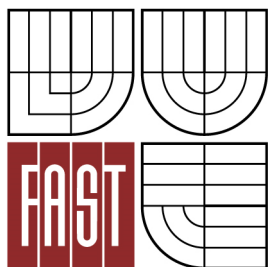




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

HODNOCENÍ NAPJATOSTNÍHO CHOVÁNÍ LEPENÉHO KONSTRUKČNÍHO DŠ EVA POMOCÍ DIC ANALÝZY.

EVALUATION OF LOAD-DEFORMATION CHARACTERISTICS OF GLUED TIMBER USING DIC
ANALYSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAL ČOT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavební materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Michal Čot
Název	Hodnocení napjatostního chování lepeného konstrukčního dřeva pomocí DIC analýzy.
Vedoucí diplomové práce	Ing. Jan Vaněk, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Handbook of Adhesion (2nd Edition), Ed. Packham, D. E., 2005, John Wiley & Sons
Pizzi A. Bioadhesives for Wood and Fibres, Reviews of Adhesion and Adhesives, Publisher Scrivener Publishing, 2168-0973 (Online), Vol. 1 (1), 2013
Sven Thelandersson, Hans J. Larsen, Timber Engineering. Wiley:2003, ISBN: 978-0-470-84469-4, 456 pages
Ian Smith, Eric Landis, Meng Gong, Fracture and Fatigue in Wood, Wiley: 2003, ISBN: 978-0-471-48708-1, 242 pages

Zásady pro vypracování

Cílem práce bude identifikace materiálových vlastností dřeva za použití techniky DIC /digital image correlation, Digital 3D Image Correlation System Q-400 Dantec/, která umožní vizuální snímání deformací i prodloužení na povrchu dřevných prvků v různých zatíhacích stavech. DIC se používá pro určení trojrozměrných materiálových vlastností v tahu, ohybu i v kombinovaných zatíhacích stavech. Zjištěné deformace lze využít při hodnocení únavových zkoušek i při posuzování lomové mechaniky materiálu.

Experimentální část diplomové práce se bude týkat zkoušení lepených lamelových prvků (GLT) a křížem vrstveného dřeva (CLT), u kterých budou zjišťovány jejich napjatostnědeformační charakteristiky. Pro tyto účely budou vyrobeny zkušební tělesa (GLT prvky ze 2-4 lamel, CLT prvky), které budou namáhány dvěma zatíhacími stavy. Bude se jednat o 4-bodový ohyb a o smykové namáhání.

U všech zatíhacích stavů budou pomocí DIC analýzy zjišťovány vlivy makroskopické úrovně dřeva (trhliny, suky, odklon vláken, šířka letokruhů) na distribuci namáhání v zatíhovaném prvku. Povrchové deformace budou pomocí DIC metody monitorovány za použití 4 kamer každá snímající každou zkušební plochu prvku. V průběhu zatíhování budou zjišťovány nejenom deformační procesy zkoušeného vzorku, ale rovněž případná propagace kohezivního poškození lepené spáry.

Použití DIC technik se jeví jako metoda působící mnohem detailnějším popis plošných deformačních procesů zkoušených prvků, které umožní při hlubší analýze získat lepší přehled o distribuci namáhání v kritických detailech dřevných spojů.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....

Ing. Jan Vaněk, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou hodnocení smykových vlastností dřevěných konstrukčních materiálů, především CLT prvků.

V rámci práce byla provedena rozsáhlá rešerše dosud prezentovaných vědeckých prací zabývajících se charakteristikou smykových vlastností dřeva.

V praktické části byl proveden experiment zabývající způsobem porušení příčných lamel CLT prvků při působení smykové napětí. Byly sledovány jednotlivé vlivy, které tuto materiálovou vlastnost mohou ovlivnit. V první části experimentu byly provedeny výpočetní modely pomocí FEM. V druhé části byla zkušební tělesa zkoušena v tříbodovém ohybu. Zde byl sledován vliv makroskopických vlastností dřeva na distribuci namáhání, trhlin a smykovou pevnost, příslušné zkoušky byly zaznamenány DIC systémem.

Klíčová slova

Smyková pevnost, šířka letokruhů, orientace letokruhů, CLT, DIC, FEM, tříbodový ohyb, makroskopie dřeva.

Abstract

The work deals with issues of evaluation of the shear properties of timber structural materials, particularly CLT elements.

The work contains an overview of extensive research so far presented scientific studies dealing with the characteristic shear properties of wood.

In the practical part was carried out the experiment dealing with the failure mode of transverse lamellae of CLT elements that were exposed to shear stress. There were observed individual effects that this may affect the material properties. In the first part of the experiment were performed numerical models using FEM. In the second part, the test specimens were tested in three point bending. Here, attention was paid to the influence of macroscopic properties of wood on the distribution of stress cracks and shear strength, the tests were recorded using DIC system.

Keywords

Shear strength, growth ring width, growth ring orientation, CLT, DIC, FEM, three point bending test, macroscopy of wood.

Bibliografická citace VČKP

Bc. Michal Čot *Hodnocení napjatostního chování lepeného konstrukčního dřeva pomocí DIC analýzy*. Brno, 2015. XX s., YY s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jan Vaněk, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2015

ě ě

podpis autora
Bc. Michal Čot

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové Ing. Janu Vaněrkovi, PhD., za odborné vedení, přístup, rady, trpělivost a diskuze při zpracování mé diplomové práce.

Zároveň bych chtěl velmi poděkovat kolegům z Technické University ve Vídni, kde jsem vytvořil převážnou část této diplomové práce, za jejich ochotu a vstřícnost při konzultacích. Jmenovitě to byli Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Bader a Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Hochreiner.

Obsah

1. Úvod	10
2. Konstrukční dřevo pro stavebnictví.....	10
2.1. Smykové pevnosti rostlého dřeva	10
2.2. Smykové pevnosti konstrukční dřeva.....	12
2.3. Smykové pevnosti lamelového dřeva.....	14
3. Faktory ovlivňující smykové chování dřeva	17
3.1. Materiálová charakteristika dřeva	18
3.2. Anizotropie dřeva	18
3.2.1. Makrostruktura dřeva	19
3.2.2. Mikrostruktura dřeva.....	20
3.2.3. Submikrostruktura dřeva	21
3.3. Zkušební podmínky	21
4. Režim zkušebních metod určující parametry smykové pevnosti.....	22
4.1. Rostlé dřevo	22
4.1.1. Zkouška smyku na bloku dřeva se zářezem	22
4.1.2. Single cube apparatus (zkoušení dřevěné kostky)	23
4.1.3. Iosipescu zkušební zařízení	23
4.1.4. Modifikované Iosipescu zkušební zařízení.....	26
4.1.5. Off axis test (mimo-osový test).....	28
4.1.6. Arcan test	28
4.1.7. Picture-frame test	30
4.2. Konstrukční dřevo, CLT a GLT.....	31
4.2.1. Zkouška smyku na bloku dřeva se zářezem	31
4.2.2. Stanovení modulu pružnosti ve smyku podle EN 408+A1	31
4.2.3. Stanovení smykové pevnosti lepených spojů dle ATSM D905-08	36
5. Cíl práce.....	37
6. Experiment.....	38
6.1. Metodika práce.....	38
6.1.1. Smykové napětí.....	38
6.1.2. Digital Image Correlation Systém (DIC) Q-400, fy. DANTEC	39
6.1.3. Specifikace použité sestavy:	40

6.2.	Zkušební těleso CLT nosník	41
6.2.1.	Příprava vzorků s ohledem na snímání DIC	41
6.3.	Experimentální práce	42
6.3.1.	Zatěžování zkušebních těles	42
6.4.	Výsledky zkoušek a diskuze	45
6.4.1.	Komparace FEM a reálného smykového namáhání	45
6.4.2.	Zjišťování vlivu makroskopických znaků příčných lamel na smykové namáhání	45
6.5.	Dílní shrnutí	50
7.	Závěr	51
8.	Literatura	53
9.	Seznam norem	55
10.	Seznam použitých zkratk	55

1. Úvod

Dřevo je přírodní materiál, který je používán ve stavebním průmyslu od pradávna. V současnosti, stejně jako v minulosti se používá na výrobu nástrojů, lodí, staveb (rodinné domy, chaty, sruby, sportovní haly, bazény, společenské budovy), mostů, atd. Je to velmi populární stavební materiál, protože má velkou tvarovou variabilitu, poměr mezi objemovou hmotností a podélnou pevností je o mnoho lepší než u jiných materiálů, je ze znovu obnovitelných zdrojů a jeho zpracování nemá tak výrazně negativní dopad na životní prostředí. Navíc mnohé studie ukazují, že lidé preferují dřevěné interiéry oproti betonovým nebo kovovým právě pro jejich teplotu a příjemný vzhled.

Vlastnosti dřeva závisí na druhu stromu, stáří, velikosti, obsahu vlhkosti, prostředí, kterému je vystaveno. Teplota druhu zatížení, anizotropii dřeva, sklonu vláken, nedokonalostech tvaru, vlivu přírodních defektů, jako jsou suky, atd. Základní rozdělení dřevin je na jehličnaté a listnaté. Největší rozdíl mezi těmito dřevinami je v anatomické struktuře. Listnaté dřeviny jsou obvykle charakterizovány vyšší objemovou hmotností.

V této práci je pozornost věnována především smykovým vlastnostem dřeva, protože v praxi se listý ohyb vyskytuje velmi málo. Při dimenzování nosníků je proto třeba brát ohled nejen na normálové napětí, ale i na smykové napětí a právě dřevěné nosníky jsou vystaveny velkým smykovým napětím, proto je třeba se zabírat jejich podrobnou analýzou [1].

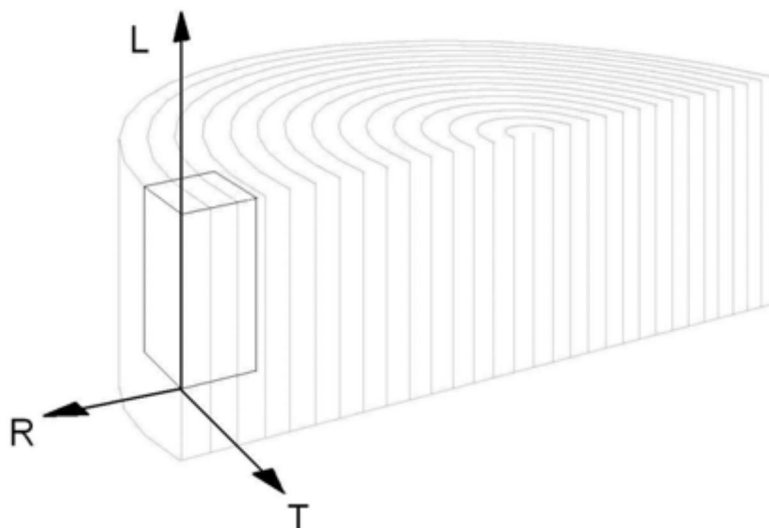
2. Konstrukční dřevo pro stavebnictví

2.1. Smykové pevnosti rostlého dřeva

V minulosti již bylo provedeno velké množství studií zabývajících se smykovými vlastnostmi rostlého dřeva. Tyto experimentální studie definují vlastnosti a chování dřeva ve smyku na té nejpodrobnější úrovni, přičemž zkušební vzorky jsou bez existence jakékoliv imperfekce nebo jiných defektů. V těchto studiích je z hlediska struktury dřeva věnována pozornost zejména vlivu letokruhů, podílu jarního a letního dřeva, vlivu makrostruktury či mikrostruktury dřeva. Veškeré parametry jsou zjišťovány v závislosti na orientaci těchto základních materiálových rovin dřeva, v tzv. ortogonální soustavě (Radiální LR, tangenciální LT a příčné RT), viz *obr. P. 1*.

Zde jsou požadavky na rostlé dřevo:

- dřevo musí být těsně vizuálně nebo mechanicky v závislosti na jeho pevnosti;
- vizuální těsnění provedeno v souladu s EN 14081-1+A1;
- mechanické těsnění provedeno v souladu s EN 14081-2+A1;
- charakteristické hodnoty pevnosti, tuhosti a objemové hmotnosti v souladu s EN 384;



Obr. P. 1: Ortogonální materiálové osy dřeva LRT [2].

Tabulka 1: Charakteristické hodnoty smykových pevností rostlého dřeva získané v *průběžných* studiích.

Studie	Dřevo	Zkušební metoda	Smyková pevnost [MPa]			Modul pružnosti ve smyku [MPa]			Obsah vlhkosti [%]
			TR	LT	LR	TR	LT	LR	
B.I. Hassel et al. (2009)	norský smrk	single cube apparatus				$G_{TR} = 70,5$			9,2
			$U_{RT} = 0,88$			$G_{RT} = 60,8$			9,2
J.F. Dumail (2000)	norský smrk	Iosipescu	2,9			57,7			10 - 13
Liu et al. (1999)	smrk	Iosipescu			6,25 (0°)*				12
					5,8 (30°)*				12
					5,74 (45°)*				12
					6,61 (60°)*				12
					6,05 (90°)*				12
Liu and Floeter (1984)	smrk	Arcan		6,25 (0°)*					12
				3,54 (30°)*					12
				2,56 (60°)*					12
				2,17 (90°)*					12

Studie	Dřevo	Zkušební metoda	Smyková pevnost [MPa]			Modul pružnosti ve smyku [MPa]			Obsah vlhkosti [%]
			TR	LT	LR	TR	LT	LR	
Liu and Ross	smrk	Arcan						910 (0°)*	9,4
								1184 (22,5°)*	9,4
								1670 (45°)*	9,4
Xavier et al. (2009)	námošnická borovice	Arcan	4,23	11,45	14,8	200	1076	1320	11
De Magistris and Salmén (2005)	smrk	Iosipescu				60	565	600	12
Müller et al. (2004)	smrk	vzorek upevněn mezi dva ocelové pláty		5,5			541		11
	modřín		7,5		663		11		
Dumail and Salmen (2001)	norský smrk (mokrý)	Iosipescu				25	jarní dřevo		
						44,8	letní dřevo		
Liu et al. (1996)	smrk	Arcan			5,9			663	10,4
Dahl and Malo (2009)	smrk	Arcan	1,5	5,1	6,82	30,7	582	641	12
Denzler and Glos (2007)	smrk	EN 408		5,5					10,7
Xavier et al. (2004)	námošnická borovice	Iosipescu		16,06	16,37	304	1266	1457	11
		Off axis		15,87	15,14		1152	1125	
Laghdir et al. (2008)	řerný smrk	Semi ring extensometer				55	798	841	12
Dumail and Salmen (2001)	norský smrk	Iosipescu				31,64			11-12
Dahl and Malo (2009)	smrk	Arcan	1,35	4,36	6,09	34,4	622	13.1	12
Yosihara and Ohta (2000)	sitka smrk	Torsion			11,3			600	12

* úhel mezi směrem zatížení a vlákny vzorku

2.2. Smykové pevnosti konstrukční dřeva

Jedná se o dřevo, které se používá k výrobě dřevěných konstrukčních prvků. Tyto prvky obsahují suky a jiné přírodní nedokonalosti. Jednotlivé pevnostní třídy jsou definovány v normě EN 338. V této normě je přesně stanoveno způsob, jakým mají být dřeviny jednotlivých

druhů stromů a kvality zařazeny do příslušných pevnostních tříd. Na základě toho je pak specifikován postup, jak se stanovují charakteristické hodnoty dlehlité pro navrhování různých dřevěných výrobků.

V normě EN 338 je uvedeno rozdělení pevnostních tříd. Do devíti tříd jsou rozděleny listnaté (od D30 až po D70 u tvrdého listnatého dřeva), a do šesti tříd jsou rozděleny jehličnaté dřeviny (C14 až po nejvyšší C40). Topol má poměr mezi objemovou hmotností a pevností podobný jako jehličnaté stromy, proto je zařazen mezi pevnostní třídy jehličnatých dřevin. Listnaté stromy se od jehličnanů odlišují jejich anatomickou strukturou. Obvykle se vyznačují vyšší objemovou hmotností i pevností než jehličnany. Dále jsou normativně ukotveny pro každou pevnostní třídu příslušné charakteristické hodnoty pevnosti, tuhosti a objemové hmotnosti.

Tabulka 2: Výsledky zkoušek smykových zkoušek pevností u konstrukčního dřeva dosažené v předchozích studiích.

Studie	Dřevo	Vzorek	Zkušební metoda	Smyková pevnost [MPa]	Modul pružnosti ve smyku [MPa]	Obsah vlhkosti [%]
Rianto and Gupta (1998)	smrk	845 x 90 x 38	4-bod. ohyb	6,4		13
		dle ASTM D 143	shear block test	7,9		13
		622 x 90 x 38 mm	3-bod. ohyb	9,1		13
		1067 x 90 x 38 mm	5-bod. ohyb	11,1		13
		900 x 90 x 38 mm	torsní test	12,6		13
Brandner et al. (2012)	norský smrk	985 x 40 x 75 mm I- přez	EN 408, 3-bod. ohyb	7,9		12
		1970 x 40 x 145 mm I- přez	EN 408, 3-bod. ohyb	6,7		12
		1970 x 80 x 150 mm I- přez	EN 408, 3-bod. ohyb	6,6		12
		3940 x 80 x 300 mm I- přez	EN 408, 3-bod. ohyb	4,8		12
		1200 x 80 x 80 mm I- přez	EN 408, 3-bod. ohyb	8,1		12
Khokhar et al. (2010)	sitka smrk	rozdílná délka x 45 x 100 mm	EN 408, torsní test	7,2	520	12
	norský smrk	2400 x 45 x 100 mm	EN 408, torsní test	8,5	610	12
		2400 x 45 x 100 mm	EN 408, torsní test	9,3	760	12

2.3. Smykové pevnosti lamelového dřeva

První variantou je podélně lepené lamelové dřevo GLT, což je konstrukčního dřeva skládající se z několika vrstev dřevěných lamel podélně slepených k sobě. Jedná se o vysoce kvalitní stavební materiál, který z mnoha důvodů potlačuje tradiční použití rostlého dřeva. Důvodem je velké množství výhod oproti rostlému dřevu, které je součástí výrobního procesu lepených lamelových prvků s integrovanou kontrolou kvality. Jednou z největších výhod jsou teoreticky neomezené rozměry, široká škála tvarů vytvářejících působivé konstrukční prvky s výšší pevností a tuhostí, možnost lepení lamelových prvků z nejrůznějších druhů dřeva s odlišnými vlastnostmi. Na únosnost těchto prvků má zcela zásadní vliv třída lamel podle pevnosti a kvalita spojení. Mechanické třídy dřeva na základě objemové hmotnosti a modulu pružnosti je klíčovým faktorem pro výrobu vysoce kvalitních výrobků. Požadavky na vlastnosti prken jsou stanoveny v normě LSN EN 14080, viz *tabulka 3*.

