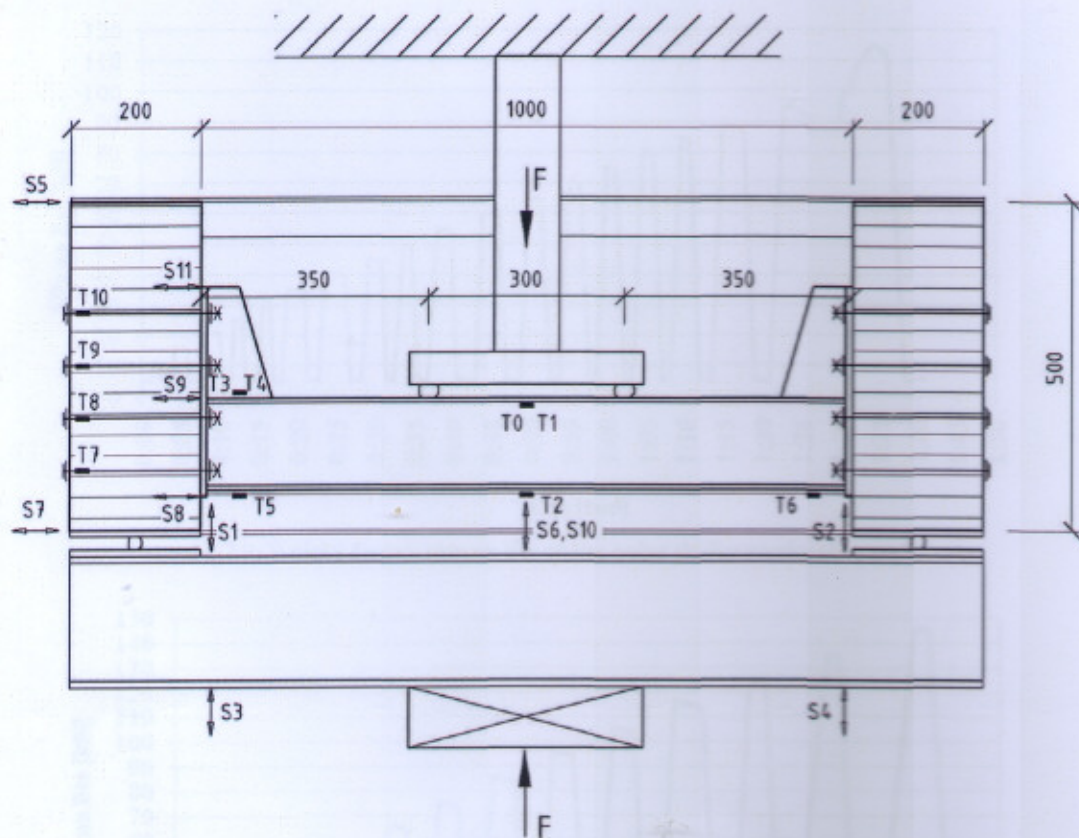
Typ vzorky / stručný popis		Momenty v oceľovom priečniku [kN·m]			
		v mieste prípoja		uprostred rozpätia	
		SCIA Engineer	ANSYS	SCIA Engineer	ANSYS
A	prípoj bez výstupy a svorníkov nad hornou pásnicou priečnika	0,13	0,39	24,87	24,61
B	prípoj s výstuhou a 1 svorníkom nad hornou pásnicou priečnika	2,82	1,50	22,18	23,50
C	prípoj s výstuhou a 2 svorníkmi nad hornou pásnicou priečnika	5,02	5,03	19,98	19,97

## 2.4 Laboratórne testovanie skúšobných vzoriek

### 2.4.1 Usporiadanie a priebeh experimentu

Na základe výsledkov predbežných numerických analýz boli navrhnuté pracovné programy samotných laboratórnych skúšok. Počas experimentu bola sledovaná napäťovo-deformačná odozva oceľového priečnika na zaťaženie vyvolané priečne pôsobiacimi diskretnými silami. Pôvodný návrh predpokladal zaťaženie trojbodovým ohybom, t.j. jednou sústredenou silou uprostred rozpätia priečnika. Počas testovania prvej vzorky zo série „A“ však bola zaznamenaná plastická deformácia priečnika už pri oveľa nižšej úrovni namáhania než bola predpokladaná na základe predbežnej numerickej analýzy. Následne boli nedeštruktívnou skúškou zistené mechanické vlastnosti materiálu priečnikov zodpovedajúce pevnostnej triede ocele S235, čo nezodpovedalo pôvodnému návrhu nosníkov, ktorý predpokladal použitie ocele pevnostnej triedy S 355. Z toho dôvodu boli ďalšie skúšobné vzorky zaťažované štvorbodovým ohybom, t.j. dvoma sústredenými silami, symetricky umiestnenými vo vzdialenosti 150 mm od stredu nosníka. Tým sme docielili zníženie hladiny namáhania priečnika uprostred jeho rozpätia pri nezmenenom priečnom namáhaní svorníkového prípoja na drevené bloky. Schematické znázornenie usporiadania skúšobnej vzorky zo série „C“ pri zaťažení štvorbodovým ohybom spolu s rozmiestnením tenzometrických snímačov pomerných pretvorení ako aj snímačov deformácií je uvedené na obr. 2.8. Okrem napätí v priereze uprostred rozpätia priečnika (tenzometre T0, T1 a T2 na obr. 2.8), v mieste prípoja na drevené bloky (tenzometre T3, T4, T5 a T6) a v jednotlivých svorníkoch (tenzometre T7, T8, T9 a T10) sa zaznamenávali aj zvislý prichyb priečnika uprostred (snímače S6, S10), zatlačenie svorníkov do dreva (snímače S1 a S2), absolútne pootočená drevených blokov (na základe deformácií meraných snímačmi S5 a S7) ako aj relatívne pootočená čelnej dosky voči dreveným blokom (snímačmi S8, S9 a S11).



