

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Stavby s nosnou konstrukcí z CLT panelů

Buildings with a load-bearing structure made of CLT panels

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Tomáš Bulant

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb – C

Datum odevzdání: 9. 1. 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Bulant Jméno: Tomáš Osobní číslo: 468768
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor/specializace: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Stavby s nosnou konstrukcí z CLT panelů
Název diplomové práce anglicky: Buildings with a load-bearing structure made of CLT panels

Pokyny pro vypracování:
Diplomová práce bude zaměřena na problematiku křížem vrstveného dřeva.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kuklík: Dřevěné konstrukce, ČVUT Praha
- [2] Kuklík, Kuklíková, Mikeš: Dřevěné konstrukce 1, Cvičení, ČVUT Praha
- [3] Studnička, Holický: Ocelové konstrukce 20 - Zatížení staveb, ČVUT Praha
- [4] <http://fast10.vsb.cz/temtis>
- [5] ČSN EN 1995-1-1
- [6] ČSN Online | Portál FSv ČVUT (cvut.cz)

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 19.09.2022 Termín odevzdání DP v IS KOS: 09.01.2023
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

.....
Podpis vedoucího práce

.....
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....
Datum převzetí zadání

.....
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje. Práce je zpracována v souladu s metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 8. 1. 2023

Tomáš Bulant

Poděkování

Chtěl bych tímto způsobem poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Kuklíkovi, CSc. za vedení a vstřícný přístup při zpracovávání práce. Dále jsem vděčný za možnost podílet se na experimentální činnosti ve výzkumném ústavu UCEEB ČVUT. Zde bych chtěl poděkovat konkrétně Ing. Lukáši Velebilovi, Ph.D. za organizaci a vedení experimentů, poznatky z jeho výzkumné činnosti a také za vstřícnost a ochotu při zpracovávání získaných dat. Rovněž bych chtěl poděkovat Bc. Šimonu Matějkovi za poznatky z jeho výzkumné činnosti v problematice konstrukcí z křížem vrstveného dřeva.

Anotace

Diplomová práce se věnuje konstrukcím z křížem vrstveného dřeva. Je rozdělena na dvě hlavní části. První část je teoretická a zaměřuje se na seznámení s technologií. Popisuje geometrické, mechanické, materiálové a jiné vlastnosti těchto konstrukcí, a dále také varianty provedení, návrhu, výroby a použití. Druhá část je experimentální. Ta je zaměřená na konkrétní detail, kterým je mechanický spoj panelu z křížem vrstveného dřeva. V rámci popisu chování tohoto spoje při zatížení byly provedeny dvě experimentální analýzy a následně došlo k vyhodnocení získaných dat, shrnutí poznatků a shrnutí námětů pro další výzkum.

Klíčová slova

Křížem vrstvené dřevo, zkušební těleso, CLT panel, zkouška, modul prokluzu, deformace, zatížení, spojovací prostředek, mechanický spoj, gama metoda

Annotation

The diploma thesis is focused on constructions made of cross-laminated timber. It is divided into two main parts. The first part is theoretical and focuses on getting to know the technology. It describes the geometric, mechanical, material and other properties of these constructions, as well as variants of implementation, design, production and use. The second part is experimental. This is focused on a specific detail, which is the mechanical connection of a panel made of cross-laminated timber. As part of the description of the behavior of this joint under load, two experimental analyzes were carried out, followed by an evaluation of the obtained data, a summary of findings and a summary of topics for further research.

Keywords

Cross-laminated timber, test sample, CLT panel, test, slip modulus, deformation, load, fasteners, mechanical joint, gamma method

OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. TECHNOLOGIE KŘÍŽEM VRSTVENÉHO DŘEVA	3
2.1. Historie.....	3
2.2. Zastoupení CLT v České republice.....	3
2.3. Obecná charakteristika	4
2.3.1. Geometrie.....	4
2.3.2. Materiál	5
2.3.3. Kvalita.....	5
2.3.4. Spoje	5
2.3.5. Požární odolnost.....	5
2.3.6. Akustika	6
2.3.7. Montáž	6
2.4. Výroba CLT panelů.....	6
2.4.1. Příprava materiálu.....	7
2.4.2. Sestavení výrobků.....	7
2.4.3. Export výrobků	8
2.5. Výrobky z křížem vrstveného dřeva	9
2.5.1. Stěnové panely	9
2.5.2. Stropní a střešní CLT panely	10
2.6. Konstrukční spoje.....	15
2.7. Mechanické vlastnosti	17
2.8. Analytické metody výpočtu konstrukcí z křížem vrstveného dřeva	18
2.8.1. Modifikovaná Gama metoda.....	18
2.8.2. Metoda smykové analogie	21
2.8.3. Metoda kompozitní teorie (K-metoda)	24
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	25
3.1. Experimentální stanovení smykové únosnosti CLT panelů při zatížení aplikovaném kolmo k rovině panelu.....	25
3.1.1. Předmět zkoušky a identifikační údaje	25
3.1.2. Specifikace zkušebních těles.....	26
3.1.3. Popis a uspořádání zkoušky.....	27