Tabulka 3: Charakteristické vlastnosti pevnosti a tuhosti pro T-třidy v N/mm^2 a hustoty v kg/m^3 pro prkna nebo fošny pro lepené lamelové dřevo.

Třída prken nebo fošen	$f_{t,0,l,k}$	$E_{t,0,l,mean}$	$\rho_{l,k}$
T8 (C14)	8	7 000	290
T9	9	7 500	300
T10 (C16)	10	8 000	310
T11 (C18)	11	9 000	320
T12 (C20)	12	9 500	330
T13 (C22)	13	10 000	340
T14 (C24)	14	11 000	350
T14,5	14,5	11 000	350
T15	15	11 500	360
T16 (C27)	16	11 500	370
T18 (C30)	18	12 000	380
T21 (C35)	21	13 000	390
T22	22	13 000	390
T24 (C40)	24	13 500	400
T26	26	14 000	410
T27 (C45)	27	15 000	410
T28	28	15 000	420
T30 (C50)	30	15 500	430
Třidy C podle EN 338:2009 splňují nejméně požadované hodnoty příslušných T-tříd.			

Mezi další výhody lepeného lamelového dřeva lze zařadit možnost výroby z dřeva stromů, které obsahuje jisté nedokonalosti bez ztráty pevnosti, menší pracnost a minimální produkce skleníkových plynů ve srovnání s výrobním procesem betonu.

GLT prvky jsou rozděleny do sedmi pevnostních tříd v souladu s normou LSN EN 14080. U nosníků z kombinovaného lepeného lamelového dřeva se nejnižší třída značí GL 20c a nejvyšší GL 32c. U kombinovaného lepeného lamelového dřeva se používají lamely

různých pevnostních tříd, příslušné vnější lamely vždy splňují požadavky vyšších pevnostních tříd než lamely vnitřní.

Tabulka 4: Charakteristické vlastnosti pevnosti a tuhosti v N/mm^2 a hustoty v kg/m^3 pro kombinované lepené lamelové dřevo.

		Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
Vlastnost	Značka	GL 20c	GL 22c	GL 24c	GL 26c	GL 28c	GL 30c	GL 32c
Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Pevnost v tahu	$f_{t,0,g,k}$	15	16	17	19	19,5	20	20
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Pevnost v tlaku	$f_{c,0,g,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	25	25
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k}$	3,5						
Pevnost ve valivém smyku	$f_{r,g,k}$	1,2						
Modul pružnosti	$E_{0,g,mean}$	10 400	10 400	11 000	12 000	12 500	13 000	13 500
	$E_{90,g,mean}$	300						
Modul pružnosti ve smyku	$G_{g,mean}$	650						
Modul pružnosti ve valivém smyku	$G_{r,g,mean}$	65						
Hustota	$\rho_{g,mean}$	390	390	400	420	430	430	440

Nosníky z homogenního lepeného lamelového dřeva se řadí do tříd GL 20h až GL 32h. U těchto nosníků se vždy používají lamely stejné pevnostní třídy. Kvalitu lamel požadovanou pro zajištění stanovených vlastností lze určit pomocí známých výpočetních vztahů. V případě použití homogenních GLT konstrukčních prvků při navrhování lze postupovat stejným způsobem dle EC5. V případě kombinovaných GLT konstrukčních prvků je nutné zohlednit odlišné charakteristické vlastnosti lamel, jako je pevnost a tuhost. Ověření pak musí být provedeno ve všech kritických oblastech průřezu.

Tabulka 5: Charakteristické vlastnosti pevnosti a tuhosti v N/mm^2 a hustoty v kg/m^3 pro homogenní lepené lamelové dřevo.

		Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
Vlastnost	Značka	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Pevnost v tahu	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Pevnost v tlaku	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k}$	3,5						
Pevnost ve valivém smyku	$f_{r,g,k}$	1,2						
Modul pružnosti	$E_{0,g,mean}$	8 400	10 500	11 500	12 000	12 600	13 600	14 200

		Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
Vlastnost	Značka	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Modul pružnosti	$E_{90,g,mean}$	300						
Modul pružnosti ve smyku	$G_{g,mean}$	650						
Modul pružnosti ve valivém smyku	$G_{r,g,mean}$	65						
Hustota	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

Druhou variantou je **přírodní lepené lamelové dřevo CLT** (*cross laminated timber*). V souladu s tímto je to velmi široce používaný plošný, konstrukční dřevěný prvek. Jedná se o inovativní stavební materiál, který může v některých případech nahradit beton, zdivo nebo ocel. CLT se vyrábí z lamel dřeva z především lokálních zdrojů, složených a slepených k sobě v pravém úhlu, což poskytuje rovnoměrné šíření zatížení, větší tvarovou stabilitu ve všech směrech, která by mohla být naružena útlínky zatížení. Zároveň zmenšuje možnost tvarových nebo rozměrových změn způsobených vlivem klimatických podmínek, kterým jsou dané prvky vystaveny. Materiál lze použít u komerčních nebo obytných budov, jako nosný prvek pro obvodové stěny, podlahy, stropy, střešní aplikace. Rozdíl mezi GLT a CLT je především v použití. GLT se používají nejčastěji jako podélné/prutové prvky, kdežto CLT pak pro plošné stavební prvky.

CLT panely především z dřeva jehličnanů. První fáze výroby CLT panelů je první fáze kondicionování fořen/desek o tloušťce 10 až 40 mm na $12 \pm 2\%$ obsah vlhkosti. Poté jsou desky vizuálně nebo mechanicky rozřezány do příslušných pevnostních tříd, jak je uvedeno v tabulce 1. Takto rozřezané desky pokračují k finální úpravě na lamely požadovaných tloušťek a rozměrů. Jednotlivé vrstvy hotových lamel se na sebe ukládají kolmo a celoplošně se lepí PUR lepidlem, které neobsahuje formaldehyd. Lepidlo se nanáší celoplošně následně probíhá lisování. Slepěné panely se pak šelou na CNC strojích do požadovaných rozměrů a tvarů s milimetrovou přesností, což je další nezanedbatelnou přesností těchto stavebních prvků.

Tabulka 6: Výsledky zkoušek pevností GLT a CLT prvků dosažené v předchozích studiích.

Studie	Dřevo	Vzorek	Zkušební metoda	Smyková pevnost [MPa]	Modul pružnosti ve smyku [MPa]	Obsah vlhkosti [%]
Brandner et al. (2007)	GLT GL24h	6080 x 150 x 320 mm edgewise	EN 408, 3pB. Test, single span method		823	
		6080 x 150 x 320 mm flatwise			790	
		6080 x 150 x 320 mm edgewise	EN 408, 3pB. Test, variable span method		767	
		6080 x 150 x 320 mm flatwise			752	
		6080 x 150 x 320 mm	torzní test		616	
		6080 x 150 x 320 mm	EN 408, 4-bod. ohyb		694	

Studie	Dřevo	Vzorek	Zkušební metoda	Smyková pevnost [MPa]	Modul pružnosti ve smyku [MPa]	Obsah vlhkosti [%]
Brandner et al. (2008)	GLT	GL36h 9600 x 160 x 600	EN 408, 4-bod. ohyb		660	12
		GL36c 9600 x 160 x 600	EN 408, 4-bod. ohyb		653	12
Rammer and Soltis (1994)	Jihní borovice	GLT 40 x 100 mm	5-bod. ohyb	13,6		10
		GLT 64 x 140 mm	5-bod. ohyb	11,3		10,1
		GTL 76 x 380 mm	5-bod. ohyb	9,2		10,5
		GLT 40 x 100 mm	shear block test	9,5		10,5
		GLT 64 x 140 mm	shear block test	9,6		11,3
		GTL 76 x 380 mm	shear block test	9,8		10,9
	Douglaska	GLT 40 x 140 mm	5-bod. ohyb	10		10,7
		GLT 64 x 165 mm	5-bod. ohyb	8,8		12,2
		GLT 110 x 292 mm	5-bod. ohyb	6,5		10,1
		GLT 130 x 610 mm	5-bod. ohyb	5,3		11,3
		GLT 40 x 140 mm	shear block test	8,5		10,7
		GLT 64 x 165 mm	shear block test	9		10,9
		GLT 110 x 292 mm	shear block test	10,6		10,4
		GLT 130 x 610 mm	shear block test	6,6		11,4

3. Faktory ovlivňující smykové chování dřeva

U izotropních materiálů, jako jsou například některé kovy, je smyková pevnost stejná ve všech směrech. Ovšem u dřevěných materiálů je vlivem vláknité struktury smyková pevnost odlišná ve směrech na sebe kolmých směrech. Lístý jednosměrný smyk se bez spolupůsobení jiných napětí nevyskytuje dokonce ani při samotném zkoušce kroucením.

Výsledky zkoumání smykových vlastností jako jedné z určujících parametrů dřeva jsou známy. Problematikou se již dřív zabývalo mnoho autorů, nicméně výsledky jsou stále nejednotné z důvodu širokého rozpětí materiálových vlastností dřeva. V minulosti bylo odlišných výsledků dosaženo vržených experimentech a studiích, které byly provedeny za rozdílných podmínek. Nejednotnost těchto výsledků je způsobena užitím různých zkušebních zařízení a postupů, tyto použité typy zkušebních metod jsou detailněji popsány v kap. 4.

Mezi hlavní faktory, které ovlivňující smykovou pevnost dřeva, lze rozdělit do několika skupin.

- a) Materiálová charakteristika dřeva
- b) Anizotropie dřeva
- c) Zkušební podmínky

3.1. Materiálová charakteristika dřeva

Základní rozdělení dřevin je na jehličnaté a listnaté. Dřevo jehličnatých stromů je lehké, měkké a snadno se opracovává, proto se často o něm hovoří souhrnně jako o měkkém dřevu. Naopak dřevo z listnatých dřevin je často označováno jako tvrdé dřevo, protože dosahuje vyšších hodnot mechanických vlastností a vyšší objemové hmotnosti. Mezi základní mechanické vlastnosti patří pružnost, pevnost, plasticita, houževnatost, tvrdost, odolnost proti tečení, proti trvalému zatížení, proti smyku a proti únavovému lomu [1].

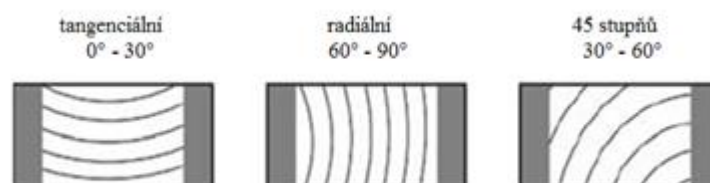
Tabulka 7: Smykové moduly pružnosti domácích dřevin obvykle používaných. Uvedené hodnoty jsou v MPa, při vlhkosti 11-12 % [1].

Dřevina	Radiální rovina G_{LR}	Tangenciální rovina G_{LT}	Příčná rovina G_{RT}
Smrk	573	474	53
Jasan	1324	1082	254
Topol	841	386	112

3.2. Anizotropie dřeva

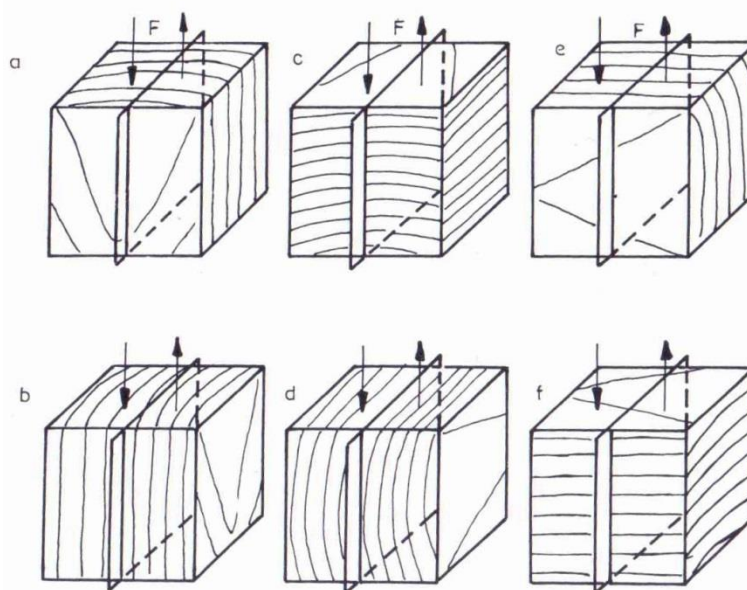
Největší vliv na pevnost dřeva má jeho anizotropie. Anizotropie je rozdíl fyzikálních a mechanických vlastností dřeva v jednotlivých směrech (podélném, příčném radiálním a příčném tangenciálním). Je dána stavbou dřeva v jeho makro- a mikrostruktuře.

Způsoby použití dřeva s ohledem na jeho řůst a polohu letokruhů, lze vidět na obrázku P. 2.



Obr. P. 2: Možné způsoby použití dřeva s ohledem na orientaci letokruhů [3].

Vezmeme-li v úvahu vláknitou stavbu dřeva a anatomické roviny se zřetelem na směr působení vnějších sil, rozlišíme tyto druhy smyku, viz obr. P. 3.



Obr. P. 3: Pŕpady pevnosti dŕeva ve smyku [1].

- a) smyk v radiální rovině pŕsobení sil ve směru vláken;
- b) smyk v tangenciální rovině pŕsobení sil ve směru vláken;
- c) smyk v radiální rovině pŕsobení sil ve směru kolmo na vlákna;
- d) smyk v tangenciální rovině pŕsobení sil ve směru kolmo na vlákna;
- e) smyk v pŕíčné rovině pŕsobení sil kolmo na vlákna tangenciálním směrem;
- f) smyk v pŕíčné rovině pŕsobení sil kolmo na vlákna radiálním směrem; [1]

3.2.1. Makrostruktura dŕeva

V makroskopické hladině lze zmínit poměr jarního a letního dŕeva v letokruhu, které má rŕzné hodnoty vlastností a dŕevové paprsky, jeŕ se v radiálním směru málo deformují (parenchym-sklon fibril).

Makroskopické znaky dŕeva jsou pozorovatelné pouhým okem. Dŕevo má charakteristické morfologické znaky textury a to barvu, tvar a výskyt tŕchto jednotlivých znakŕ, které jsou typické pro jednotlivé dŕeviny. Vŕŕina znakŕ dŕeva se rozdílně projevuje v ŕezech, které mají rŕznou polohu podél osy kmene.

Dŕeŕ je svŕlé, ŕdké pletivo, u starŕích stromŕ odumŕlé, nachází se ve stŕedu kmene. Je označováno jako základní pletivo podílející se v prvním roce ŕivota stromu na vedení vody.

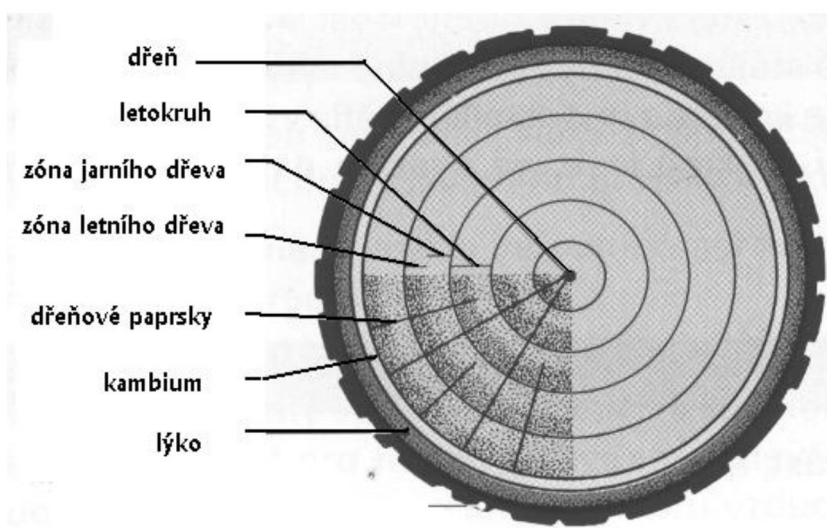
Kŕŕa je soubor povrchových vrstev kmene obklopujících stŕedové ŕásti (kambium, dŕevo, dŕeŕ). Vzniká ŕinností dvou sekundárních dŕivých pletiv felogenu a kambia. Vnŕŕí vrstva (vlastní kŕŕa) vzniká ŕinností felogenu, který produkuje odstŕdivŕpovrchovou korkovou ŕást kŕŕy a dostŕdivŕ zelenou kŕŕu. Tato vrstva kŕŕy chrání vnitŕní pletiva kŕŕy (lýko) a pŕedevŕm kambium proti mechanickému poŕkození a nepŕznivým vlivŕm biotických a abiotických ŕinitelŕ. Vnitŕní vrstva kŕŕy - lýko, vzniká ŕinností kambia. Lýkem jsou vedeny asimiláty vytvoŕené fotosyntézou v listech.

Kambium je dŕivé (meristematické) pletivo nacházející se mezi lýkem a dŕevem. Tvoŕí úzkou, okem nerozliŕitelnou vrstvu sloŕenou z ŕivých bunŕk schopných dŕení bŕhem celého ŕivota stromu.

Dřeňové paprsky jsou produktem kambia. Tvoší různě velká seskupení parenchymatických buněk orientovaných na podélnou osu kmene kolmo. Na příčném řezu se jeví jako pásy probíhající od obvodu do středu kmene kolmo na letokruhy. Významně ovlivňují vlastnosti dřeva zvláště ohybnost

Letokruhy jsou roční přírůstky dřeva. Na příčném řezu tvoší soustředěné vrstvy navazující jedna na druhou a obklopující dřeň. Jsou výsledkem pěstovaného tloušťkového růstu stromů v důsledku vegetačního klidu dřevin mírného pásma. Každý letokruh se skládá z jarního dřeva, vytvořeného na začátku vegetačního období, a z letního dřeva vytvořeného v průběhu vegetačního období. Jarní dřevo bývá světlejší, letní tmavší.

Dřevo je centrální část kmenů dřevin mezi dřéní a kambiem. Na příčném řezu kmenem se z makroskopického hlediska rozlišují: letokruhy, jarní a letní dřevo v rámci letokruhu, jádro, borka, vyvráté dřevo, cévy, dřeňové paprsky, pryskyřičné kanálky a suky [4].



Obr. 1. 4: Pohled na strukturu dřeva. Vnitřní vrstva kůry je lýko, vnější vrstva kůry je periderm [5].

3.2.2. Mikrostruktura dřeva

Mezi hlavní mikroskopické znaky, které způsobují anizotropii v mikrostruktuře dřeva, lze označit rozdílný podíl jednotlivých stavebních elementů (tracheidy, tracheje, parenchymatické buňky, libriformní vlákna, dřeňové paprsky atp.