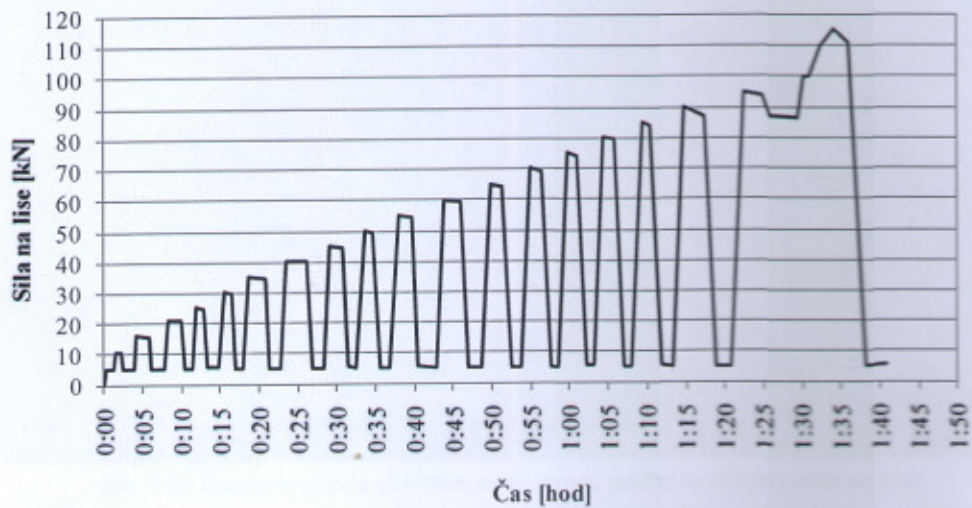


obr. 2.8: Geometrická schéma skúšky vzorky zo série „C“  
 T0 – T10 – umiestnenie tenzometrických snímačov pomerného pretvorenia  
 S1 – S11 – umiestnenie snímačov deformácií

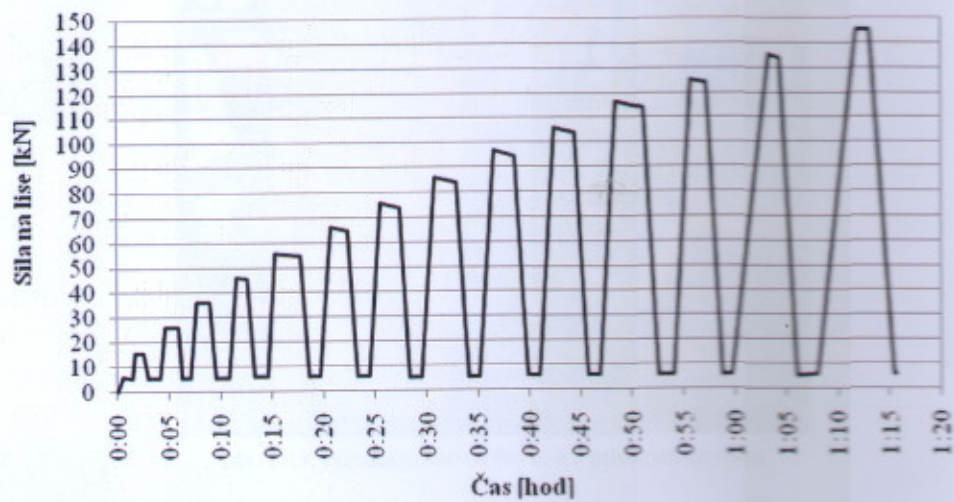
Rovnaké rozmiestnenie tenzometrov a snímačov bolo aplikované aj pri ostatných skúšobných vzorkách. V prípade vzoriek série „B“ nebol nainštalovaný tenzometer T10 (vzorky série „B“ mali len tri rady svorníkov) a snímač S11 bol umiestnený nad tretím radom svorníkov (na úrovni horného okraja čelnej dosky). V prípade vzoriek série „A“ (bez rohových výstuh) neboli nainštalované tenzometre T9, T10 a snímač S11.

Počas samotnej skúšky boli jednotlivé vzorky najskôr zaťažené silou na lise 5 kN, resp. pri použití roznášača zaťaženia dvoma silami 2,5 kN, čo predstavovalo základnú úroveň namáhania vzoriek. Následne boli vzorky zaťažované postupne narastajúcou silou s krokom 5 kN v prípade vzoriek série „A“, resp. 10 kN pri vzorkách série „B“ a „C“. Po každom zaťažovacom kroku boli jednotlivé vzorky po ustálení napätovo-deformačnej odozvy vždy odľahčované na základnú úroveň namáhania 5 kN (sila na lise). Typický časový záznam sily na lise počas skúšky vzorky série „A“ je uvedený na obr. 2.9, priebeh skúšok na vzorkách série „B“ a „C“ je zrejmý z obr. 2.10. Ilustračné fotografie z priebehu laboratórnych skúšok sú uvedené na obr. 2.11 až obr. 2.13. Vzorky boli zaťažované až do porušenia, ktoré nastalo buď otláčením stien otvorov pre svorníky v drevených blokoch (obr. 2.12), alebo pretrhnutím vlákien dreva v smere kolmo na vlákna v dôsledku priečného ohybu drevených blokov (obr. 2.13).

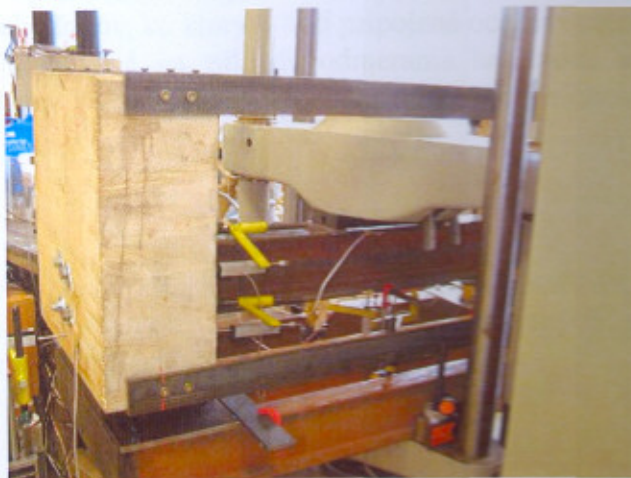




obr. 2.9: Typický časový záznam sily na lise počas skúšky vzorky série „A“



obr. 2.10: Typický časový záznam sily na lise počas skúšok vzoriek série „B“ a „C“



obr. 2.11: Pohľad na vzorku A3 počas skúšky





obr. 2.12: Porušenie prípoja otláčením steny otvoru, pohľad na deformované svorníky



obr. 2.13: Porušenie dreveného bloku priečnym ohybom

#### 2.4.2 Určenie fyzikálno-mechanických vlastností materiálu drevených blokov

Pre potreby ďalšej teoretickej analýzy bolo potrebné stanoviť fyzikálno-mechanické vlastnosti materiálu drevených blokov, ku ktorým boli pripojené oceľové priečniky.

Hustota dreva bola stanovená na základe odmerania hmotnosti a objemu jednotlivých vzoriek drevených blokov. Hustota dreva zodpovedajúca referenčnej vlhkosti 12% bola stanovená pomocou vzťahu:

$$\rho_{w12} = \rho_w + 0,005 \cdot \rho_w \cdot (12 - w)$$

kde  $\rho_w$  je hustota dreva zodpovedajúca skutočnej vlhkosti dreva „w“, ktorá bola určená ako priemerná hodnota zo súboru štyroch hodnôt vlhkosti nameraných pomocou odporového vlhkomera. Spracovanie nameraných hodnôt je uvedené v tab. 2.2.



Tab. 2.2: Určenie hustoty materiálu drevených blokov

Vzorka	Hmotnosť m	Objem V	Hustota $\rho_w$	Vlhkosť w	Hustota $\rho_{w12}$
	kg	m <sup>3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	%	kg·m <sup>-3</sup>
A1-L	19,53	0,0450	434,0	9,38	439,7
A1-P	19,76	0,0450	439,1	9,75	444,1
A2-L	19,66	0,0453	434,3	9,98	438,7
A2-P	18,84	0,0450	418,7	9,05	424,8
A3-L	18,64	0,0447	417,1	8,78	423,9
A3-P	19,64	0,0448	438,6	9,55	444,0
B1-L	19,60	0,0450	435,6	9,78	440,4
B1-P	18,92	0,0450	420,4	9,15	426,4
B2-L	19,74	0,0450	438,7	9,18	444,9
B2-P	19,18	0,0450	426,2	8,83	433,0
B3-L	19,92	0,0450	443,1	9,03	449,7
B3-P	19,48	0,0450	432,9	8,45	440,6
C1-L	18,70	0,0451	414,3	9,50	419,5
C1-P	18,70	0,0450	415,6	8,60	422,6
C2-L	18,24	0,0446	409,0	7,55	418,1
C2-P	19,30	0,0449	430,2	7,83	439,2
C3-L	18,96	0,0450	421,3	7,88	430,0
C3-P	18,50	0,0450	411,1	9,40	416,5

Štatistickým spracovaním 18 hodnôt hustoty je možné získať nasledovné základné štatistické parametre:

- Stredná hodnota hustoty:  $\rho_{\text{mean}} = 433,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Smerodajná odchýlka:  $s = 10,51 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Koeficient variácie:  $\text{COV} = 0,024$

Charakteristickú hodnotu hustoty určíme za predpokladu normálneho rozdelenia pravdepodobnosti pomocou strednej hodnoty a známeho koeficientu variácie zo vzťahu:

$$\rho_k = \rho_{\text{mean}} \cdot (1 - 1,69 \cdot \text{COV}) = 433,1 \cdot (1 - 1,69 \cdot 0,024) = 416,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Vzhľadom na to, že rozmery blokov z lepeného lamelového dreva neumožnili vytvorenie bezchybných vzoriek dreva na vykonanie potrebných materiálových skúšok dreva, pre určenie ďalších mechanických vlastností dreva, predovšetkým modulov pružnosti v ťahu, tlaku a v šmyku sme použili postup podľa [3] spolu s postupom podľa STN EN 384.

Hodnotu 5%-ného kvantilu modulu pružnosti v ťahu a tlaku v smere rovnobežnom s vláknami je možné podľa [3] stanoviť z rovnice:

$$E_{0,05} = -14\,441,49 + 55,7834 \cdot \rho_{w12} E_{0,05} = -14\,441,49 + 55,7834 \cdot 416,0 = 8764,4 \text{ MPa.}$$

Strednú hodnotu modulu pružnosti v ťahu a tlaku v smere rovnobežnom s vláknami určíme podľa [3] z rovnice:

$$E_{0,\text{mean}} = E_{0,05} / 0,67 = 8764,4 / 0,67 = 13\,081,2 \text{ Mpa}$$

Strednú hodnotu modulu pružnosti v ťahu a tlaku v smere kolmom na vlákna vypočítame podľa [3] zo vzťahu:

$$E_{90,\text{mean}} = E_{0,\text{mean}} / 30 = 13\,081,2 / 30 = 436 \text{ MPa.}$$



Strednú hodnotu modulu pružnosti v šmyku je možné podľa [3] určiť z rovnice:

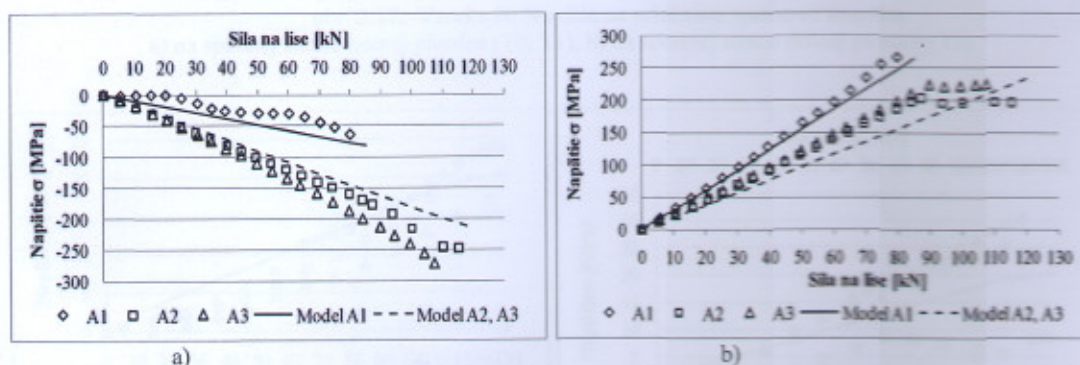
$$G_{\text{mean}} = E_{0,\text{mean}} / 16 = 13\,081,2 / 16 = 817,6 \text{ MPa.}$$