Pletivo rostlin je soubor buněk příslušné funkce a stejného tvaru. Pletiva pravá vznikají dělením jedné buňky, pletiva nepravá seskupením samostatných buněk a pak srůstem jejich blan a pletiva smíšená druhotným srůstem pletiv nepravých.

Podle tvaru buněk dělíme pletiva na parenchym z tenkostěnných buněk ve všech směrech příslušné stejné rozměry, prozenchym z buněk tenkoblaných, v jednom směru protáhlých, kolenchym z buněk ve všech směrech skoro stejných rozměrů, bez mezibuněčných prostor, se stěnami ztlouklými na rozích a sklerenchym tvořený buňkami s blanami stejnoměrně ztlouklými.

Různé druhy pletiv se sdružují v soustavy pletiv, mající často jednu společnou funkci. Jedná se o soustavu pletiv děivých (meristematických, embryonálních), umohňujících růst, s buňkami parenchymatického tvaru. Soustavu pletiv krycích, vodivých, základních, z buněk definitivního tvaru tj. pletiva trvalá (definitivní).

Cévní svazky jsou specializovaná vodivá pletiva vyšších rostlin, jejichž funkcí je rozvádět vodu a vodní roztoky anorganických a organických sloučenin. Vodivá pletiva v cévním svazku jsou uspořádána tak, aby transportu látek kladou co nejmenší odpor. Buňky jsou ve směru proudění protáhlé s co nejmenším počtem příčných buněčných stěn, bez intercelulár, s tenkými buněčnými stěnami opatřenými ztenčeninami nebo otvůrkami.

Pro dvojí funkci cévních svazků se vytvořil i dvojí typ vodivých buněk. Anorganické roztoky proudí mrtvými buňkami, cévami (tracheje) a cévicemi (tracheidy). Organické asimiláty jsou vedeny živými, velmi prodlouženými buňkami, sítkovicemi. Lásť svazků cévních, která obsahuje cévy, se nazývá lásť dřevní (xylém), lásť svazků obsahující sítkovice se nazývá lásť lýkovou (floém) [4].

3.2.3. Submikrostruktura dřeva

Lze sem zařadit i submikroskopickou diverzitu, například rozdílný přiblížení vláken celulózy v jednotlivých vrstvách buněčných stěn, který je orientován podél osy buňky nebo výskyt ztenčenin.

Jednoduchá tělka (ztenčenina) nacházející se především na radiálních buněčných stěnách, makroskopie jarní a letní dřeva, které mají odlišné pevnostní charakteristiky v letokruzích a dřevové paprsky, jež jsou lehce deformovány v radiálním směru [1].

3.3. Zkoušební podmínky

Dalším faktorem, který může výrazně ovlivnit chování dřeva, jsou okolní podmínky. Patří sem například způsob, doba, směr a rychlost zatěžování. Klimatické podmínky (vlhkost a teplota), při jakých byly vzorky před zkoušením kondicionovány a samotný obsah vlhkosti zkoušebních těles v přiblížení zkoušek. Obsah vlhkosti má výrazný vliv na výsledné chování materiálu a může tak velmi ovlivnit výsledky zkoušek.

4. Režerže zkúbebných metod urľujíc parametry smykové pevnosti

V této ľásti práci bylo provedeno srovnání doposud nejľastĹi pouĹíváných zkúbebných zařzení a metod v minulosti pouĹíváných pro zkouĹení dřeva, materiálů a konstrukčnĹích prvků z něj vyrobených. Každé zařzení charakterizuje smykové vlastnosti materiálů specifickým způsobem. Některé testovací metody popisují odolnost materiálu na mikroúrovni, některé na makroúrovni, nebo popisují chování celého konstrukčnĹího prvku, vystaveného smykovému zatĹížení

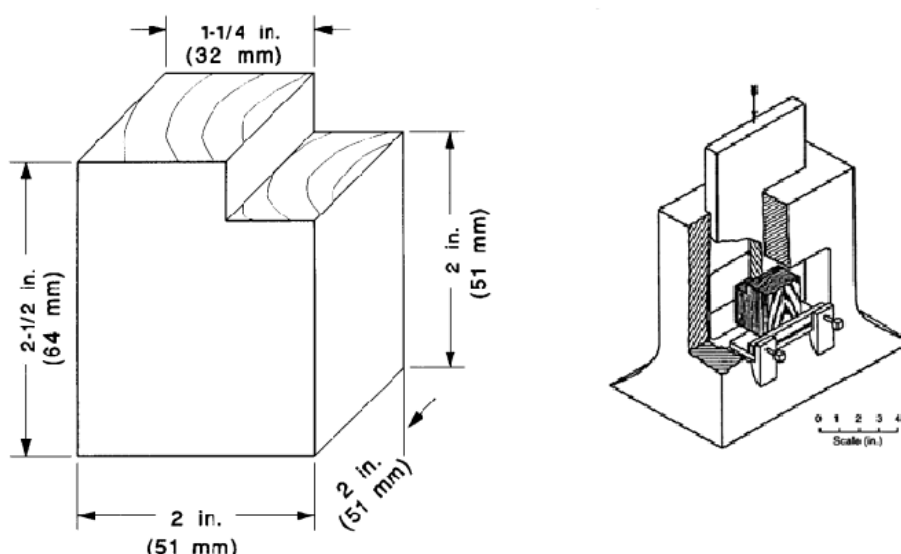
4.1. Rostlé dřevo

4.1.1. Zkouška smyku na bloku dřeva se zářezem

Jedná se o zkúbebnĹí metodu provádĹnou v souladu s normou ASTM D 143. D. R. Rammer a L. A. Soltis provedli dvě studie, ve kterých bylo toto zkúbebnĹí zařzení pouĹito. V první studii byly zkouĹeny vzorky z nosníků GLT, které byly z douglasky tisolisté a borovice. Jedním ze závěrů však bylo zjiřtĹní, Ĺe se tato metoda nehodĹí pro stanovenĹí smykových vlastností rostlého dřeva. V druhé studii byla jejich pozornost upřsna právna zkouĹení vzorků z rostlého dřeva douglasky tisolisté. Výsledky zkoušek sice byly podobné ĹiĹ dřeva publikovaným průmĹrným hodnotám, ale pevnosti dosaĹené u vzorků zkouĹených v mokřem stavu byly neobvykle vysoké i př zachování vysokého přesnosti měřenĹí [3].

Tato zkúbebnĹí metoda byla v minulosti kritizována mnoha autory, kvĹli excentrickému zatĹíhovánĹí, a protoĹe vyvozuje normálové napĹí na smykovou plochu, což způsobuje nerovnomĹrné řsĹení smykového napĹí s koncentrací napĹí v rozích vzorku. Přesto však tato zkúbebnĹí metoda a její modifikované verze byly mnohokrát v minulosti pouĹity a jsou stále základem pro stanovenĹí smykových vlastností dřeva a dřevĹných produktů.

Hodnoty smykové pevnosti konstrukčnĹích prvků získané touto zkúbebnĹí metodou, **nejsou reprezentativní**, protoĹe nezohledňují místnĹí defekty dřeva, jako jsou suky, rozřtĹpenĹí, apod [6, 7].

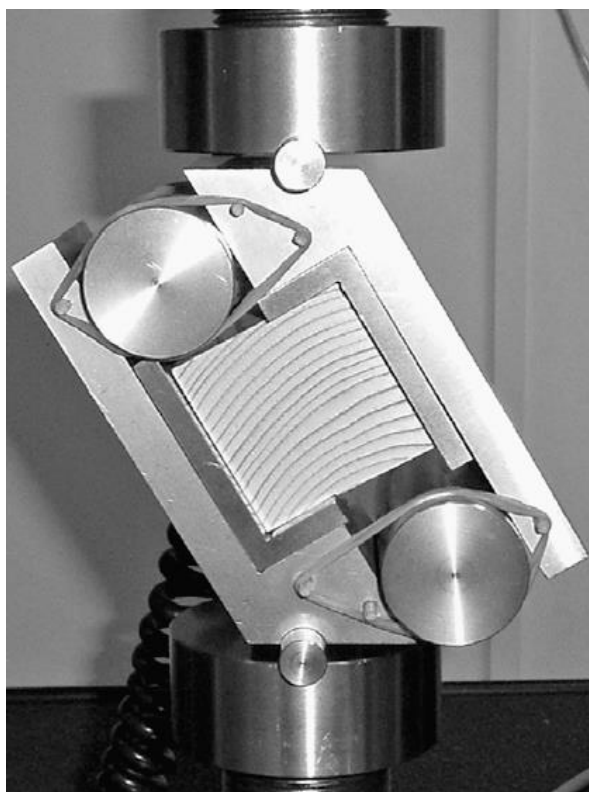


Obr. ř. 5: ZkoubebnĹí vzorek a zkúbebnĹí zařzení dle ASTM D 143.

4.1.2. Single cube apparatus (zkoušení dřevěné kostky)

Single cube apparatus (SCA) byl vyvinut pro přesnější stanovení smykových vlastností a byl použit ve studii Bassel a spol. (2009). Pozornost zde byla zaměřena na zkoušení vzorků ze smrkového dřeva v RT a TR orientaci.

Vzorek umístěný do zkušebního zařizení je zatčován pod úhlem 31°. Tento úhel byl vybrán na základě výpočetních modelů pomocí metody konečných prvků (FEA). Tlakové zatížení je aplikováno horní částí zkušebního zařizení a to je následně transformováno na smykové síly působící na vzorek pomocí uchycení. Malé válce usnadňují zarovnání a pozici vzorku. Pomocí FEA bylo zjištěno, že smykové napětí je konstantní po celé vyšetřované oblasti a je o 16% vyšší, než celkové napětí. Modul pružnosti ve smyku stanovený zkušební metodou byl 71 MPa, což je hodnota vyšší než ve většině dřevěných studií. Na základě výsledků tohoto experimentu bylo rozhodnuto, že SCA je silným kandidátem pro zlepšení procedur zabývajících se stanovením smykových vlastností dřeva a dalších materiálů, kde porozita, heterogenita a polární ortotropie může způsobit jisté problémy. Také příprava vzorků je o mnoho snazší než u většiny jiných zkušebních metod [8].



Obr. P. 6: Single cube apparatus (SCA). Vzorek v směru RT [8].

4.1.3. Iosipescu zkušební zařizení

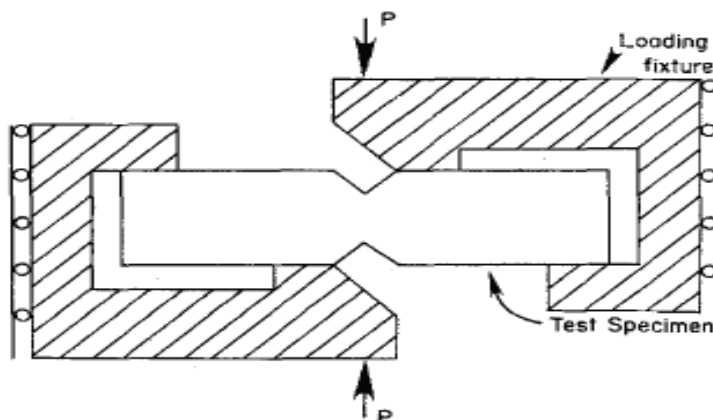
Toto zkušební zařizení bylo původně navrženo pro zkoušení kovových materiálů a bylo vyvinuto za účelem zpřesnění výsledků. Ve srovnání s jinými zkušebními metodami je v současné době Iosipescu zařizení používáno velmi hojně při zkoušení kompozitních materiálů pro jeho univerzálnost a vysokou přesnost, protože u něj dochází k čistě smykovému namáhání v přesně definovaném průřezu zkušebního vzorku. Vzorek je umístěn do zkušebního zařizení, které působí zatížení na vzorek v obou směrech tak, že nedochází k žádnému ohybovému

momentu, ale smykové hodnoty naopak nabývají maximálních hodnot v kritickém průřezu vzorku. První zkušební zařízení vytvářely na vzorek tlakové zatížení v asymetrickém lýtšodovém ohybu, viz *obrázek P. 7*.

Toto uchycení transformuje aplikované tlakové zatížení P na smykové ve vyšetřovaném průřezu. Průměrné smykové napětí v tomto místě vypočte dle vztahu:

$$\tau = \frac{P}{A}$$

kde A je plocha průřezu mezi zášazy uprostřed vzorku a P je síla vyvíjená na vzorek.



Obr. P. 7: Schéma zkušebního zařízení Iosipescu [9].

Během se přidává postranní tenzometr ve středě vyšetřované oblasti vzorku, kde je odchylka od průměrného napětí nejvyšší. Hlavní smykové napětí se vypočítá podle vztahu:

$$\tau = \sigma_{xy} - \sigma_{yx}$$

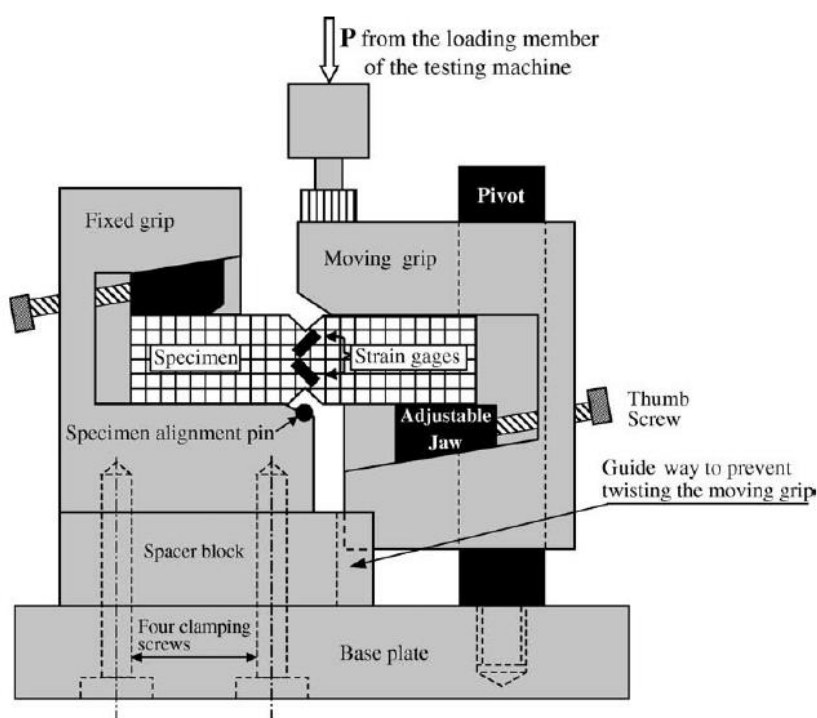
Modul pružnosti ve smyku se vypočítá:

$$\tau = \frac{\sigma}{\gamma}$$

Největším nedostatkem této zkušební metody je, že musí být známy všechny mechanické vlastnosti vzorku před vyhodnocením zkoušky. Další nevýhodou je nehomogenní a velmi rozdílné napětí a deformace ve zkoumané části. Různé smykové napětí a deformace pole závisí na geometrii zkušební oblasti a na orientaci hlavní materiálové osy vzorku. Například v případě pouhnutí vzorku s ostřejším zášezem byly vysoké koncentrace napětí zaznamenány v oblasti hrotů zášezů a celkově bylo dosaženo více homogenního napětí. Je nutné provést výpočet pomocí metody konečných prvků (opravné koeficienty empirických výsledků) pro dosažení a vyhodnocení přesných konečných hodnot. Korekční faktor se vyhodnocuje jako poměr mezi průměrným napětím celé testované oblasti a napětím měřeným uprostřed. Zde může být také použit korekční faktor na nekonstantní průběh deformací. Nevýhodou je také velmi

vysoké kontaktní napětí u vnitřních zatíhovacích bodů, ztráta kontaktu na opačných stranách těchto bodů a vznik tahových napětí v těchto místech, kde dojde ke ztrátě kontaktu. K tomuto jevu dochází především díky změnám geometrie vzorku v důsledku zatíhování v oblasti, kde je vzorek uchycen. Navíc, zkušební vzorek musí být vyroben s co nejvyšší přesností a výroba takto přesných vzorků není jednoduchá.

Za účelem dosažení správných výsledků s dostatečnou přesností je nutné, aby všechny tyto nedostatky byly kontrolovány a redukovány. Tato metoda poskytuje hodnoty modulu pružnosti ve smyku a také smykové pevnosti [9].



Obr. P. 8: Zkušebního zařízení Iosipescu, typ uchycení Wyoming [10].

Pro eliminaci některých nedostatků zmíněných dříve, bylo vyvinuto nové zkušební zařízení, tzv. **Wyoming fixture**, viz obrázek P. 8. Hlavním rozdílem mezi originálním aparátem a tímto je způsob uchycení vzorku. Kontaktní plocha, kterou je přenášeno zatížení na vzorek, je mnohem větší. Levá část vzorku je pevně uchycena do základní části a pravá část je pohyblivá ve směru podélném kolem vodícího trnu [10].

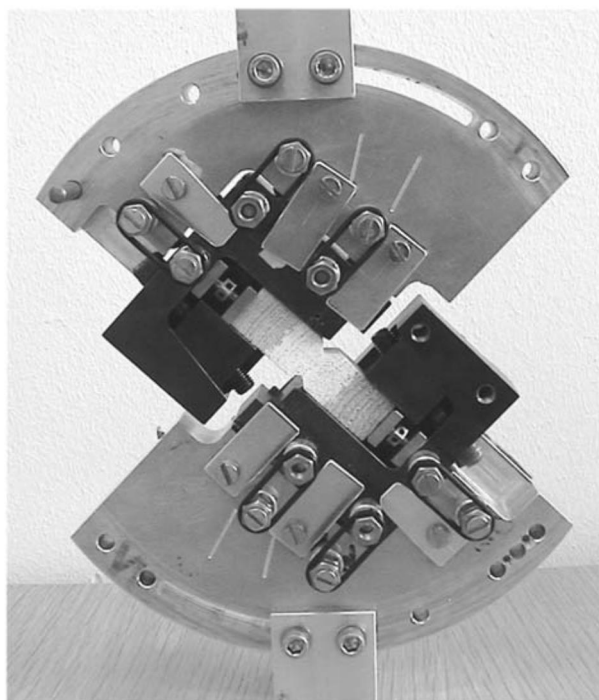


Obr. P. 9: Upravené zkušební zařízení Iosipescu s sadou nových vylepšení, použité ve studii Melin (2008) [9].

Melin (2008) vyvinul nové zkušební zařízení, které výrazně omezuje nedostatky verze Wyoming fixture, viz obrázek P. 9. Některými novými funkcemi tohoto zkušební aparátu jsou například: vodící tyče pro každou pohybující se polovinu zařízení, vylepšený mechanismus uchycení vzorku, který produkuje pouze normálové napětí, možnost upnutí vzorku ve třech směrech poblíž oblasti s nejvyšším kontaktním napětím, za účelem snížení rizika destrukce vzorku. A také opatření vodících tyčí pružinami pro minimalizaci tangenciálních napětí vznikajících ve vyšetřované oblasti vzorku. Navíc také umístění a centrace vzorku je mnohem přesnější v tomto případě [9].