#### 2.4.3 Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov laboratórnych skúšok

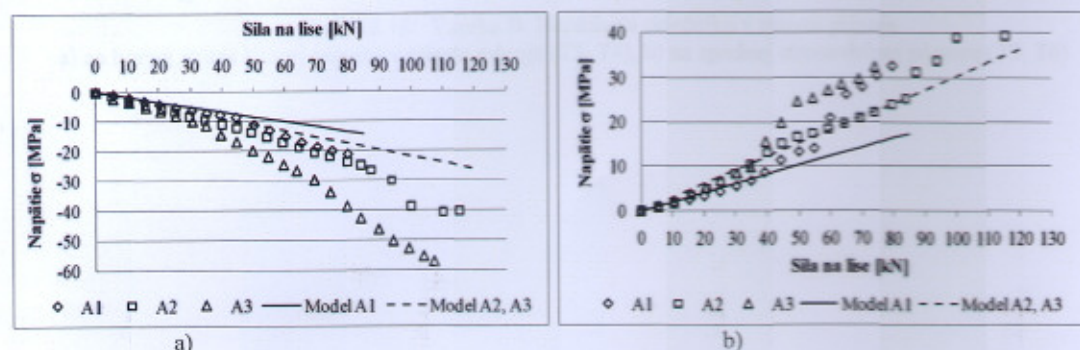
Výsledkom laboratórnych skúšok sú priebehy napäťovo-deformačnej odozvy skúšobných vzoriek v sledovaných miestach oceľových priechnikov v závislosti od pôsobiaceho zaťaženia. Výsledky boli graficky spracované v tabuľkovom editore Microsoft Excel. Pre lepšiu názornosť výsledkov sú experimentálne závislosti súčasne konfrontované s teoretickými hodnotami, ktoré boli získané pomocou upravených numerických výpočtových modelov vytvorených v programe SCIA Engineer 2010. Tieto modely boli spresnené použitím vyššie uvedených fyzikálno-mechanických vlastností materiálu drevených blokov.

Niektoré reprezentatívne výsledky laboratórnych skúšok vzoriek série „A“ sú uvedené na obr. 2.14 až obr. 2.16, výsledky testov vzoriek série „B“ sú dokumentované na obr. 2.17 až obr. 2.19 a obr. 2.20 až obr. 2.22 prezentujú namerané a vypočítané hodnoty napäťovo-deformačnej odozvy skúšobných vzoriek série „C“.

V prípade skúšobných vzoriek série „A“ sú v grafoch uvádzané vždy dve teoretické krivky, ktoré zodpovedajú dvom rôznym statickým schémam počas experimentu, keď vzorka A1 bola podrobená skúške trojbodovým ohybom, zatiaľ čo vzorky A2 a A3 boli testované pri štvorbodovom ohybe. V prípade sérií „B“ a „C“ boli všetky vzorky počas testovania vystavené namáhaniu štvorbodovým ohybom, takže tu je uvádzaná vždy len jedna teoretická závislosť. Pre jednoduchosť ako aj lepšiu názornosť sú všetky experimentálne aj teoretické hodnoty napäťovo-deformačnej odozvy uvádzané v závislosti od celkovej sily vyvodenej skúšobným hydraulickým zariadením.

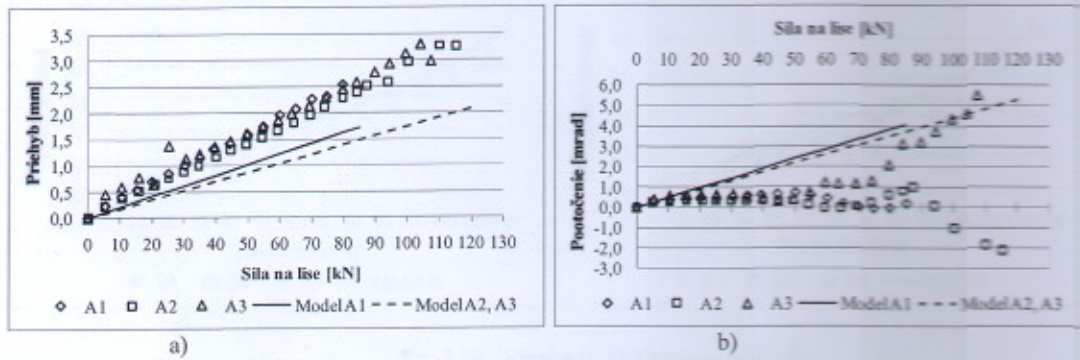


obr. 2.14: Vzorka A: Napätia na priechniku uprostred rozpätia  
a) na spodnej strane hornej pásnice (T0, T1), b) na spodnej strane dolnej pásnice (T2)

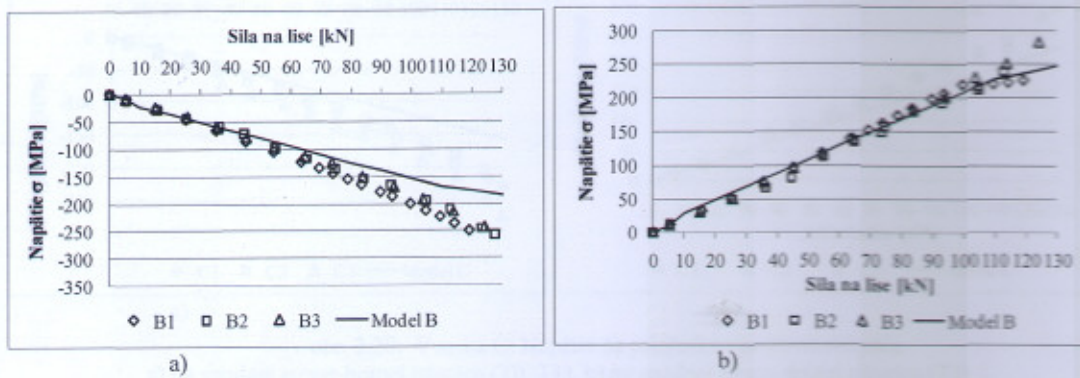


obr. 2.15: Vzorka A: Napätia na priechniku v mieste prípoja  
a) na hornej strane hornej pásnice v mieste prípoja (T3), b) na spodnej strane dolnej pásnice (T5, T6)