4.1.4. Modifikované Iosipescu zkušební zařízení

Tento aparát umožňuje zkoušení vzorků v kombinovaném zatížení smykem a tlakem zároveň, viz obrázek P. 10. Úhel 45° byl vybrán na základě výpočtu FEA, protože poskytuje nejjednodušší napětí v oblasti mezi zářezy vzorku.



Obr. P. 10: Modifikované Iosipescu zkoušební zařízení [11].

Ve studii [11] bylo použito pro stanovení Youngova modulu a modulu pružnosti ve smyku norského smrku. Velikost vzorku byla 63,5 x 18,5 x 10,7 mm. Kontrolovaná rychlost zatíňování byla 0,5 mm/min a pro měření aplikovaného zatížení byl použit standardní 500 N tenzometr. Maximální zatížení bylo 80 N, což koresponduje s únosností 1 MPa v tlaku v oblasti mezi zářezy. Výsledky a materiálové vlastnosti jsou uvedeny na obrázku P. 11.

	Earlywood			Transition wood	Late-wood	Orthotropic homogeneous
	(first cell rows)	(middle cell rows)	(last cell rows)			
ρ (kg m ⁻³)	210	280	350	420	600	500
E_R (MPa)	600	730	805	1020	1280	1000
E_T (MPa)	395	475	610	860	1190	850
E_L (MPa)	7700	9125	10060	12750	16000	12500
ν_{RT}	0.75	0.77	0.65	0.59	0.53	0.61
ν_{RL}	0.037	0.039	0.036	0.034	0.032	0.034
ν_{TL}	0.026	0.025	0.027	0.028	0.029	0.028
G_{RT} (MPa)	36	40	45	65	75	60
G_{RL} (MPa)	360	400	450	650	750	600
G_{TL} (MPa)	340	375	420	600	705	565

E , G and ν are the Young's modulus, shear modulus and Poisson ratio, respectively, defined with respect to the main directions of the material; T, tangential; R, radial; and L, longitudinal.

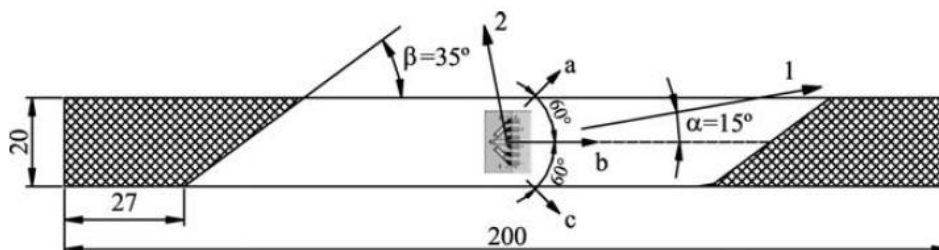
Obr. P. 11: Materiálové vlastnosti a výsledku studie, De Magistris a Salmén L. (2005) [11].

Velmi podrobné srovnání mezi experimentálními výsledky a FE analýzou byly provedeny ve studii [12]. Porovnání ukazuje, že zkoušební zařízení je schopné s dostatečnou přesností popsat chování ortotropních materiálů, které jsou vystaveny smykovému a tlakovému zatížení.

4.1.5. Off axis test (mimo-osový test)

Jedná se o jednu z nejstarších metod, která se používá pro stanovení smykových vlastností ortotropních materiálů. Bohužel se však o metodu, která poskytuje nejméně přesné výsledky ve srovnání s Iosipescu zkouškou nebo dalšími metodami. Vlákná vzorku musí být orientována pod přesně daným úhlem s ohledem na směr zatížení. Použití gíkmých úchytů na jednotlivých koncích vzorku zajišťuje rovnoměrné rozdělení napětí v oblasti vzorku, kde probíhá jeho měření. Tento test není možné použít pro měření dřevěných vzorků orientovaných v rovině pšedevším proto, že pširodní roviny symetrie dřeva je téměř izotropní. Tato metoda také vyžaduje použití korekčních faktorů, stanovených pomocí metody konečných prvků. Deformace jsou měřeny pomocí ršnice umístěné ve střední části vzorku.

J. C. Xavier a spol. [13] provedli srovnání této metody se zkušební metodou Iosipescu. Jejich závěr byl takový, že Iosipescu test poskytuje přesné měření horních a dolních mezí smykových pevností, které jsou velmi blízké v pšipadě použití vzorků orientovaných v rovinách LT a LR. Na druhou stranu, mimo-osý test umožňuje velmi přesné stanovení spodní hranice těchto smykových pevností, pšumo z měřeného zatížení pš poružení.



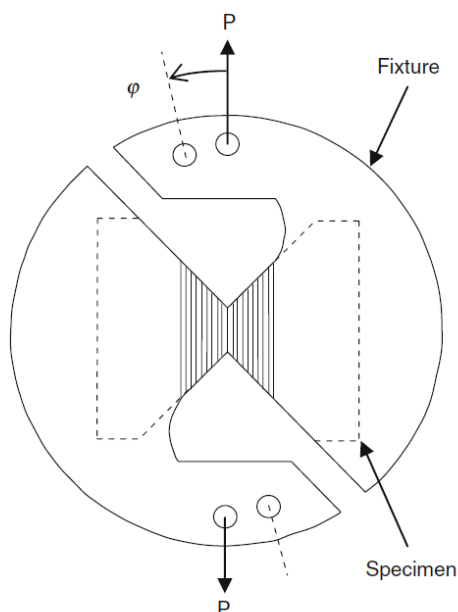
Obr. P. 12: Zkušební vzorek pro mimo-osý test [13].

4.1.6. Arcan test

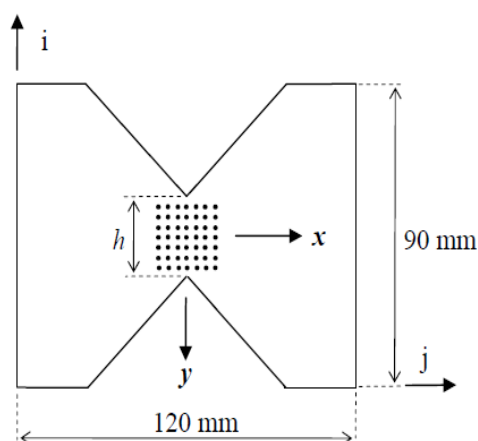
Tato zkušební metoda navazuje na myšlenku Iosipescu aparátu. Zkušební vzorek je ve tvaru motýla a jeho uchycení umožňuje aplikovat zatížení, které je velmi přesně distribuováno do požadované smykové plochy.

Změnami úhlu α pro smykové zkoušky na Arcan zařízení lze vyšetřovat kombinace úhlů smykových a normálových napětí, viz obrázek P. 13. Vzorek může být zařízením uchycen pomocí gírbek nebo jej lze pšlepit. Pomocí metody konečných prvků bylo zjišeno, že smykové napětí je téměř konstantní v pštřihu celé vyšetřované oblasti.

Smykové zatížení může být do vzorku pšnáženo pomocí tšecích sil, gírouby nebo lepeným spojem. Zatížení vyvíjené na Arcan mechanismus je tahové. Vzorky jsou z pravidla pšed zkoušením kondicionovány a obsah vlhkosti je 12%.



Obr. P. 13: Arcan zkúšebný zařzení [14].



Obr. P. 14: Zkúšebný vzorek pro Arcan test [14].

Ve studii [14] byl pouhito smrkové dšvo, viz obrázek 14. Výška smykové oblasti byla 25-30 mm, tlouřka vzorku se pohybovala v rozmezí 12 - 17 mm. Materiál byl kondicionován v klimatické komoře s obsahem vlhkosti 65% a teplotou 20°C na 12% obsah vlhkosti v dšv. Průměrná objemová hmotnost vzorků byla 398 kg/m³. V tomto experimentu byly pouhity 3 druhy vzorků, jeů byly vyřezány s ohledem na 3 základní materiálové roviny dšva a následně zkouěny. Rychlost zatřování byla 0,3 mm/min a k poruění vzorků docházelo mezi 200 - 400 s od začátku zkouěky. V tomto pšpadě byly vzorky pšlepeny ke zkúšebnému aparátu. Prvně byly zatřovány do 40% jejich pšedpokládané únosnosti, následně došlo k jejich odlehění a poté byly znovu zatřeny až do poruění. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Výsledné hodnoty modulů pružnosti ve smyku a objemových hmotností pro všechny zkušební varianty [14].

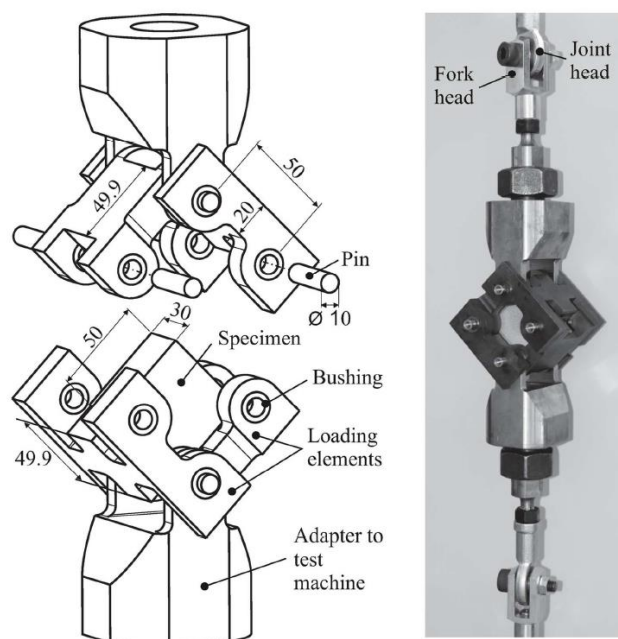
Type ij	Max G [MPa]	Min G [MPa]	Průměr G [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
LR	674	625	641	394
TL	599	574	582	412
RT	32,2	28,9	30,7	381

Ve studii [15] byly použity 2 typy vzorků z borovice. První vzorek o rozměrech 130 x 50 x 8 mm a druhý velikosti 70 x 50 x 8 mm a v obou případech byla výška smykové plochy 30 mm. Rychlost zatěžování byla 2mm/min. V tomto experimentu bylo použito uchycení, které přenáší zatížení do vzorku pomocí třecích sil v kontaktních místech.

Ve studii [16] bylo použito opo Arcan zkušební zařízení, ale vzorek do něj byl v tomto případě upevněn pomocí přídržných desek na každé straně. Jednotlivé části uchycení a vzorku byly vloženy mezi tyto přídržné desky, které měly vnitřní povrchy opatřeny rýhováním pro lepší přenos třecích sil. Stanovený průměrný modul pružnosti ve smyku byl 665 MPa, objemová hmotnost byla 400 kg/m³ při 10,4% obsahu vlhkosti.

4.1.7. Picture-frame test

Jedná se o zařízení, které drží zkušební těleso ze všech stran, jako rám obrazu (příklad z anglického picture-frame). Umožňuje zkoušení pomocí silných obdélníkových bloků vzorků o délce 50 mm maximální tloušťce 30 mm. Maximální síla aplikovaná ve svislém směru může být 35kN, čímž lze vyvolat smykové napětí 16,5 MPa při použití vzorku o tloušťce 30 mm. Toto uchycení může být použito na konvenčních jednoosých zkušebních strojích. Vzorek může být uchycen do zařízení pomocí lepidla. Výsledky této studie ukazují, že dochází ke vzniku homogenního rozdělení čistě smykového napětí u vzorků s nízkou tuhostí. Uchycení lze použít pro zkoušení pevných látek s nepravidelnou vnitřní strukturou [17].



Obr. 15: Zkušební zařízení Picture frame [17].

4.2. Konstruktivní dřeva, CLT a GLT

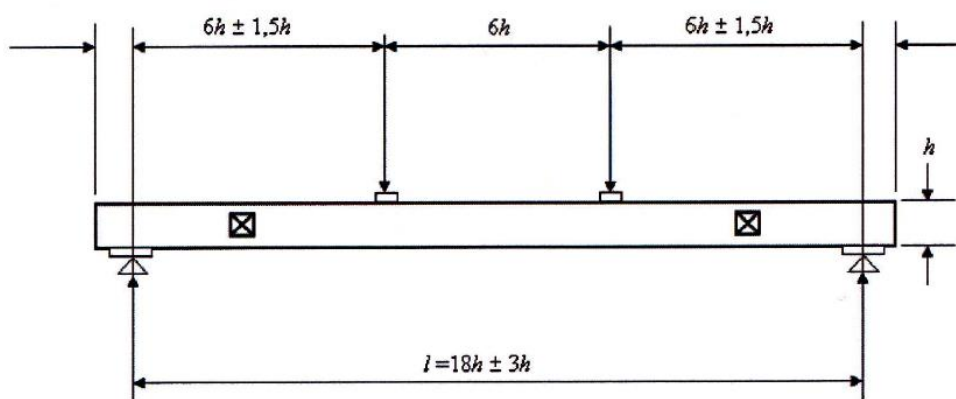
4.2.1. Zkouška smyku na bloku dřeva se zářezem

Tato zkušební metoda byla původně vyvinuta za účelem zkoušení vzorků z rostlého dřeva, ale je používána i výrobcí GLT výrobků, jako kontrolní znak, zdali zkušební hodnoty nejsou nižší, než je minimální hranice. Zkoušení pevnosti lepené spáry GLT výrobků tímto zkušebním zařízením se provádí v souladu s normou ASTM D 905-03 nebo ČSN EN 14080.

4.2.2. Stanovení modulu pružnosti ve smyku podle EN 408+A1

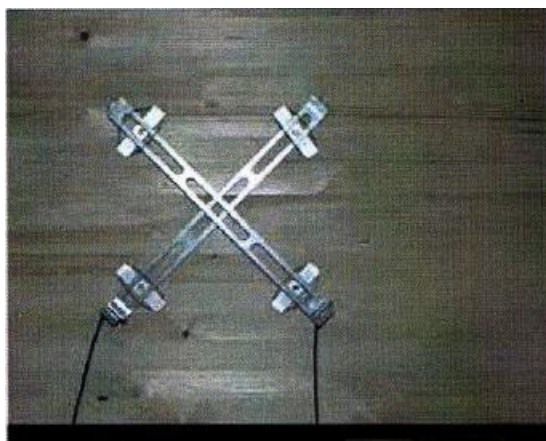
Zkušební metoda smykového pole

Stanovení modulu pružnosti ve smyku se provádí na nosníku zatíženém v 4 bodovém ohybu. Zkušební vzorek musí být zatížen symetricky ohybem ve dvou bodech a musí být prostě podepřen, viz obr. P. 16. Délka vzorku musí být 19x větší než výška h jeho průřezu. Rychlost zatížení v mm/s se vypočte dle vztahu $0,003 \times h$. Maximální zatížení nesmí být větší než $0,4 F_{\max, \text{est}}$ nebo nesmí dojít k poružení vzorku. Předpokládaná hodnota maximálního zatížení $F_{\max, \text{est}}$ se určí na základě 10 zkoušek provedených na vzorcích ze stejného dřeva nebo se určí z již existujících zkušebních hodnot.



Obr. P. 16: Zkušební uspořádání u 4 bodového ohybu nosníku GLT dle EN 408+A1.

Uprostřed oblasti s konstantním smykovým napětím se na obě strany nosníku připevní měřicí zařízení pro zaznamenávání změny délek uhloupívek l'tverce, viz obr. 17. Deformace musí být stanoveny s přesností 1 % a smyková síla nesmí překročit mez úmosti.



Obr. P. 17: Zařazení pro měření deformací na povrchu vzorku v oblasti s konstantním smykovým napětím.

Rovnice pro výpočet modulu pružnosti ve smyku pro nosníky s obdélníkovým průřezem.

$$G_{\text{prům}} = G \frac{w_1(w_2 - w_1)}{w_2(w_2 - w_1)}$$

$$w_i = \frac{V_{s,2}}{G} - \frac{V_{s,1}}{G} \quad w_2 = \frac{(V_{s,2} - V_{s,1})}{G} \quad \text{kde } i = 1, 2$$

w_i - průměrná deformace uhlopříček čtverce i na obou protilehlých stranách nosníku;

$V_{s,2}$ a $V_{s,1}$ - šířky smykového zatížení [N];

b - šířka průřezu nosníku;

a - výška průřezu nosníku;

V minulosti již byly provedeny měření smykových deformací v oblasti s konstantními působícími silami v důsledku smykového zatížení ve studiích [18, 19].

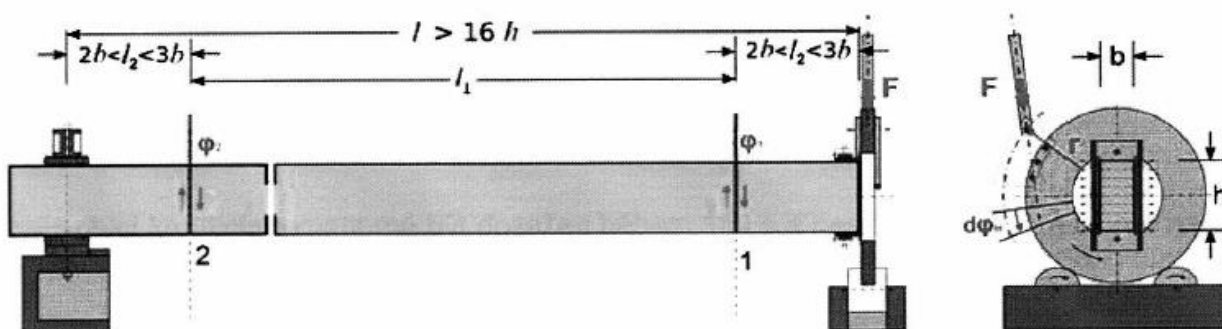
Ve studii [20] byly publikovány experimentální výsledky získané z normových zkoušek a měření smykových deformací, včetně smykových polí na lepených lamelových nosnících. Zde byly zkoušeny lepené nosníky pevnostní třídy GL24 v souladu s normou EN 14080 o průřezu 150 x 320 mm. Průměrná objemová hmotnost nosníku byla 436 kg/m³, obsah vlhkosti 12 % a průměrný modul pružnosti ve smyku byl G_{090} 694 N/mm². Ovšem tato hodnota smykového modulu pružnosti je poměrně vysoká. Toto by se dalo vysvětlit možným vznikem tzv. **Ablukovacího účinku**, ke kterému dochází v důsledku fixace měřicího zařízení, jež je přitlačováno pružinou na vodícím šroubu k povrchu vzorku. V další části této studie byly dále zkoušeny lepené nosníky pevnostních tříd GL36h a GL36c a byly zde použity rozdílné způsoby uchycení měřicího zařízení pro dosažení přesnějších výsledků, např. byly použity gumíčky. Hodnoty modulu pružnosti ve smyku se pohybovaly v rozmezí 650-660 N/mm², průměrná objemová hmotnost byla 492 kg/m³ a obsah vlhkosti 12 %. Tento způsob provedení zkoušek vedl ke spolehlivým, opakovatelným a stabilním výsledkům.

Následující studie se zabývala celkovými pevnostními charakteristikami GLT prvků v souladu s EN 408+A1. Lepený lamelový nosník o rozměrech 2850 x 150 x 80 mm,

s objemovou hmotností 441 kg/m^3 , pevnostní třídy C24+ dle EN 338, byl zatěžován l'ťsbodovým ohybem. Požadavky odpovídající třídě C24 dle EN 338 byly splněny pro E-modul a objemovou hmotnost, ale charakteristická pevnost v ohybu byla o něco málo nižší. V další části této práce byla stanovena odolnost vůči smykovému namáhání. Zkušební postup byl proveden dle EN 408+A1 (kondicionování, obsah vlhkosti, rychlost zatěžování), ale lepený nosník byl zatěžován v l'ťsbodovém ohybu. Zkušební program zahrnoval sedm zkoušek analyzujících odolnost ve smyku na nosnících I průřezu, jež byly z Norského smrku a všechny byly pevností třídy C24. Nejprve byl vyšetřován vliv průřezu na celkovou únosnost nosníku. Pouze 101 z 221 testovaných vzorků bylo porušeno v důsledku smykového napětí. Výsledky ukázaly, že s rostoucí plochou průřezu klesá smyková odolnost, ale modul pružnosti v tahu je srovnatelný ve všech případech [21].

Torzní metoda

Vzorek musí být obdélníkového průřezu a jeho délka musí být minimálně 19 x větší než jeho výška. Vzorek je upevněn do svorek na obou jeho koncích a je vystaven kroucení kolem jeho podélné osy. Přřihyb způsobený vlastní vahou nosníku musí být minimální. Konce nosníku nesmí vykazovat žádné deformace v místech, kde jsou upnuty do svorek, aby nedošlo k ovlivnění výsledných měření. Krouticí moment je vyvolán otáčením jedné nebo obou svorek.



Obr. P. 18: Zkušební vzorek a jeho uspořádání, vlevo požadavky na umístění mědel.

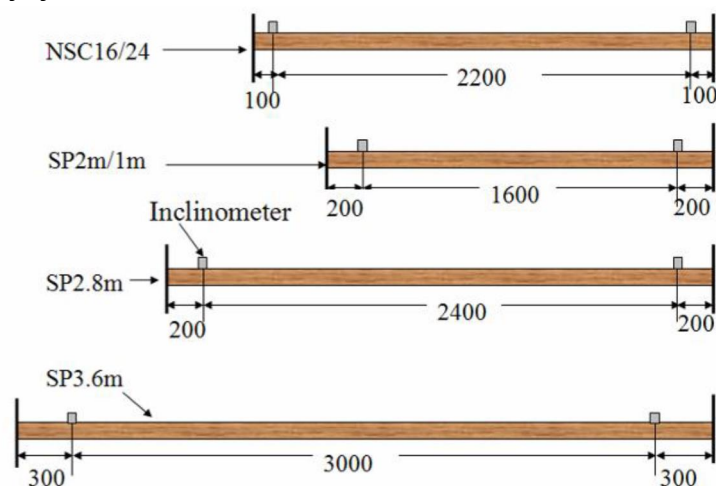
V průběhu této zkoušky je také možné stanovení relativního pootočení dvou sekcí vzorku, a to v průřezích 1a 2, jak je možné vidět na obrázku P. 18. Vzdálenost těchto dvou sekcí je označována jako volná zkušební délka l_1 . Vzdálenost l_2 musí být větší než dvojnásobek výšky průřezu a zároveň menší než trojnásobek této výšky.

Brandner a spol. použili ve své studii tuto zkušební metodu. Volná zkušební délka byla 5760 mm a jednotlivá mědla byla umístěna na nosníku ve vzdálenosti 1600 mm, 2950 mm a 5000 mm. Celkem bylo použito 6 mědel, vždy na protilehlých stranách nosníku, jimiž bylo měřeno pootočení. V tabulce P. 9 jsou zobrazeny výsledky těchto měření, kdy každý nosník byl zatěžován krouticím momentem dvakrát. Nejprve bylo pootočení měřeno ve vzdálenostech 1600 mm a 2950 mm, následně opak ve vzdálenostech 2950 mm a 5000 mm. G_{tor} se lehce zvyšoval s klesající vzdáleností od pevné svorky [19].

Tabulka 9: Výsledky měření nosníku GL24h vystaveného torzní metoda [19].

	$G_{tor,1600}$	$G_{tor,2950}$	$G_{tor,5000}$
Průměrná hodnota [MPa]	606	616	627
COV [%]	4,3	4,2	3,4

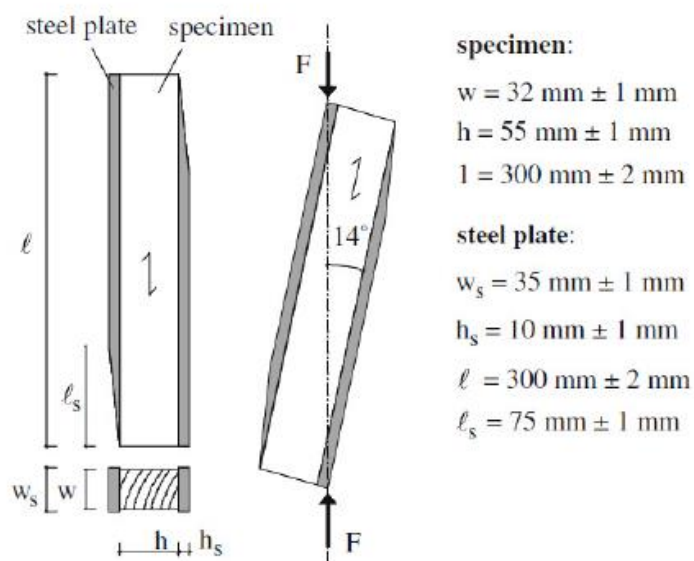
Použitelnost této zkušební metody pro stanovení smykových vlastností, byla vyšetřována v práci Khokar a spol. V této studii byly testovány nosníky ze Sitka smrku, pevnostní třídy C16 a nosníky z Norského smrku, pevnostních tříd C16 a C24 o průřezu 45 x 100 mm. Nosníky ze Sitka smrku byly vyřezány v různých délkách, a to 1 m, 2 m, 2,8 m a 3,8 m. Vzorky z Norského smrku byly o délce 2,4 m. Všechny zkušební tělesa byly kondicionovány v klimatizační komoře (teplota 21°C a relativní vlhkost 65 %), dokud nebylo dosaženo jejich konstantní hmotnosti s příbližným obsahem vlhkosti 12 %. Pozice měřidel pro měření pootožení, které byly umístěny na jednotlivé nosníky, je zobrazena na obrázku P. 19 [22].

**Obr. P. 19:** Umístění měřidel a délky použitých zkušebních vzorků [22].

Pro měření pootožení nosníku a následný výpočet modulu pružnosti ve smyku, byl jeden sklonoměr umístěn na otáčející se konec nosníku a druhý byl upevněn na svorku. Smyková odolnost byla stanovena na základě kroucení. Všechny vzorky byly zatčovány kroucením o rychlosti 4°/min až do jejich poružení. U smrku Sitka, pevnostní třídy C16, bylo dosaženo průměrné smykové pevnosti 7,2 MPa a modulu pružnosti ve smyku 520 MPa. V případě Norského smrku pevnostní třídy C16, byla stanovena průměrná hodnota smykové pevnosti 8,5 MPa a modulu pružnosti ve smyku 610 MPa. Vzorky pevnostní třídy C24 z Norského smrku vykazovaly průměrné hodnoty vyšší, a to 9,3 MPa u smykové pevnosti a 760 MPa u modulu pružnosti ve smyku, což koresponduje s předpokladem, že vzorky vyšších pevnostních tříd, by měly vykazovat i vyšší hodnoty odolnosti vůči torznímu namáhání. Charakteristická hodnota smykové pevnosti, uvedená v EN 338 pro třídu C16 je 1,8 MPa a pro třídu C24 je 2,5 MPa. Tyto hodnoty však byly stanoveny na základě odolnosti vůči ohybu nosníků, které byly zkoušeny ve lůžkovém ohybu dle EN 408+A1 a proto se autoš tohoto experimentu shodují, že torzní metoda je vhodná pro stanovení smykových vlastností dřevěných materiálů [22].

Stanovení pevnosti ve smyku rovnoběžných vláken

Jedná se o další metodu používanou pro stanovení smykové pevnosti, kdy je vzorek umístěn vlepen mezi dva ocelové pláty pohybující se v opačném směru, viz obr. P. 20.



Obr. P. 20: Rozměry a způsob zatížení zkušební vzorku pro stanovení smykové pevnosti f_v rovnoběžných vláken.

Rovnice pro výpočet smykové pevnosti:

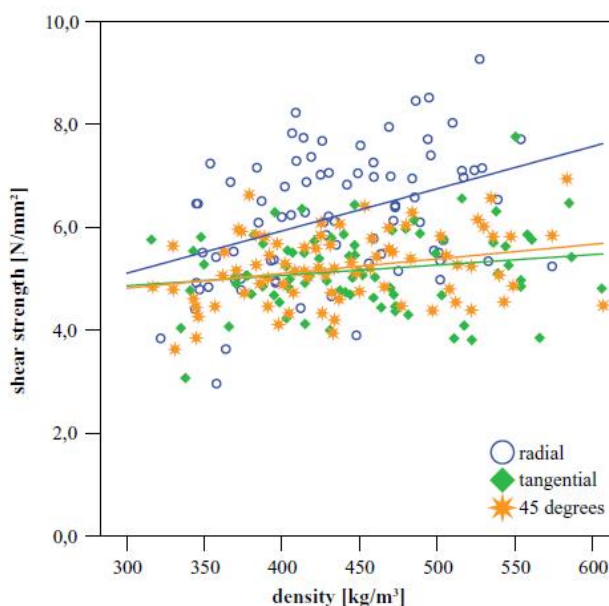
$$f_v = \frac{F_{\max} \cos 14^\circ}{lw_s}$$

Pro přilepení zkušebního tělesa k ocelovým plátům se nejčastěji používá dvousložkový epoxid. Všechny povrchy musí velmi precizně upraveny, aby byla zajištěna co nejvyšší přesnost měření. Úhel mezi podélnou osou vzorku a směrem zatížení musí být 14° a rychlost zatížení taková, aby k dosažení $F_{\max}$ došlo po uplynutí 300 ± 120 s od začátku zkoušky. Je zde také možnost, že se porušení rozšíří i do lepeného spoje mezi ocelovými pláty a vzorkem. Zkouška je považována za platnou v případě že je tato plocha menší 20 % z celkové plochy porušení.

Denzler a Glos (2007) použili tento postup stanovení smykové pevnosti ve svém experimentu, kde použili smrkové dřevo. Vzorky byly vyřezány z konstrukčního dřeva ve směru vláken. Tento experiment byl zaměřen především na hodnocení vlivu letokruhů a objemové hmotnosti. Vzorek byl orientován ve zkušebním zařízení tak, že smyková rovina byla radiální a trhliny se šířily ve směru kolmo k letokruhům. V případě že se trhliny šířily paralelně směrem letokruhů, byla orientace vzorku označena jako tangenciální. Vzorky byly přilepeny k ocelovým plátům dvousložkovým epoxidovým lepidlem pod tlakem 150 N/mm^2 3 dny předtím, než byly zkoušky provedeny.

Vliv orientace letokruhů na smykovou pevnost nebyl zcela patrný. Průměrný obsah vlhkosti byl 10,7 %. U vzorků radiálně orientovaných byla stanovena průměrná pevnost 6,2 MPa, u vzorků orientovaných tangenciálně byla 5,2 MPa a v případě vzorků orientovaných pod úhlem 45° byla také 5,2 MPa. Vyšší pevnost, v případě radiálně orientace vzorků, byla odvozena potřebou větší energie pro rozdělení části měkkého dřeva, kolmého k vláknům

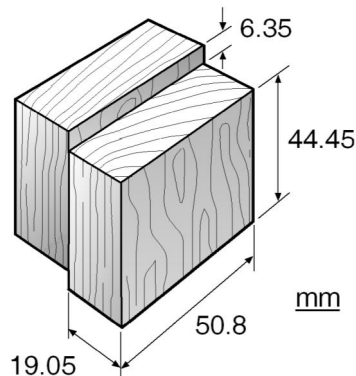
v oblasti mezi jarním a letním dševem, než k rozdělení mčkkého dševa orientovaného rovnobčhns vlákný. Na *obrázku P. 21* je graficky znázornčho srovnání jednotlivých zkušebních konfigurací a vlivu objemové hmotnosti na smykovou pevnost [23].



Obr. P. 21: Grafické znázornčhí výsledné smykové pevnosti v závislosti na objemové hmotnosti a orientaci zkušebních vzorkčh [23].

4.2.3. Stanovení smykové pevnosti lepených spojčh dle ATSM D905-08

Jedná se o americkou normovou zkušební metodu pro stanovení smykové pevnosti lepených spojčh, které jsou vystaveny tlakovému zatčhnutí. Tato norma také obsahuje stanovení a porovnání pevností lepidel, poučhívaných pro lepení dševčhých, ale i jiných, podobných materiálčh. Tato metoda je pšedevčhm poučhívána pro hodnocení lepidel na dševčhé materiály, je včgak také hojnčh vyučhívána pro výzkum a vývoj lepených lamelových výrobkčh ze dševa. Na rozdíl od normy EN 302-1, zavádí tato normy smykové pevnosti v tlaku. Pevnost se stanovuje na vzorcích s lepenou plochou o velikosti 1900 mm² [32].



Obr. P. 22: Zkušební vzorek dle ASTM D905-08 [32].

5. Cíl práce

V poslední době dochází k nárůstu použití nových konstrukčních prvků, jež mají přímý lepený, např. podélně lepené lamelové dřevo (GLT – glued laminated timber), příčně lepené lamelové dřevo (CLT – cross laminated timber), apod. U těchto nových prvků s ohledem na technologii výroby z různých dílčích lamel není diagnostikován vliv makro- či mikroskopické struktury dřeva na výsledné parametry.

Nejprve byla provedena rozsáhlá revidace stávajících studií pro volbu vhodné zkušební metody, které se zabývaly obdobnou problematikou. Na základě výsledků této revidace bylo rozhodnuto o vystavení zkušebních těles namáhání těsnodílnému ohybu.

S ohledem na výše uvedené bylo naším cílem hodnocení smykových vlastností u dřevěných materiálů používaných ve stavebním průmyslu, konkrétně CLT výrobků. V první fázi experimentu bylo provedeno několik výpočetních modelů pomocí metody konečných prvků. Na základě těchto zjištění pak bylo pokračováno k samotnému zkoušení zkušebních těles v laboratoři.

Mezi markantní znaky, které byly především v průběhu experimentu vyšetřovány, patří vliv tloušťky letokruhů a úhel letokruhů, případný výskyt defektů, způsob šíření trhlin charakteristickými materiálovými rovinami. Tyto makroskopické vlastnosti mohou mít výrazný vliv na pevnost výsledných produktů. Těmito vlastnostmi jsme se zabývali také z důvodu, že při výrobě CLT prvků neprobíhá po zatlačení lamel do příslušných pevnostních tříd další vizuální třídění, které by zohledňovalo tyto makroskopické prvky.

V laboratoři pak bylo následně provedeno několik sérií zkoušek v těsnodílném ohybu v souladu s EN 408+A1, protože odolnost vůči smykovému namáhání je velmi důležitou vlastností konstrukčních materiálů a je tedy nutné ji specifikovat v co nejhlubším detailu. Distribuce napětí, iniciace a rozvoj trhlin byly sledovány pomocí metody DIC.

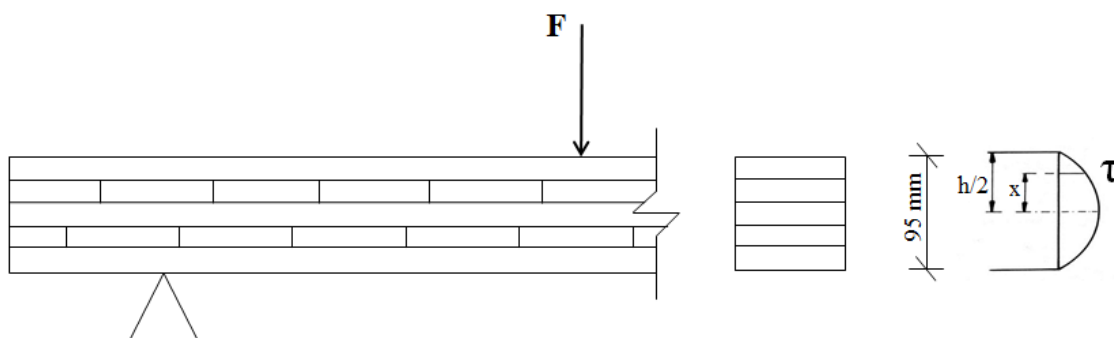
6. Experiment

6.1. Metodika práce

6.1.1. Smykové napětí

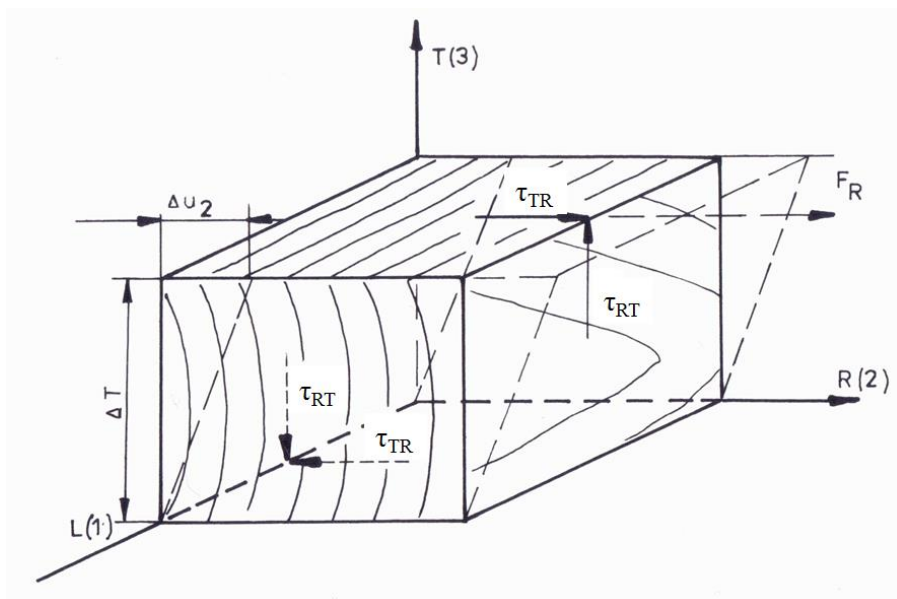
V praxi se listý ohyb vyskytuje jen výjimečně při zatížení nosníku ohybem v něm vznikají dva druhy smykových napětí. Jedny v důsledku působících posouvajících sil, které se snaží posunout jednu část nosníku proti té druhé a tím ve svislém v průřezu vyvolávají smyková napětí. Druhá smyková napětí vznikají v důsledku působícího ohybového momentu a ta se snaží posunout jednotlivé vrstvy nosníku po sobě ve směru podpor. Vztah mezi těmito podélnými napětími je dán zákonem sdružených smykových napětí. Proto je nutné při dimenzování nosníků se podrobně zabývat i účinky těchto smykových napětí [1].