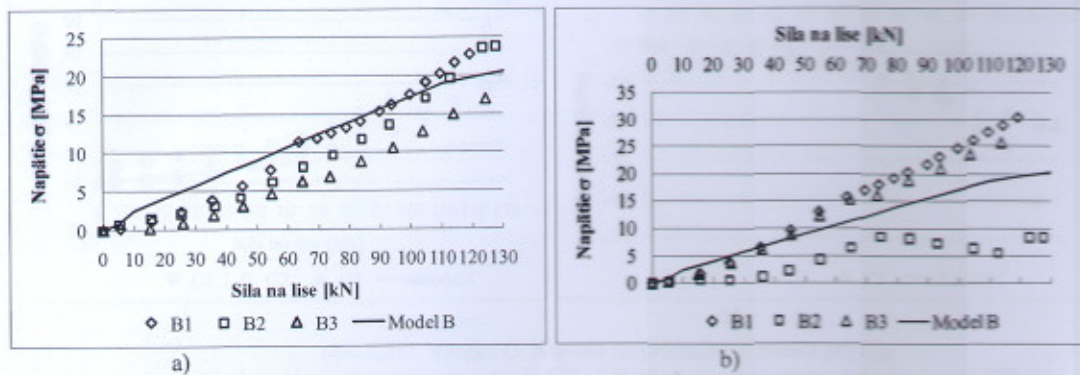




obr. 2.16: Vzorka A: Deformácie priečnika  
 a) prichyb uprostred rozpätia (S6, S10) očistený o zatlačenie svorníkov (S1, S2),  
 b) pootočenie čelnej dosky voči drevenému bloku

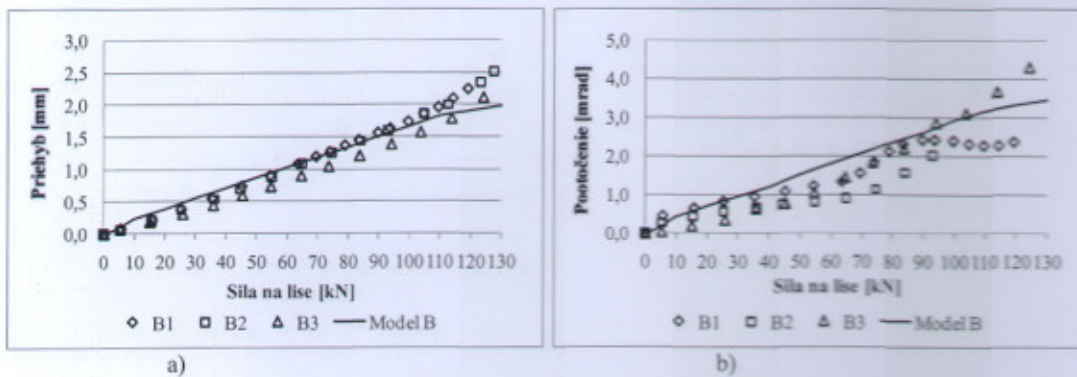


obr. 2.17: Vzorka B: Napätia na priečniku uprostred rozpätia  
 a) na spodnej strane hornej pásnice (T0, T1), b) na spodnej strane dolnej pásnice (T2)

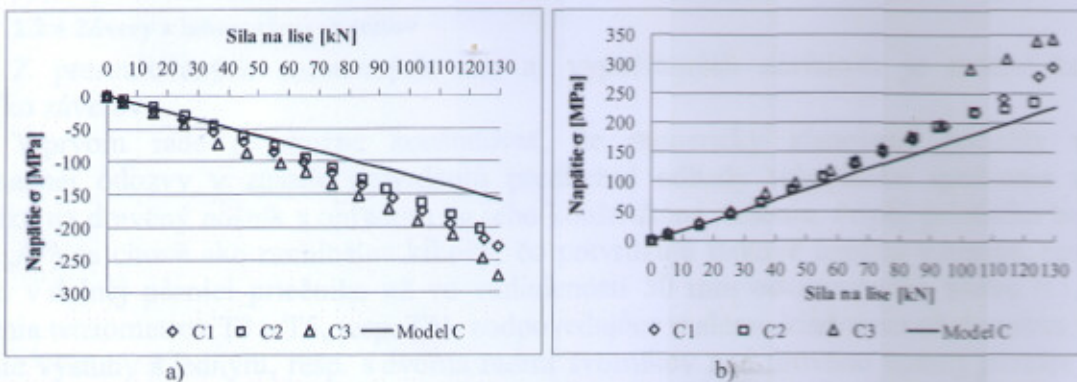


obr. 2.18: Vzorka B: Napätia na priečniku v mieste prípoja  
 a) na hornej strane hornej pásnice v mieste prípoja (T3, T4), b) na spodnej strane dolnej pásnice (T5, T6)

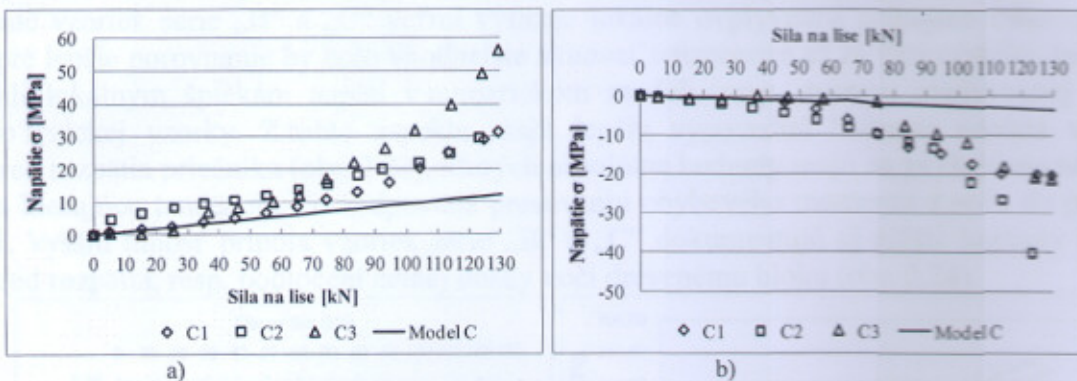




obr. 2.19: Vzorka B: Deformácia priečnika  
 a) priehyb uprostred rozpätia (S6, S10) očistený o ztláčenie svorníkov (S1, S2),  
 b) pootočenie čelnej dosky voči drevenému bloku