V našem případě jsme se zabývali účinky smykového napětí na příčné lamely CLT nosníku, které byly zatíženy smykovým napětím vyvolané třbodovým ohybem. Rozdělení smykového napětí po výšce průřezu nosníku je vidět na obrázku P. 23.



Obr. 23: Rozdělení smykového napětí po výšce h .

V oblasti účinku největšího smykového napětí se v případě zkoušených nosníků nacházela podélná lamela. Jak bylo již v předchozích studiích prokázáno, smyková pevnost dřeva jehličnanů podél vláken je zhruba 3× vyšší, než napříč vláken. Proto k porušení CLT nosníků v důsledku smykového namáhání docházelo v příčných lamelách. Pro rozlišení smykových namáhání jednotlivých příčných lamel, s ohledem na rozdílný směr letokruhů lamel, byly v rámci experimentu jednotlivé smykové složky značeny dle obrázku P. 24.



Obr. 24: Deformace pŕŕnŕch lamel vlivem smykové síly pŕŕsobící v rovinŕRT/TR ve smŕŕu podpor [1].

6.1.2. Digital Image Correlation Systŕm (DIC) Q-400, fy. DANTEC

V pŕŕbŕhu zkouŕení vzorkŕ v laboratoŕi byl pouŕit DIC systŕm. Jedná se o optické mŕŕŕcí zaŕŕzení pro celoploŕné, bezkontaktní a tŕŕ dimenzionální sledování tvaru, posunutí a vzniku trhlin u vzorkŕ s rŕŕznŕmi povrchy.

Q-400 systŕm se pouŕívá pro stanovení vlastností materiálŕ v 3D pŕŕ vystavení vzorkŕ namáhání tahovŕmu, torznímu, ohybu nebo kombinovanŕm ŕlŕnkŕm zatŕŕení. Navíc analýzy deformací a trhlin mŕŕŕou být pouŕity k vyhodnocení ŕnavových zkouŕek, lomové mechanice, metodŕkonelŕných prvkŕ, apod. Tento systŕm vyhodnocuje data v reálnŕm lŕase. Pro tento mŕŕŕcí systŕm byly také vyvinuty ŕŕrokové aplikace a tak se stalo DIC velmi flexibilní a ŕŕŕitelŕnou pomŕŕckou k analýzám deformací. Dynamické rozpŕŕí je velmi ŕŕrokové se schopností mŕŕŕŕ trhliny velkých rozmŕŕŕ. Rozlŕŕení se odvíjí od velikosti snímanŕ plochy a je proto ŕŕkalovatelnŕ. Vŕŕechny výŕe zmínŕné informace jsou dŕŕvodem, proŕ je v dneŕní dobŕ toto zaŕŕzení tak hojnŕ pouŕíváno pŕŕ zkouŕení vŕŕech moŕŕných materiálŕ.

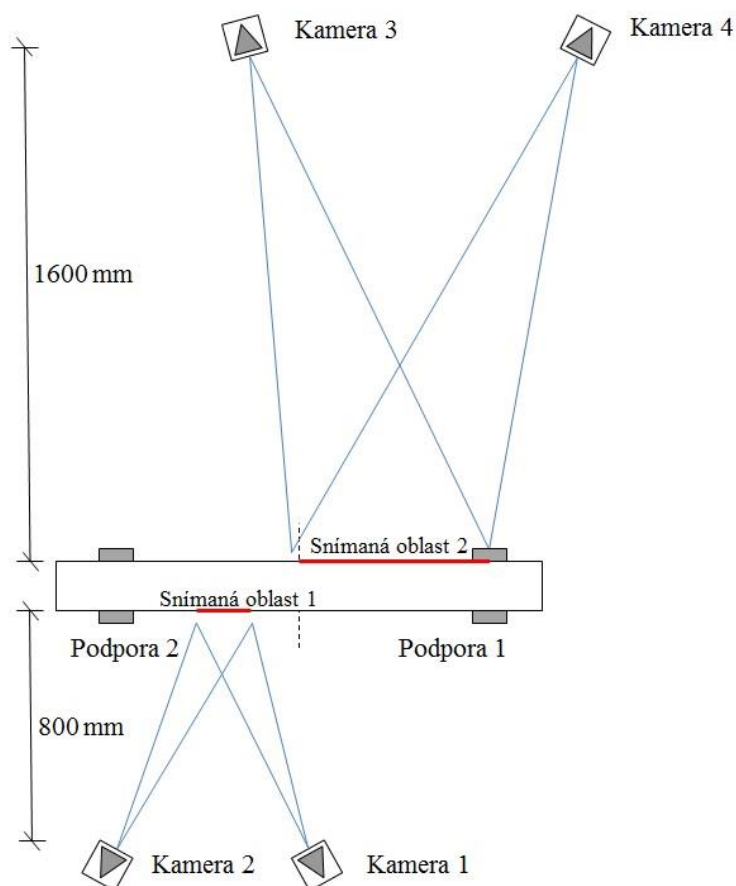
Systŕm je zaloŕen na snímání stupnŕŕŕedŕ barvy na zaznamenanŕch fotografiích a mŕŕŕe tak ŕrlŕit obrysy a posunutí jednotlivŕch objektŕ vystavenŕch zatŕŕení ve 3D. Principem tohoto systŕmu je nastavení stereoskopických sensorŕ, kdy je na povrchu vzorkŕ snímán kaŕdŕ bod. Pozornost je zamŕŕena na jednotlivé pixely obrázku povrchu. Znalost zobrazovacího parametru pro kaŕdŕ sensor, orientace jednotlivŕch sensorŕ a jejich polohy s ohledem na vŕŕechny ostatní, umoŕŕŕuje vypoŕet pŕŕesné pozice jednotlivŕch bodŕ povrchu v 3D. Proces DIC ŕrlŕuje posun a/nebo rotaci malŕch ploŕek prvkŕ stanovenŕch v referenŕním snímku. Pozice kaŕdŕho jednotlivŕho bodu na povrchu vzorku na dvou obrázcích mŕŕŕe být identifikována pouŕitím srovnávacího algoritmu pomocí stochastické intenzity vzoru na povrchu objektu. Srovnávací algoritmus je zaloŕen na sledování stupnŕŕedŕ barvy sousedních malŕch ploŕek. Tato procedura umoŕŕňuje stanovení deformací objektu v rovinŕ rovnobŕŕné s rovinou kamery. Následuje umístŕní kamer kolem zkuŕebního zaŕŕzení a jŕŕ zmínŕný výbŕ vhodných ŕolŕek a jejich

zaostření na povrch vzorků. K zajištění dostatečné ostrosti je potřeba vzorky osvětlit. Na začátku každé zkouební série je potřeba provést kalibraci kamer. Ta se jednoduše provede umístěním kalibračního plátu současně oběma kamerami v různých polohách. Je však důležité si zkontrolovat přesnost kalibrace zobrazenou na monitoru ještě ihned po kalibraci. V případě, že hodnoty kalibrace není vyhovující pro dané podmínky, je potřeba tento postup opakovat. Tyto chyby nelze redukovat později. Kalibrační plát má šachovnicový povrch a přesně známou velikost. Jejich použití se opět odvíjí od vzdálenosti vyšetřovaných povrchů vzorků od kamer a použitých lóček. V průběhu kalibrace je kalibrační plát osvětlen červeným světlem. Obvykle se tento systém používá pouze se dvěma kamerami, je však možné použít i větší kamery a snímat tak dvě vyšetřovaná místa, což umožňuje získání mnohem většího množství dat. Interval pošizování obrázků lze nastavit individuálně s ohledem na rychlost zatčování a množství pořadovaných snímků. Série fotografií jsou pořizovány v průběhu zatčování vzorku. DIC systém byl použit v experimentech zabývajících se zkoušením dřevěných vzorků mnohokrát, viz [24, 25, 26, 27].

Věškeré experimentální práce probíhaly v laboratořích Technické Univerzity ve Vídni, včetně přípravy vzorků, zpracování a vyhodnocení výsledků.

6.1.3. Specifikace použité sestavy:

Následovala instalace kamer a výběr objektivů (lóček) s vhodnou ohniskovou vzdáleností. V našem případě byly použity 4 ks kamer pro snímání obou stran povrchů vzorků za účelem přesnějšího stanovení smykových vlastností. U kamer, jež snímaly povrch těes ze vzdálenosti 800 mm, byly použity objektivy s ohniskovou vzdáleností 50 mm a snímaly plochu cca 130x130 mm. Takto byla zaznamenána každá příčná lamela v 1. sérii zkoušek od kraje až po střed vzorku. U kamer použitých pro vzdálenost 1600 mm byly použity objektivy s ohniskovou vzdáleností 100 mm a ty snímaly polovinu vzorku od podpory až po zatčovací hlavici. Jednotlivé parametry kamer byly posléze nastaveny a pro každou dvojici byl vytvořen kalibrační soubor pomocí kalibračního terče. Způsob snímání je graficky doložen na obrázku P. 25.



Obr. P. 25.: Rozmístění kamer v průběhu zatívacích zkoušek.

Během staří získat 8 obrázků pro dosažení všech dostatečně přesných kalibračních parametrů, ale v našem případě bylo provedeno 14 až 15 obrázků před každou zkouební sérií. Chyby vzniklé při kalibraci jsou hlavním důvodem systematických chyb při vyhodnocování.

6.2. Zkouební těleso CLT nosník

Zkouební vzorky o velikosti 1080 x 95 x 100 mm byly vyřezány z pěti-lamelových panelů CLT 95 BVI C5S WW C24, které byly ze smrkového dřeva pevnostní třídy C24 o rozměrech 2000 x 2000 x 95 mm. Pro zkoušení bylo připraveno 28 ks zkouebních těes.

Byly zkouěny sady CLT nosníků s ohledem na sledování vlivu makroskopických znaků pětlých lamel, konkrétně

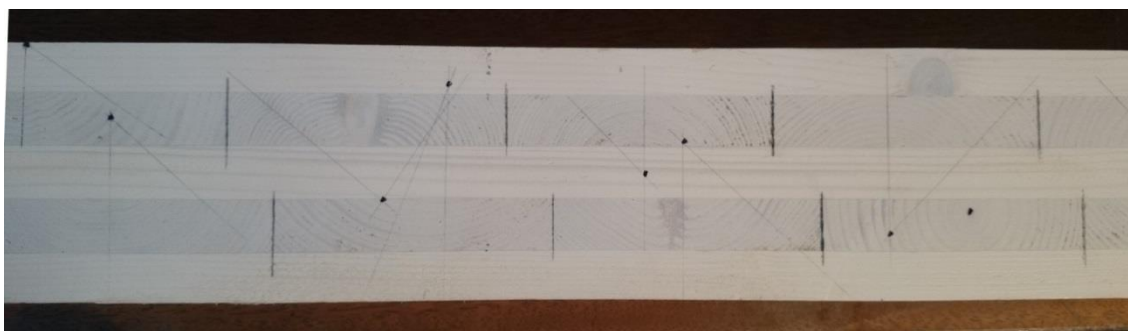
- 16 ks nosníků na určení vlivu orientace letokruhů (pětlé lamely mají stejnou šířkou letokruhu 2-3 mm);
- 12 ks nosníků na určení vlivu šířky letokruhů pětlých lamel (pětlé lamely mají vždy kombinaci úhlu letokruhů 0°-30° a 30° - 60°).

6.2.1. Příprava vzorků s ohledem na snímání DIC

S ohledem na požadavek využití DIC metody byly snímané povrchy zkouebního těesa upraveny. Nejprve byl povrch vzorků opatřen tenkou vrstvou roztaveného vosku, následně byl

proveden podkladní nástřik bílým sprejem. Konečná úprava obnáhela nanesení rozlišovacích značek, což bylo poměrně komplikované. Velikost teček a jejich hustota se odvíjí od vzdálenosti kamer, ve kterých budou umístěny, velikosti snímané plochy a také na typu použitého laků v kamerách. Bylo tedy nutné upravit každou snímanou stranu zkoušebních těles odlišně. Povrch stran vzorků, snímáný z kratší vzdálenosti, byl opatřen značkami, jež byly vytvořeny pomocí černého spreje. Protěží strany vzorků, snímáné z větší vzdálenosti, byly upraveny použitím kombinace černého spreje a molitanové houby s velkými póry, aby bylo možné provést vyhodnocení zaznamenaných dat.

Ve fázi přípravy vzorků, viz obrázek P.26, byla také u všech vzorků zaznamenána přesná poloha jednotlivých příčných lamel, letokruhů i příblížená poloha dřeva což bylo následně použito pro FEM.



Obr. P. 26: Pohled na orientaci lamel a způsob přípravy zkoušebních těles.

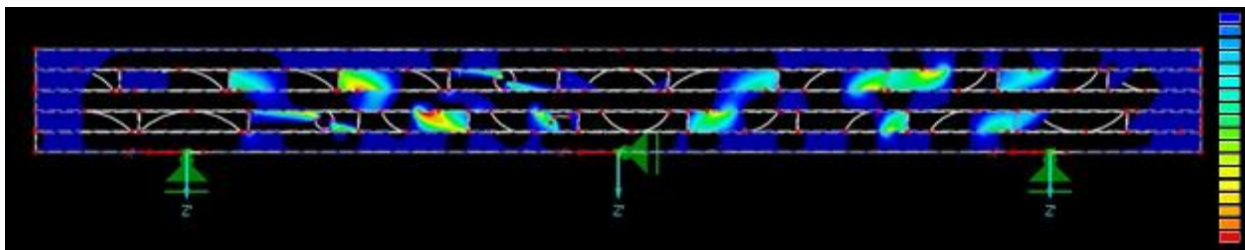
6.3. Experimentální práce

Zkoušební vzorky byly následně umístěny v klimatizační komoře s teplotou 20°C a relativní vlhkostí 65% po dobu jednoho týdne, pro dosažení aklimatizace zkoušebních těles. Obsah vlhkosti vzorků v průběhu zkoušení byl 9,8 %. Samotné zkoušení těles bylo provedeno v souladu s normou EN 408+A1, z níž byla zvolena modifikovaná zkoušební metoda smykového pole při tečném ohybu. Způsob zatížení a jeho rychlost byly propočítány v programu Dlubal RFEM. Pro zaznamenání deformací a distribuce napětí však nebyly použity měřicí terče, ale bezkontaktní měřicí systém DIC.

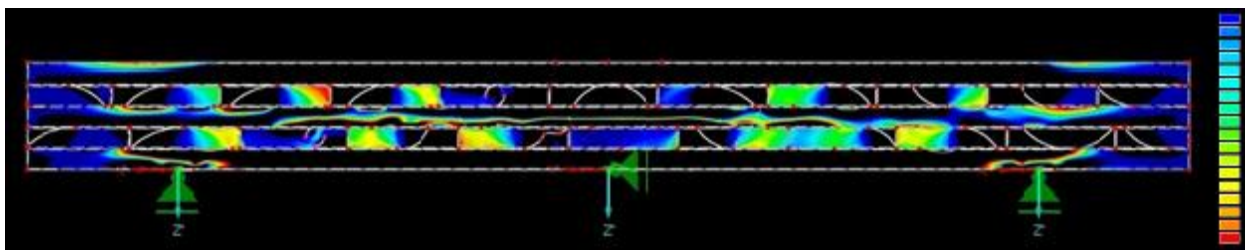
6.3.1. Zatížení zkoušebních těles

Elastické zatížení

První etapa testů byla provedena za účelem porovnání modelů vytvořených pomocí softwaru DLUBAL RFEM s naměřenými hodnotami v laboratoři a zároveň byla zobrazena předpokládaná distribuce smykového napětí vzorkem. V první části této etapy bylo vytvořeno několik zatíhovacích modelů v programu FEM, kde byly pozorovány účinky smykového napětí na jednotlivé příčné lamely. Na obrázcích 27 a 28 jsou graficky zobrazeny lokální extrémní smykových napětí příslušících na příčné lamely, vypočtené pomocí FEM. K jejich vzniku docházelo vždy v kritických místech s ohledem na distribuci smykového napětí nosníkem. Modely jsou zobrazena místa, kde bylo smykové napětí příslušících v příčných lamelách minimální, červeně jsou pak zobrazeny oblasti, kde smykové napětí dosahovalo maximálních hodnot a dala se tak v těchto oblastech předpokládat iniciace trhlin.



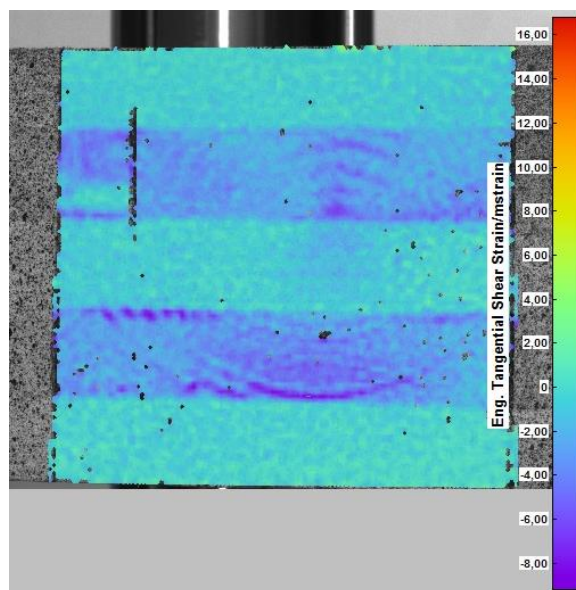
Obr. P. 27: Zobrazení úřinků smykového napětí, které působí v radiálním směru na letokruhy příčných lamel.



Obr. P. 28: Zobrazení úřinků smykového napětí, které působí v tangenciálním směru na letokruhy příčných lamel.