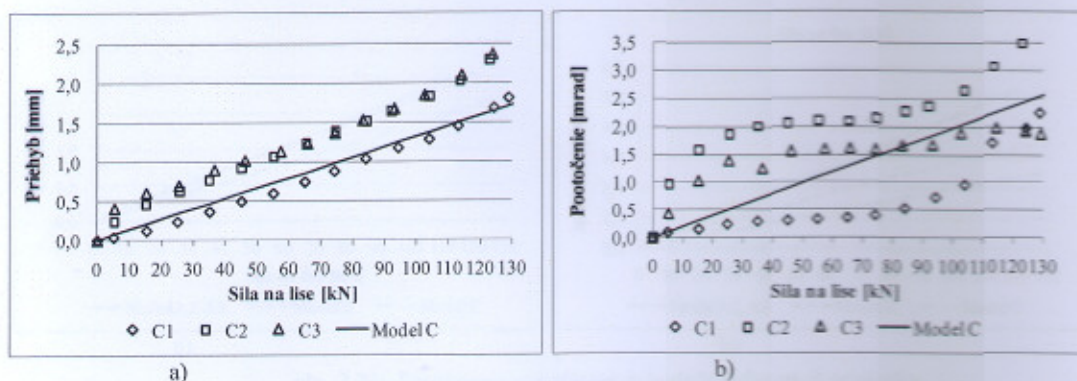


obr. 2.20: Vzorka C: Napätia na priečniku uprostred rozpätia  
 a) na spodnej strane hornej pásnice (T0, T1), b) na spodnej strane dolnej pásnice (T2)



obr. 2.21: Vzorka C: Napätia na priečniku v mieste prípoja  
 a) na hornej strane hornej pásnice v mieste prípoja (T3, T4), b) na spodnej strane dolnej pásnice (T5, T6)



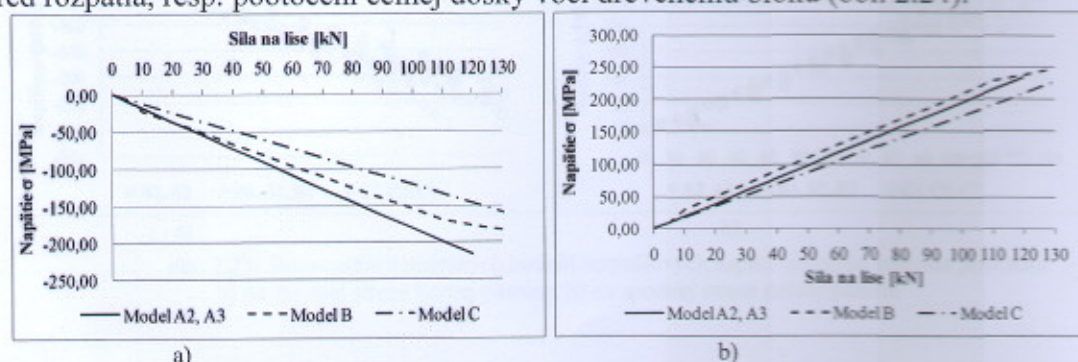


obr. 2.22: Vzorka C: Deformácia priečnika  
 a) prihyb uprostred rozpätia (S6, S10) očistený o zatlačenie svorníkov (S1, S2),  
 b) pootočenie čelnej dosky voči drevenému bloku

### 2.2.4 Závěry z laboratorných testov

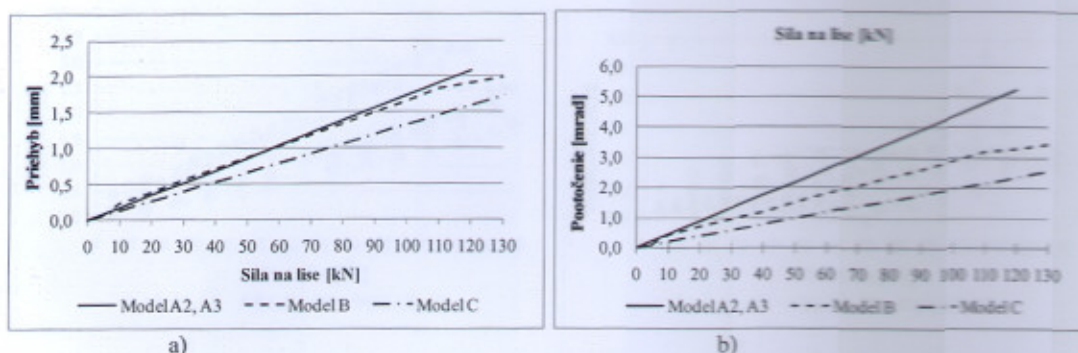
Z prezentovaných nameraných ako aj vypočítaných závislostí je možné konštatovať niekoľko záverov.

V prvom rade je možné konštatovať, že numericky stanovené hodnoty napätovo-deformačnej odozvy v zásade potvrdzujú predbežné odhady tuhostného správania sa prípoja priečnika na drevený nosník s ohľadom na jeho konštrukčné riešenie. Prípoj priečnika bez výstuhu (séria „A“) sa chová ako nominálne kĺbový, čo potvrdzujú tlakové napätia v hornej, resp. ťahové napätia v dolnej pásnici priečnika už vo vzdialenosti 50 mm od dreveného bloku (t.j. v mieste nalepenia tenzometrov T3 a T5, resp. T6), zodpovedajúce malému kladnému ohybovému momentu. Pridanie výstuhu s jedným, resp. s dvoma radmi svorníkov nad úrovňou hornej pásnice priečnika má za následok zvýšenie tuhosti prípoja, čoho dôkazom sú ťahové normálové napätia na povrchu hornej pásnice priečnika v mieste uloženia, zodpovedajúce zápornému ohybovému momentu. Tu treba podotknúť, že napätová odozva v mieste „votknutia“ priečnika do dreveného bloku je v prípade vzoriek série „B“ a „C“ veľmi výrazne lokálne ovplyvnená prípojom rohovej výstuhu, takže pre lepšie porovnanie by bolo vhodnejšie situovať tenzometre až za túto výstuhu, tak aby sme sa vyhli lokálnym špičkám napätí v numerickom modeli, resp. zvarom ovplyvnenej oblasti v prípade fyzickej vzorky. Z tohto aspektu majú lepšiu výpovednú hodnotu napätia vypočítané uprostred rozpätia priečnika (obr. 2.23), ktorých absolútne hodnoty majú so zvyšujúcou sa tuhosťou prípoja klesajúcu tendenciu, čo zodpovedá presúvaniu ohybového momentu z poľa do podperovej oblasti. Vyššiu tuhosť prípoja vzoriek série „B“ a „C“ dokumentujú aj nižšie hodnoty prihybov uprostred rozpätia, resp. pootočení čelnej dosky voči drevenému bloku (obr. 2.24).