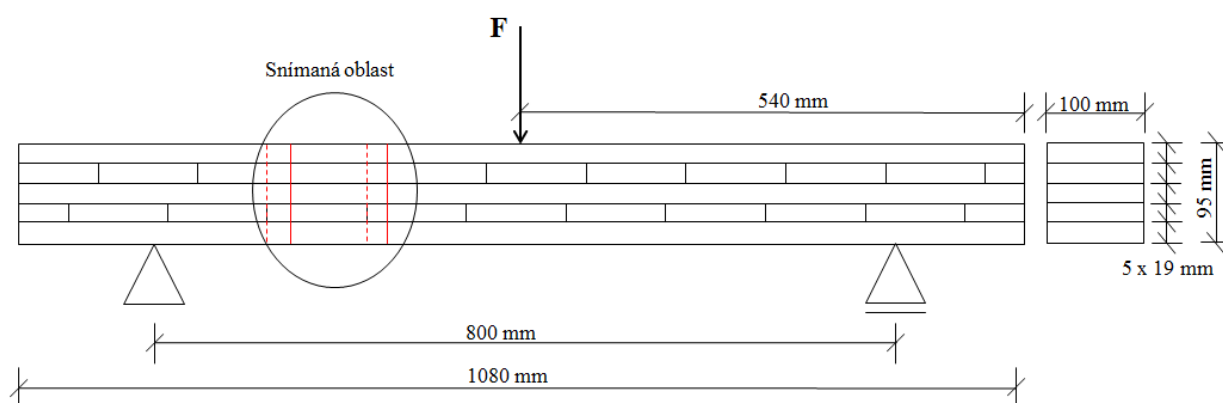
Po vytvoření výpočetních modelů a posouzení vhodnosti zvolené zkušební metody, následovala série zkoušek v laboratoři na zkušebním zařízení. V elastické oblasti deformace byly vzorky zatčovány až do síly 12 kN rychlostí 1 kN/min, následně došlo k jejich odlehčení. Interval pořizování snímků pomocí DIC byly 4 vteřiny. Naše pozornost byla zaměřena na sledování elastických deformací příčných lamel. Nosník byl rozdělen na jednotlivé úseky podle příčných lamel, které se nacházely nad sebou. Postupně byly zaznamenány všechny úseky od podpory až po střed vzorku. Tyto poznatky pak byly především použity pro upřesnění kritických oblastí vzorků, kde byl předpokládán úřinek největšího smykového namáhání na příčné lamely CLT nosníků. Snímání kamerami P. 1a 2 následně probíhalo v těchto kritických místech.

Na obrázku P. 29 můžeme vidět zobrazení distribuce smykového napětí programem Istra4D a jeho deformální úřinky na jednotlivou příčnou lamelu vzorku, který byl zatčován v elastické oblasti. Místa, kde docházelo k větším deformacím, jsou tmavě modrá. Místa, u kterých k deformacím nedocházelo, jsou zobrazena světle modrou až azurovou barvou.



Obr. P. 29: Distribuce smykového napětí a deformace při zatížení v elastické oblasti u vzorku P. 3, pole 3., pohled kamer 3 a 4.

Po vyhodnocení výsledků těchto testů a porovnání s výslednými modely z FEM bylo rozhodnuto, **které pole bude přednostně snímáno na první straně vzorku v druhé etapě zkoušek**, kdy byl vzorek zatížen až do jeho porušení. Vybrána byla oblast vzorku, která s ohledem na způsob zatížení, byla vystavena nejvyššímu smykovému namáhání a dala se tak v těchto oblastech předpokládat iniciace smykového porušení. Jednalo se vždy o oblast čtvrtých příčných lamel. Tyto kritické oblasti se nacházely vždy v rozmezí od 300 do 420 mm od okraje vzorku na obou stranách, viz obrázek P. 30. Všechny testy v laboratoři probíhaly v třbodovém ohybu s osovou vzdáleností podpor 800 mm.



Obr. P. 30: Schéma třbodového ohybu a znázornění sledované oblasti.

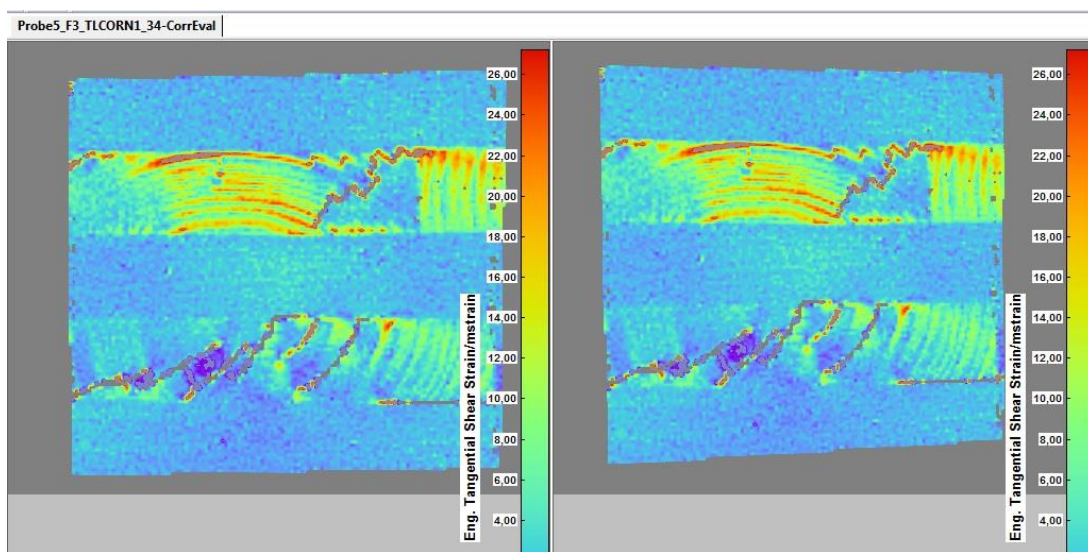
Zatížení do porušení zkušebního tělesa

V této etapě byly vzorky zatíženy rychlostí 1,5 kN/min do síly 12 kN, následně odlehčeny až na 1 kN, znovu zatíženy do síly 16 kN a opět odlehčeny na 1 kN a nakonec byly zatíženy až do jejich porušení. Pozornost byla věnována iniciaci první trhliny a pevnosti, při které k porušení došlo.

6.4. Výsledky zkoušek a diskuze

6.4.1. Komparace FEM a reálného smykového namáhání

Porovnání výpočetních modelů s výsledky získanými experimentálně na dřevěných nosnících potvrdilo správnost výpočetních modelů. U testů provedených na zkušebním zařízení a současně monitorovaných DIC systémem, však lze pozorovat mnohem podrobnější vykreslení průběhu napětí kolem letokruhů mezi jarním a letním dřevem. Toto je způsobeno tím, že ve výpočetním programu lze nastavit pouze charakteristické hodnoty daného materiálu, které jsou v jasně definované oblasti konstantní. Naopak DIC systém zaznamenává povrch vzorku po jednotlivých pixelech a je tedy schopen distribuci napětí popsat mnohem detailněji, jak můžeme vidět na obrázku P. 31.



Obr. P. 31: Zobrazení distribuce napětí a trhlín zkušební vzorku P. 5 po vyhodnocení a zpracování výsledků v programu Istra 4D.

6.4.2. Zjišťování vlivu makroskopických znaků přírodních lamel na smykové namáhání

Vliv úhlu letokruhů na smykovou pevnost a způsob poružení přírodních lamel

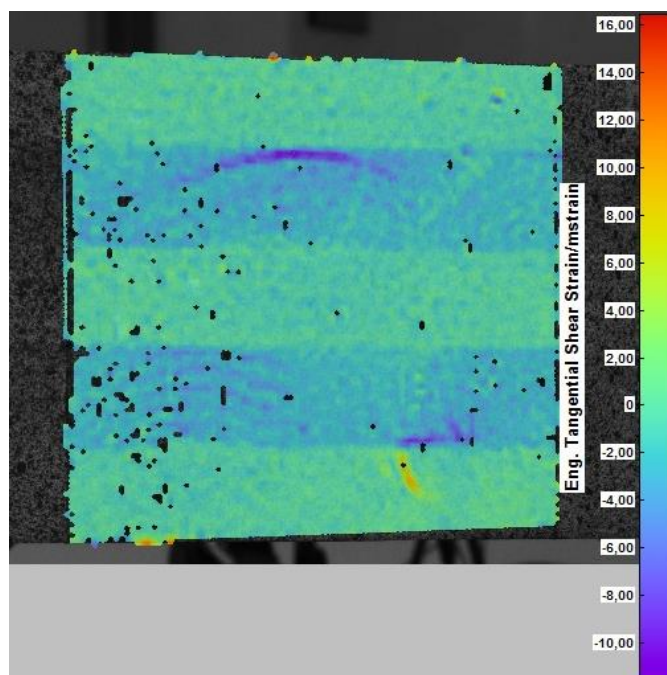
Pro tuto sérii zkoušek byl proveden velmi podrobný výběr zkušebních těles, aby bylo možné zajistit porovnání zkoumaných vlastností. V tabulce P. 10 jsou zobrazeny všechny naměřené hodnoty. Byl zde zjišťován vliv úhlu letokruhů na smykovou pevnost přírodních lamel. Byly vybrány tři sady vzorků s odlišnou kombinací úhlu sklonu letokruhů v přírodních lamelách, každá sada obsahovala tři zkušební vzorky. Jednalo se o rozdílné umístění těchto přírodních lamel ve sledovaném kritickém průřezu s nejvyšším smykovým namáháním, tj. ve ltvrté lamele. Tloušťka letokruhů se jednotně pohybovala u těchto lamel v rozmezí 2 až 3 mm.

Tabulka 10: Jednotlivé parametry a hodnoty zkušebních těles při zjišťování vlivu úhlu letokruhu na smykovou pevnost.

vzorek	úhel letokruhu θ	iniciace první trhlíny	vzorek poškozen v rovině	průměrná smyková pevnost τ [MPa]		objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	vlhkost [%]
1	0° - 30°	x	LT	6,02	5,92	424	9,1
	0° - 30°		LR				
2	0° - 30°	x	LT/LR	5,94		441	10,8
	0° - 30°		LT				
3	0° - 30°	x	LT	5,91		415	9,6
	0° - 30°		LT/LR				
4	0° - 30°		LR	5,83		425	10,6
	0° - 30°	x	LT/LR				
5	60° - 90°		LT	6,76	6,54	438	9,7
	60° - 90°	x	LT				
6	60° - 90°		LR	6,47		416	8,9
	60° - 90°	x	LT				
7	60° - 90°		LR	6,43		443	10,1
	60° - 90°	x	LT/LR				
8	60° - 90°		LR	6,51		426	9,6
	60° - 90°	x	LR				
9	30° - 60°	x	LT/LR	4,48	4,54	435	9,8
	30° - 60°		LT				
10	30° - 60°	x	LT	4,36		419	9,5
	30° - 60°		LR				
11	30° - 60°	x	LT/LR	4,72		423	10,0
	30° - 60°		LR				
12	30° - 60°	x	LT	4,59		418	9,8
	30° - 60°		LT				
13	30° - 60°	x	LR	5,29	5,33	410	9,6
	0° - 30°		LT				
14	30° - 60°		LT	5,49		425	9,5
	0° - 30°	x	LR				
15	30° - 60°		LT/LR	5,35		421	10,1
	0° - 30°	x	LT				
16	30° - 60°	x	LT	5,19		416	9,9
	0° - 30°		LR				

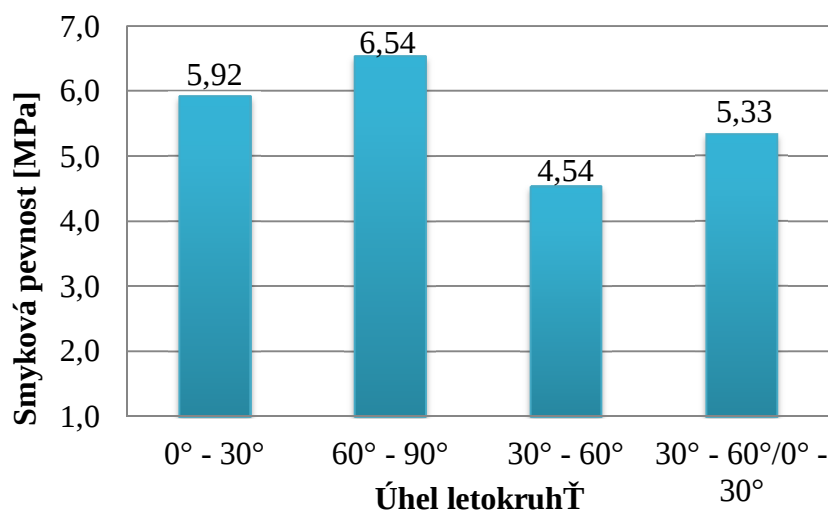
Správný předpoklad vzniku iniciace trhlin v kritické oblasti příčné lamely byl potvrzen systémem DIC v první sérii u vzorku ř. 1 již při zatížení v elastické oblasti deformace, viz

obrázek P. 32. Inicie první trhliny byla očekávána v horní lamely a to v oblasti horního okraje pšlné lamely. Na obrázku také můžeme vidět, že největší deformace byla způsobena v rovině LT, což koresponduje s výsledky uvedenými v tabulce P. 10.



Obr. P. 32: Vzorek P. 1 při zatěžování v elastické oblasti deformace.

V grafu P. 1 je provedeno grafické porovnání smykových pevností 4. pšlné lamely s ohledem na různý úhel letokruhů těchto lamel.



Graf P. 1: Průměrná smyková pevnost Uspných lamel v závislosti na úhlu letokruhů.

Z grafu jasně vyplývá, že nejvyšších smykových pevností dosahovaly vzorky, u kterých byla orientace pšlných lamel v rozmezí 60° - 90°, naopak nejnižší pevnosti vykazovaly vzorky orientované v rozmezí 30° - 60°.

Vliv šířky letokruhu na smykovou pevnost a způsob poružení pšlých lamel

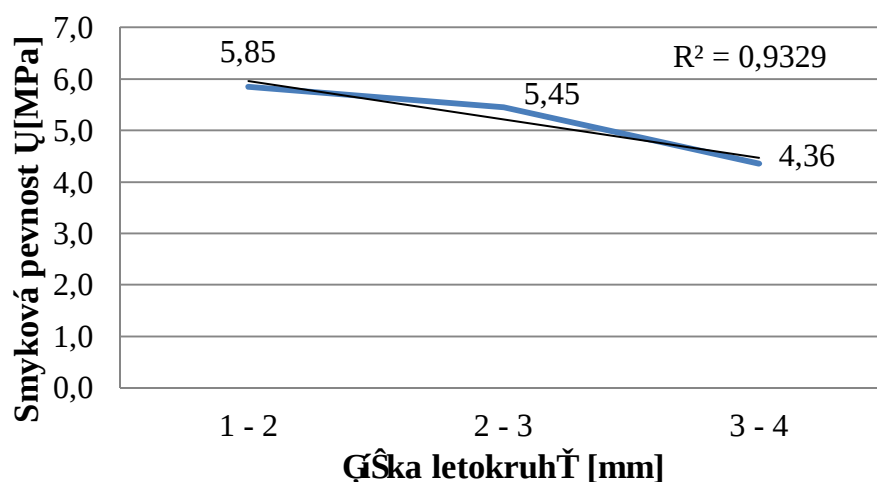
Zde byl také proveden velmi podrobný výběr zkušebních těes, aby bylo možné zajistit porovnání zkoumaných vlastností. V tabulce P. 11 jsou zobrazeny všechny naměřené hodnoty. V této části experimentu byl zjišťován vliv tloušťky letokruhu na smykovou pevnost pšlých lamel. Pro tyto testy byly vybrány 3 sady vzorků vždy po čtyřech kusech. Byly vybírány zkušební těesa s jednotným úhlem letokruhu v pšlné lamelě kritické oblasti (4. pšlná lamela), tj. úhel letokruhu jedné lamely 0° - 30° (tangenciální řez) a druhé lamely 30° - 60°. Šířka letokruhu se pohybovala v rozmezí 1-2 mm, 2-3 mm a 3-4 mm.

Tabulka 11: Jednotlivé parametry a hodnoty zkušebních těes při zjišťování vlivu šířky letokruhu na smykovou pevnost.

vzorek	úhel letokruhu	šířka letokruhu [mm]	iniciace první trhliny	poškození v rovině	průměrná smyková pevnost $\bar{\sigma}$ [MPa]	objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	vlhkost [%]
17	30° - 60°	2 - 3	x	LR	5,45	424	9,1
	0° - 30°	1 - 2		LT			
18	30° - 60°	2 - 3	x	LT	5,56	441	8,9
	0° - 30°	2 - 3		LT			
19	30° - 60°	3 - 4	x	LT/LR	4,28	415	9,6
	0° - 30°	1 - 2		LT/LR			
20	0° - 30°	3 - 4	x	LT/LR	4,22	438	9,7
	30° - 60°	1 - 2		LR			
21	0° - 30°	2 - 3		LR	5,87	443	10,1
	30° - 60°	1 - 2	x	LT			
22	0° - 30°	1 - 2		LT/LR	5,32	426	9,6
	30° - 60°	2 - 3	x	LR			
23	0° - 30°	3 - 4	x	LT	4,33	435	9,8
	30° - 60°	2 - 3		LR			
24	30° - 60°	3 - 4	x	LR	4,15	419	9,5
	0° - 30°	1 - 2		LT			
25	0° - 30°	2 - 3		LT/LR	4,82	439	10,1
	30° - 60°	3 - 4	x	LT			
26	0° - 30°	1 - 2		LT	5,51	422	9,7
	30° - 60°	2 - 3	x	LR			
27	30° - 60°	1 - 2	x	LT	5,83	417	9,6
	0° - 30°	1 - 2		LT			
28	30° - 60°	2 - 3		LT/LR	5,42	412	9,4
	0° - 30°	1 - 2	x	LT			

Z výsledků těchto zkoušek vyplývá, že s rostoucí šířkou letokruhu roste četnost poružení a především dochází k poklesu smykové pevnosti pšlých lamel. To je způsobeno přítomností silnější vrstvy jarního dřeva, které u jehličnanů vykazuje nižší hodnoty smykových pevností než

dřevo letní. V grafu P. 2 můžeme pozorovat vývoj smykové pevnosti s ohledem na šířku letokruhů příčných lamel.