obr. 2.23: Porovnanie vypočítaných hodnôt normálových napätí uprostred rozpätia  
 a) na spodnej strane hornej pásnice, b) na spodnej strane dolnej pásnice

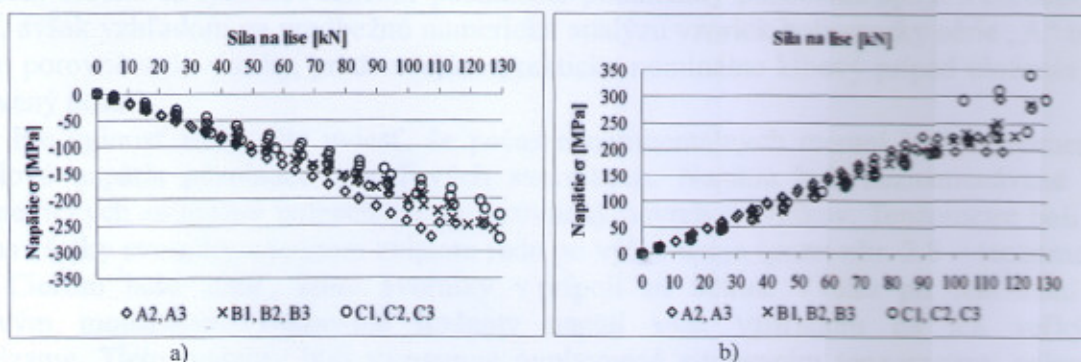




obr. 2.24: Porovnanie vypočítaných hodnôt deformácií priečnika  
a) prichyb uprostred rozpätia, b) pootočenie čelnej dosky voči drevenému bloku

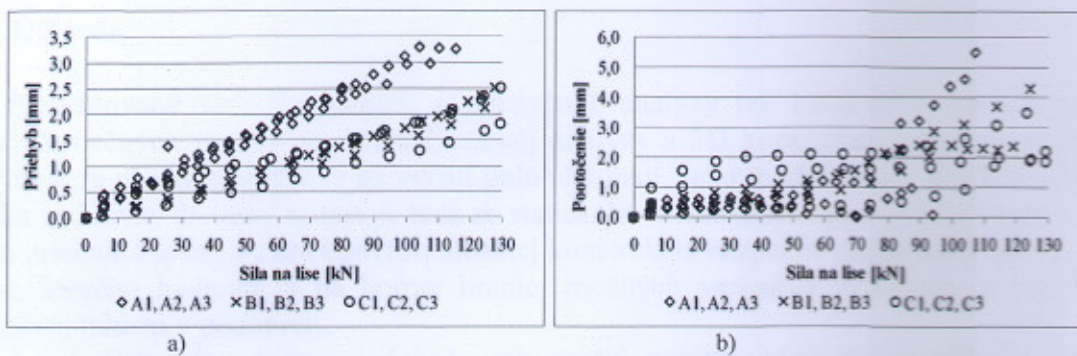
Podobné závery je možné v zásade vysloviť aj na základe rozboru experimentálne získaných údajov (obr. 2.25 až obr. 2.26), aj keď takto získané hodnoty vykazujú prirodzene pomere značný rozptyl, ktorý súvisí s veľkým rozptylom fyzikálno-mechanických vlastností dreva. Klesajúcu tendenciu absolútnych hodnôt normálových napätí so zvyšujúcou sa tuhosťou prípoja je možné pozorovať predovšetkým na hornej pásnici priečnika v strede rozpätia (obr. 2.25a). Rovnako aj znižujúce sa hodnoty prichybov uprostred rozpätia potvrdzujú vyššiu tuhosť prípoja vzoriek série „B“ a „C“ (obr. 2.24a).

Naproti tomu pootočenia čelnej dosky určené z nameraných horizontálnych deformácií vykazujú veľmi veľký rozptyl, pričom len pri vyšších hladinách namáhania je možné pozorovať priaznivý vplyv vystuženia prípoja rohovou výstuhou na zmenšenie pootočenia koncového prierezu priečnika. Tento jav je možné vysvetliť veľkou citlivosťou stanovenia hodnoty pootočenia čelnej dosky na presnosti merania horizontálnych posunov čelnej dosky voči drevenému bloku. Napr. pri výške čelnej dosky 160 mm predstavuje rozdiel v horizontálnom posunutí jej horného a dolného okraja o 0,1mm pootočenie čelnej dosky o 0,63 mrad. Navyše, pôsobením narastajúcej šmykovej sily v prípoji dochádzalo v dôsledku zatlačania svorníkov do materiálu dreva ku vertikálnym posunom priečnika s čelnou doskou (a teda aj so snímačom deformácií) rádovo o niekoľko milimetrov, čo negatívne ovplyvnilo presnosť merania. V jednom prípade vzorky série „A“ dokonca došlo aj k posunu jedného snímačieho zariadenia.



obr. 2.25: Porovnanie nameraných hodnôt normálových napätí uprostred rozpätia priečnika  
a) na spodnej strane hornej pásnice, b) na spodnej strane dolnej pásnice





obr. 2.26: Porovnanie experimentálne stanovených hodnôt deformácií priečnika  
a) priehyb uprostred rozpätia, b) pootočenie čelnej dosky voči drevenému bloku

Ďalším, veľmi významným faktorom ovplyvňujúcim správanie sa prípoja je spôsob jeho zostavenia, konkrétne použitá miera predopnutia svorníkov v prípoji. Predpínacia sila vo svorníkoch zvyšuje trenie na kontakte medzi oceľovou čelnou doskou a dreveným nosníkom, čím zvyšuje šmykovú odolnosť prípoja, ale predovšetkým zvyšuje počiatočnú rotačnú tuhosť prípoja, resp. znižuje pootočenie koncového prierezu.