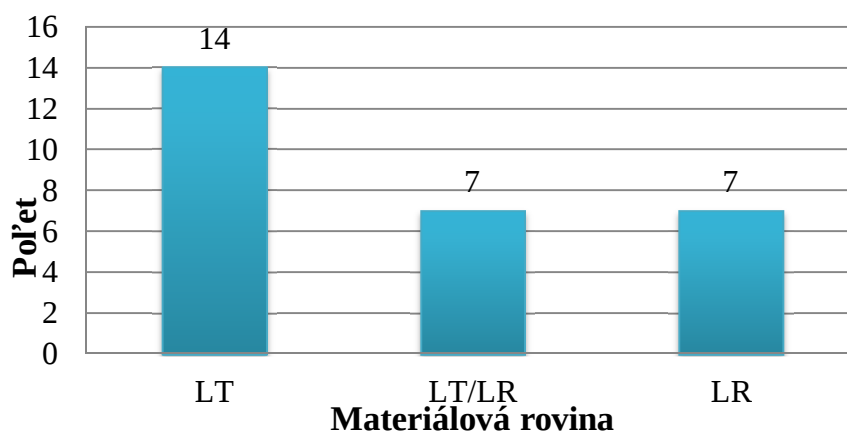


Graf P. 2: Závislost průměrné smykové pevnosti U na šířce letokruhů.

Tabulka P. 12: Letnost a průměrná smyková pevnost příčných lamel s ohledem na šířku letokruhů.

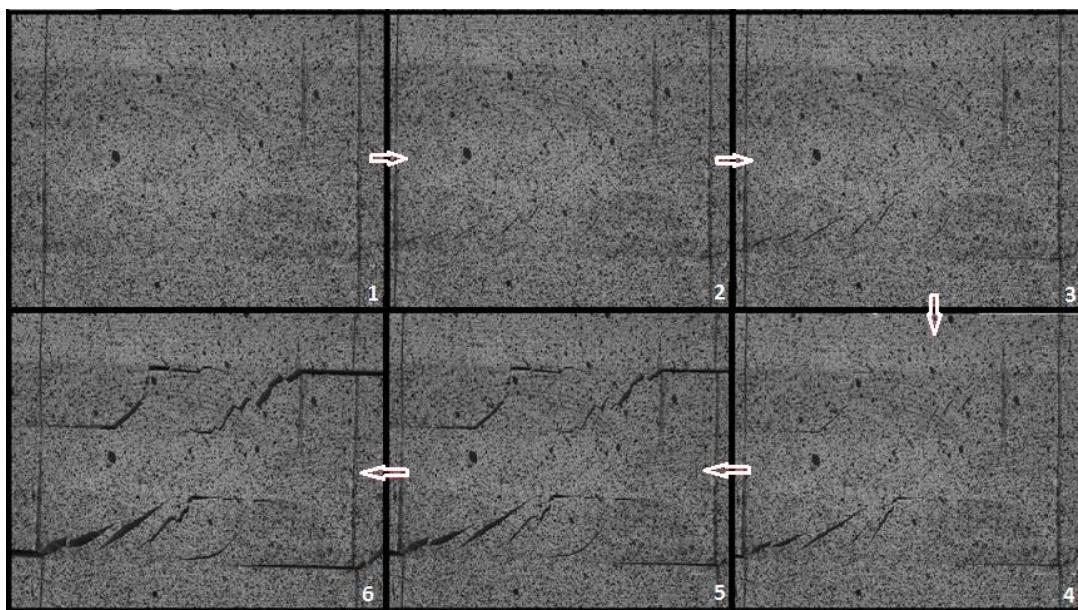
šířka letokruhů [mm]	Letnost poružení	průměrná smyková pevnost U [MPa]
1 - 2	2	5,85
2 - 3	5	5,45
3 - 4	5	4,36

Zároveň bylo také sledováno v průběhu obou sérií zkoušek místo iniciace prvních trhlin a jejich následný rozvoj charakteristickými materiálovými rovinami příčných lamel. Letnost poružení s ohledem na materiálové roviny je zobrazena v grafu P. 3. Pro bližší vyhodnocení lze označit rovinu poružení LT jako rovinu distribuce trhlin podél letokruhu. Druhá rovina poružení LR značí distribuci trhlin kolmo na letokruhy. Třetí případ šíření trhlin, kdy poškození procházelo kombinovanými rovinami LT i LR, je označen jako LT/LR.



Graf P. 3: Letnost poružení v závislosti na charakteristické materiálové rovině příčné lamely.

Na obrázku **P. 33** je zobrazena iniciace a postupný rozvoj trhlin, zaznamenaný systémem DIC, což lze využít např. i při stanovení lomové houževnatosti. Z obrázku je zřejmé, že došlo k poružení vláken v rovině L_R.



Obr. 33 Zkušební vzorek l. 22. a zaznamenání postupného rozvoje trhlin pomocí DIC.

6.5. Dílčí shrnutí

V rámci experimentu bylo provedeno porovnání experimentálních výsledků dosažených v elastické oblasti deformace zkušebních těles s výpočetními modely z FEM programu. Následně byly provedeny dvě série zatížení, přičemž v první sérii zkoušek byla na první pozornost zaměřena na sledování vlivu orientace úhlu letokruhů příčných lamel na smykovou pevnost, v druhé sérii byla pozornost věnována vlivu šířky letokruhů na smykovou pevnost příčných lamel.

Na základě analýzy provedených pevnostních zkoušek bylo v první sérii zjištěno, že nejméně odolnost vůči smykovému namáhání vykazovaly vzorky, u nichž byla orientace vzorků v rozmezí $30^\circ - 60^\circ$. Průměrná smyková pevnost těchto těles byla $\bar{U} = 4,54 \text{ MPa}$. Naopak nejvyšších hodnot bylo dosaženo u vzorků s orientací $60^\circ - 90^\circ$, kde došlo k nárůstu pevnosti o 30 %. Průměrná smyková pevnost v tomto případě byla $\bar{U} = 6,54 \text{ MPa}$. Výslednice sil, která způsobuje smykové porušení při zatížení nosníku v bodovém ohybu, směřuje ve směru podél letokruhů, což vede k porušení u příčných lamel mezi jednotlivými buněčnými stěnami, nikoli napříč, kde by docházelo k jejich porušení.

V druhé sérii zkoušek, kde byl posuzován především vliv šířky letokruhů, bylo prokázáno, že s rostoucí šířkou letokruhů dochází k výraznému poklesu smykové pevnosti. Dle předpokladu vykazovaly nejvyšší hodnoty zkušební vzorky s příčnými lamelami s průměrnou šířkou letokruhů 1-2 mm, které vykazovaly průměrnou smykovou pevnost $\bar{U} = 5,85 \text{ MPa}$. U vzorků s průměrnou šířkou letokruhů 2-3 mm došlo k poklesu pevnosti o 7 %, průměrná smyková pevnost zde byla $\bar{U} = 5,45 \text{ MPa}$. Nejnižší průměrná hodnota smykové pevnosti byla zjištěna u příčných lamel s průměrnou šířkou letokruhů 3-4 mm a to $\bar{U} = 4,36 \text{ MP}$, což představuje pokles pevnosti o 25 %.

Př sledování iniciace trhlin v příčných lamelách bylo vypořádováno, že nejčastěji dochází k poružení v charakteristické materiálové rovině LT a to rovnou u 50 % všech vzorků. K poružení v rovině LR došlo pouze v 25 % případů a u zbylých 25 % příčných lamel se trhliny šířily kombinovaně oběma materiálovými rovinami.

7. Závěr

Tuto práci jsem vypracoval během své stáže na Technické Universitě ve Vídni, za výrazného přispění mých vedoucích, kteří se mi po celou dobu stáže věnovali a umožnili mi realizaci experimentu v jejich laboratoři. V této práci jsem se věnoval bližšímu porozumění pevnostních charakteristik dřevěných materiálů, které jsou v dnešní době velmi často používány, a to konkrétně smykovým vlastnostem. Pro pochopení dané problematiky jsem nejprve provedl rozsáhlou **režijní stávající vlněckých článků**, především zahraničních, které právě smykové vlastnosti dřeva a konstrukčních materiálů z nich vyrobených popisují.

Druhým hlavním úkolem bylo seznámení se s novými výpočetními softwary, jako například **Dlubal RFEM**, což je výkonný program pro 3D analýzu metodou konečných prvků. Dále jsem se musel seznámit se **systémem DIC** a s ním souvisejícím softwarem **Istra4D** pro analýzu a vyhodnocení výsledků jím získaných.

Následovalo samotné navržení experimentu, který byl zaměřen na zkoumání **smykových vlastností**, vznik a šíření trhlin na **CLT nosníku**, zatíženého třebodovým ohybem. Zkoušky byly provedeny dle normy **EN 408+A1**, z níž byla zvolena zkušební metoda smykového pole, kterou jsme modifikovali pro náš experiment na základě modelů, vytvořených v programu Dlubal RFEM.

V rámci **režijní činnosti vlněckých článků** týkajících se poslední problematiky bylo zjištěno, že u konstrukčních dřevěných prvků jsou zpravidla zkoumány materiálové charakteristiky a vlastnosti celých prvků, nikoli však jeho jednotlivých částí, ze kterých se dané prvky skládají, jako je to například u CLT prvků. Proto jsme se rozhodli zaměřit naši pozornost na účinky smykového namáhání, vzniklého v důsledku zatížení třebodovým ohybem, které způsobuje poružení příčných lamel u CLT nosníků.

V rámci experimentu byly provedeny zkoušky na 28 ks CLT nosníků, kdy byl sledován vliv šířky letokruhu, orientace letokruhu či případný výskyt defektů, způsob poružení příčných lamel, následné šíření trhlin a jejich smyková pevnost. Na základě výsledků bylo zjištěno, že k iniciaci trhlin u příčných lamel dochází zpravidla v oblasti jarního dřeva.

Hlavním zjištěním byl ovšem fakt, že ke vzniku prvních poružení docházelo nejnásadněji v příčných lamelách, které mají orientaci letokruhu v rozmezí 30° - 60°, naopak nejvyšší odolnost vůči smykovému namáhání vykazovaly vzorky s orientací letokruhu v rozmezí 60° - 90°, kde došlo k nárůstu pevnosti o 30 %. Dalším pozorovaným faktorem byla šířka letokruhu. Zde byl potvrzen předpoklad, že s rostoucí šířkou letokruhu bude docházet k větší deformaci, k častější iniciaci trhlin a zároveň docházelo k markantnímu poklesu smykové pevnosti. Při srovnání průměrných smykových pevností dosažených u příčných lamel s průměrnou šířkou letokruhu 1-2 mm, došlo k poklesu pevnosti u příčných lamel s průměrnou šířkou letokruhu

3-4 mm o 25 %. To je způsobeno silnější vrstvou jarního dřeva, které dosahuje nižších hodnot mechanických vlastností než dřevo letní.

Z výsledků vyplývá, že struktura materiálu a způsob lepení lamel kolmo na sebe zvyšuje hodnoty charakteristických materiálových vlastností. Pevnost ve smyku u břízových dřevěných prvků pevnostní třídy C24 ze smrkového dřeva, je dle normy 2,2 až 2,4 MPa. V našem případě však smyková pevnost u lamel stejné pevnostní třídy pohybovala v rozmezí 4,54 až 6,54 MPa, s ohledem na jejich makroskopické znaky. Zároveň byl potvrzen předpoklad, že náhodné sestavování lamel bez jakéhokoli třídní (zejména s ohledem na úhel letokruhu) již při výrobě panelů má výrazný vliv na hodnotu pevnosti finálního výrobku. Možnost třídní řeziva (radiálně i tangenciálně řezané) a podrobnější výběr jednotlivých lamel z hlediska výskytu makroskopických znaků již při výrobě těchto dřevěných konstrukčních prvků by vedlo ke zlepšení mechanických vlastností, především tedy ke zvýšení smykové odolnosti při použití dřevěných lamel stejné pevnostní třídy.

8. Literatura

- [1] Poňgaj A. a kolektiv: *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2- vydání, Príroda a.s., Bratislava 1997, ISBN 80-07-00960-4
- [2] K. B. Dahl, K. A. Malo. Planar strain measurements on wood specimens. *Experimental mechanics* 49.4: 575-586, 2009
- [3] D. R. Rammer and L. A. Soltis. Experimental shear strength of glued-laminated beams. *United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, FPL-RP-527, Madison, WI*, 1994
- [4] Ľezingerová, J.; Gandelová, L.: *Stavba dševa*. 1 vydání, MZLU Brno 1994, ISBN 80-7157-347-7
- [5] Pecina, J., Pecina P.: *Materiály a technologie-dševa*. PdF MU.2007
- [6] J. Y. Liu. New shear strength test for solid wood. *Wood Fiber Science*, 16(4):567ñ574, 1984
- [7] D. Moses. The notched shear block revisited. *Research Highlights* (2), 2001
- [8] B. I. Hassel et al. The single cube apparatus for shear testingñfull-field strain data and finite element analysis of wood in transverse shear. *Composites Science and technology* 69.7: 877-882, 2009
- [9] N. Melin. The modified Iosipescu shear test for orthotropic materials. *Diss. KTH*, 2008
- [10] U. A. Kashaba. In-plane shear properties of cross-ply composite laminates with different off-axis angles. *Department of Mechanical Design and Production Engineering, Faculty of Engineering, Zagazig University, Egypt*, 2003
- [11] F. D. Magistris, L. Salmén. Combined shear and compression analysis using a modified Ioaipescu shear test device. Experimental studies on dry wood. *Holzforschung*, Volume 59, DOI: 10.1515/HF.2005.089, 2005
- [12] F. D. Magistris, L. Salmén. Combined shear and compression analysis using the Iosipescu device: analytical and experimental studies of medium density fiberboard. *Wood Science and Technology* 37.6:509-521, 2004
- [13] J. C. Xavier et al. A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35.7: 827-840, 2004
- [14] K.B. Dahl. Linear shear properties of spruce softwood. Department of structural engineering, The Norwegian University of science and technology, Trondheim, Norway, 2009
- [15] J. Xavier, M. Oliveira, J. Morais, T. Pinto. Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test. *Engenharias I, Vila Real, Portugal, CITAB/UTAD*, 2009
- [16] J. Y. Liu, R. J. Ross, D. R. Rammer. Improved Arcan shear test for wood. *International wood engineering conference*, 1996
- [17] S. Diel, O. Huber, P. Steinmann, W. Winter. Design and Validation of a New Fixture for the Shear Testing of Cellular Solids. *Archive of Applied Mechnics*, AAM-13-0251, 2013
- determination of characteristic values
- [18] FMPA. Prüfung von Furnierschichtholz AñKertopuuó. *Bericht I.4-34523*, 1983
- [19] R. Brandner, E. Gehri, T. Bogensperger, G. Schickhofer. Determination of Modulus of Shear and Elasticity of Glued Laminated Timber and related Examinationas. *Bled, Slovenia, 14 p.,CIB W18/40-12-2*, , 2007

- [20] R. Brandner, B. Freytag, G. Schickhofer. Determination of Shear Modulus by means of standardized four-point Bending Test. *International Council for Research and Innovation in Building Construction*, CIB W18, 2008
- [21] R. Brandner, W. Gattermig, G. Schickhofer. Determination of Shear Stength of Structural and Glued Laminated Timber. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, Meeting*, 2012
- [22] A. Khokhar, H. Zhang, D. Ridey-Ellis. The shear strength and failure modes of timber joists obtained from the torsion test method. *Proceedings of the 11th World Conference of Timber Engineering, 20-24th June, Riva del Garda, Italy*, 2010.
- [23] J. K. Denzler, P. Glos. Determination of shear strength values according to EN 408. *Holzforschung München, Technische Universität München, Germany*. DOI 10.1617/s11527-006-9199-4, 2007
- [24] L. Sigbjørnsen. Shear properties of Nordic Glulam CE L40c. Norwegian University of Science and Technology, Department of Structural Engineering, 2012
- [25] A. Shipsha and L. A. Berglung. Shear coupling effects on stress and strain distributions in wood subjected to transverse compression. *Department of Fibre and Polymer Technology, Division of Biocomposites, Royal Institute of Technology, S-100 44, Stockholm, Sweden*, 2009
- [26] J. Xavier, S. Avril, F. Pierron, J. Morais. Variation of transverse and shear stiffness properties of wood in a tree. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(12), 1953-1960, 2009
- [27] E. Serrano, B. Enquist. Compression strength perpendicular to grain in Cross-Laminated Timber (CLT). World conference on Timber Engineering, 20.-24. June, Rive del Garda, Trentino, Italy: Linnaeus University, Faculty of Science and Engineering, 2010
- [28] N. Iosipescu. New Accurate Procedure for Single Shear Testing of Metals. *Journal of Materials*, Vol. 3, pp. 537-566, 1967
- [29] J. F. Dumail, K. Olofsson, L. Salmén. An Analysis of Rolling Shear of Spruce Wood by the Iosipescu Method. *Swedish Pulp and Paper Research Institute (STFI), Stockholm, Sweden*, 2000
- [30] D. Keunecke. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood science and technology* 41.4: 309-327, 2007
- [31] A. Laghdir, Y. Fortin, C. M. De la Cruz, R. E. Hernández. Development of a technique to determine the 3D elasticity tensor of wood as applied to drying stress modeling. *Maderas-Cienc Tecnol*, 10, 35-44, 2008
- [32] J. F. Dumail, L. Salmén. Intra-Ring Variations in the Rolling Shear Modulus of Spruce Wood. *Holzforschung. Volume 55, Issue 5, Pages 549-553, ISSN (Print) 0018-3830, DOI: 10.1515/HF.2001.088*, 2005
- [33] H. Yoshihara, M. Ohta. Estimation of the shear strength of wood by uniaxial-tension tests of off-axis specimens. *Journal Wood Science*, 46, pp. 159-163, 2000
- [34] J. F. Dumail, L. Salmén. Intra-Ring Variations in the Rolling Shear Modulus of Spruce Wood. Swedish Pulp and Paper Research Institute (STFI), Stockholm, Sweden, *HOLZFORSCHUNG*; 55; 549-553, 2001
- [35] D. R. Rammer, L. A. Soltis, P. K. Lebow. Experimental shear strength of unchecked solid-sawn Douglas-fir. *U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, 1996

9. Seznam norem

EN 338 (73 1711) – Konstrukční dřevěná tělíska pevnosti.

EN 384 (73 1712) – Konstrukční dřevěná Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty.

EN 408+A1 (73 1741) – Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevěná a lepená lamelová dřevěná Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností.

EN 14080 (73 2831) – Dřevěné konstrukce – Lepená lamelová dřevěná a lepená rostlá dřevěná Požadavky.

EN 14081-1+A1 (73 2823) – Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevěná obdélníkového průřezu tělíska podle pevnosti – Část 1: Obecné požadavky.

EN 14081-2+A1 (73 2823) – Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevěná obdélníkového průřezu tělíska podle pevnosti – Část 2: Strojní tělíska; doplňující požadavky na požátek zkoušky typu.

ASTM D 905 - 08e1. Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading.

10. Seznam použitých zkratk

DIC – digital image correlation system

GLT – glued laminated timber

GL – glulam

CLT – cross laminated timber

PUR – polyuretan

FE – finite element

FEM (FEA) – finite element method (finite element analysis)

CNC – computer numeric control