V prípade vzoriek série „A“, ktoré boli testované ako prvé, bola zvolená hodnota predpínacej sily na úrovni 20% ťahovej odolnosti oslabeného prierezu svorníkov. Následne pri zostavovaní vzoriek však dochádzalo v niektorých prípadoch k značnému zatlačaniu podložiek pod maticami do materiálu drevených blokov. Toto bolo spôsobené nerovnomerným rozdelením hustoty materiálu po objeme drevených blokov. V miestach, kde bola hustota dreva dostatočná, mohli byť svorníky predopnuté na zvolenú hodnotu predpínacej sily bez toho, že by došlo k zatlačeniu podložiek do dreva. Naopak v miestach s menšou hustotou dochádzalo k značnému zatlačaniu podložiek do dreva, v dôsledku čoho vznikali straty predopnutia. Následne bolo preto potrebné svorníky opätovne dopínať, v dôsledku čoho dochádzalo k ďalšiemu zatlačovaniu podložiek do dreva a celý proces bolo potrebné niekedy aj viackrát opakovať.

V snahe vyhnúť sa otláčaniu dreva pod podložkami svorníkov ako aj prípadnému poškodeniu závitov svorníkov pri vynútenom opätovnom doťahovaní sme preto pri vzorkách série „B“ a „C“ zvolili hladinu predopnutia svorníkov polovičnou hodnotou, t.j. 10% ich ťahovej odolnosti. Trochu sa tým síce zmenili počiatočné podmienky pôsobenia spoja s ohľadom na jeho tuhosť, avšak vzhľadom na predbežnú numerickú analýzu vzoriek boli vzorky série „A“ uvažované len ako porovnávací vzorky, predstavujúce prakticky nominálne kĺbový prípad uloženia priečnika na drevený nosník.

Pre úplnosť treba ešte uviesť, že počas experimentálnych meraní boli zaznamenávané aj normálové napätia pôsobiace v oceľových svorníkoch. Napätia boli zaznamenávané pomocou tenzometrických snímačov nalepených na zarovnaný povrch svorníkov. Tenzometre boli nalepené vždy na všetky svorníky v jednom zvislom rade po výške spoja (pozri obr. 2.8 – tenzometre T7 až T10). Cieľom bolo zistiť, ktoré svorníky v prípoji sú účinné v ťahu pri namáhaní kolmým ohybovým momentom. Namerané hodnoty napätí však vzhľadom na ich veľký rozptyl neuvádzame. Tieto hodnoty boli významne ovplyvnené situovaním tenzometrov nalepených na svorníkoch dovnútra dreveného bloku. Takto umiestnené tenzometre mohli byť totiž už pri montáži vzoriek alebo neskôr počas samotného experimentu poškodené v dôsledku trenia povrchu svorníkov o steny otvorov. Navyše, tenzometre nalepené len z jednej strany prierezu svorníka neposkytujú úplný obraz o napätostnom stave svorníkov, pretože z nameraných hodnôt napätí nie je možné odseparovať prípadný vplyv lokálneho ohybu svorníkov.



### 3. Závěr

Prezentované výsledky meraní a počítačové analýzy tak lineárneho modelu s použitím plošných konečných prvkov ako aj nelineárnej analýzy s 3D konečnými prvkami naznačujú, že riešený uzol sa chová ako kĺbový až veľmi polotuhý uzol. Jeho modelovanie ako kĺbového prípoja priečnika na hlavný drevený nosník je teda zo statického hľadiska akceptovateľné. Prierez uprostred rozpätia priečnika je tak v rámci návrhu mostnej konštrukcie bezpečne nadimenzovaný na ohybový moment, ktorého hodnota je na hornej hranici možných variantov plynúcich z možnej vyššej momentovej tuhosti v podopretí.

Avšak čisto kĺbový spoj nedokáže zabezpečiť stabilitu hlavného nosníka v klopení. Pri menších rozpätiach hlavných nosníkov je možné docieľiť potrebnú stabilitu konštrukcie návrhom masívnejšieho prierezu hlavného nosníka. S narastajúcim teoretickým rozpätím hlavnej nosnej konštrukcie sa však prierez hlavného nosníka vyznačuje čoraz väčšou štíhlosťou, vyplývajúcou zo snahy o hospodárny návrh prierezu. Hospodárnosť návrhu obdĺžnikového prierezu z lepeného lamelového dreva je navyše podmienená nielen samotnou spotrebou materiálu, ale aj možnosťami výrobného procesu, ktorý si pri väčších šírkach prierezu (viac ako 240 – 280 mm) vyžaduje šírkové nastavovanie lamiel, z ktorých je tvorený prierez nosníka. Z tohto hľadiska je preto výhodnejšie navrhovať prierezy nosníkov tak, aby jednotlivé lamely boli po šírke z jedného kusu reziva. To má následne negatívny dopad na horizontálnu ohybovú a torznú tuhosť prierezu, ktoré majú podstatný vplyv na odolnosť hlavného nosníka proti klopeniu.

Napriek tejto skutočnosti realizované konštrukcie naznačujú, že hlavné nosníky nevykazujú významné problémy so stratou stability v klopení. Dominantným faktorom je určite excentrické pripojenie dolných stužidiel voči osiam priečnikov, kedy je vytvorená dvojica protismerne namáhaných rovín prútov. Čiastočne však k stabilizácii nosníka prispieva aj reálna tuhosť a samotná konštrukčná výška prípoja priečnika na trám. Najmä v prípadoch vyšších rohových výstuh a použitia svorníkov aj nad prierezom priečnika je tento prípoj schopný pôsobiť ako pružná podpera pre klopenie nosníka. Pre bežné prútové modely mostovky je preto potrebné navrhnuť spôsob modelovania prípoja, ktorý je použiteľný pre prax. Jedným z takýchto spôsobov je možnosť modelovania tzv. pružného votknutia. Takýto uzol je už dnes možné modelovať bežnými výpočtovými programami zadaním momentovej pružinovej konštanty priamo do uzla. Prípadne sa uzol aproximuje krátkym prútom so zmenšenou tuhosťou v ohybe oproti zvyšnej časti priečnika.

### 4. Použité zdroje:

- [1] STN 73 6203: Zat'azenie mostov. SÚTN Bratislava, 1993.
- [2] STN 73 6209: Zat'azovacie skúšky mostov. SÚTN Bratislava, 1993.
- [3] KUKLÍK, P., KUKLÍKOVÁ, A., Metody pro stanovení vlastností konstrukčního dřeva, Sborník přednášek Dřevostavby 2008, str. 145-154, ISBN 978-80-86837-18-5.