3.1.4.	Použité zkušební zařízení a sledované veličiny	30
3.1.5.	Způsob porušení zkušebních těles	32
3.1.6.	Vyhodnocení získaných dat	35
3.1.7.	Únosnost ve smyku kolmo k vláknům.....	47
3.1.8.	Smyková tuhost panelů.....	48
3.1.9.	Závěr experimentu	50
3.2.	Experimentální stanovení smykové únosnosti spojovacích prostředků třívrstvého CLT panelu	51
3.2.1.	Předmět zkoušky a identifikační údaje	51
3.2.2.	Specifikace zkušebních těles.....	52
3.2.3.	Popis a uspořádání zkoušky	54
3.2.4.	Použité zkušební zařízení a sledované veličiny	57
3.2.5.	Způsob porušení zkušebních těles	57
3.2.6.	Vyhodnocení získaných dat	59
3.2.7.	Únosnost spojovacího prostředku ve smyku.....	63
3.2.8.	Modul prokluzu spojovacího prostředku	65
3.2.9.	Závěr experimentu	70
3.3.	Výpočet třívrstvého stropního panelu z křížem vrstveného dřeva pomocí modifikované gama metody.....	71
3.3.1.	Vstupní materiálové charakteristiky výpočtu	71
3.3.2.	Geometrické vlastnosti zkušebního tělesa	71
3.3.3.	Výpočet.....	72
3.3.4.	Závěr výpočetního modelu	75
4.	ZÁVĚR.....	76
4.1.	Přínos k řešené problematice.....	76
4.2.	Námět pro další výzkum	76
5.	LITERATURA	77
	Seznam použitého softwaru	79
	Seznam tabulek	79
	Seznam obrázků.....	80

1. ÚVOD

Počátek 21. století je možné považovat za přelomový okamžik globálního vnímání světa z hlediska ekologie. Zásadním pojmem se stává tzv. trvale udržitelný rozvoj. Postupně se začíná klást silný důraz na snižování emisí v naší atmosféře. Mezi nejvíce zastoupené skleníkové plyny vypouštěné do atmosféry v Evropě patří oxid uhličitý (CO₂), jehož podíl je přibližně 80 %, a metan (CH₄), jehož podíl je přibližně 11 %. Právě stavební sektor ve velké míře přispívá k produkci CO₂, a proto je na místě, aby se trvale udržitelná výstavba stala standardem. Zásadním krokem je tedy jak snižování energetické náročnosti budov, tak využívání udržitelných zdrojů v rámci stavebních materiálů. [2]

Právě dřevo je ideálním stavebním materiálem splňujícím veškeré požadavky udržitelné výstavby. Každý strom je schopen absorbovat a uložit až jednu tunu CO₂, zároveň se jedná o obnovitelný přírodní materiál, jehož zásoby jsme schopni sami řídit a navyšovat. Právě výsadba nových lesů je jedním z největších kroků vpřed. [3]

Pro porovnání je zde uvedeno, kolik kg CO₂ je produkováno během výroby jednoho kg daného stavebního materiálu (hodnoty se v závislosti na dostupných zdrojích liší, proto je uvedena spodní a horní hranice): [4;5]

- Dřevo 0,2 kg CO₂/kg
- Cement 0,76-1,2 kg CO₂/kg
- Ocel 2,89 kg CO₂/kg

Z hlediska vývoje ani dřevěné konstrukce nejsou výjimkou, a i v této oblasti je možné sledovat progres. V anglickém jazyce existují dva výrazy, „wood“ a „timber“. Oba výrazy bychom mohli přeložit jako „dřevo“, přesto je mezi nimi rozdíl. Zatímco první zmiňovaný výraz vystihuje dřevo jako surové a přirozené, tedy jako tzv. substanci dřevní hmoty zahrnující kmeny, větve a kořeny stromů, druhý výraz vystihuje dřevo jako konstrukční, s vylepšenými statickými, estetickými a dalšími vlastnostmi. Do této kategorie spadá především lepené lamelové dřevo anebo právě konstrukce z křížem vrstveného dřeva – produkt s vysokou prostorovou tuhostí a únosností, s jehož pomocí jsme schopni stavět i výškové budovy při zachování tloušťky stěny několika centimetrů.

Problémem při navrhování konstrukcí z křížem vrstveného dřeva je nedostatečná normativní podpora. Jelikož se jedná o poměrně nový systém, neexistují doposud žádné jednotné normy, dle kterých by statici a projektanti mohli CLT konstrukce navrhovat. Existuje ale několik experimentálně ověřených výpočetních postupů, které se při návrhu používají. Pro komplexní navrhování CLT konstrukcí je potřeba, aby v praxi byly tyto výpočetní postupy modifikovány pro jednotlivé typy konstrukčních dílců z CLT a následně zajištěna snadná proveditelnost návrhů vnesením těchto postupů do nové verze Eurokódu 5.

Velkou výhodou dřevěných konstrukcí je v dnešní době rychlost výstavby, díky níž je proces efektivní, ekonomicky přívětivý a šetrný k okolnímu prostředí. Dále se výrazně snižuje počet mokrých procesů na staveništi a s nimi spojené technologické přestávky a také omezení

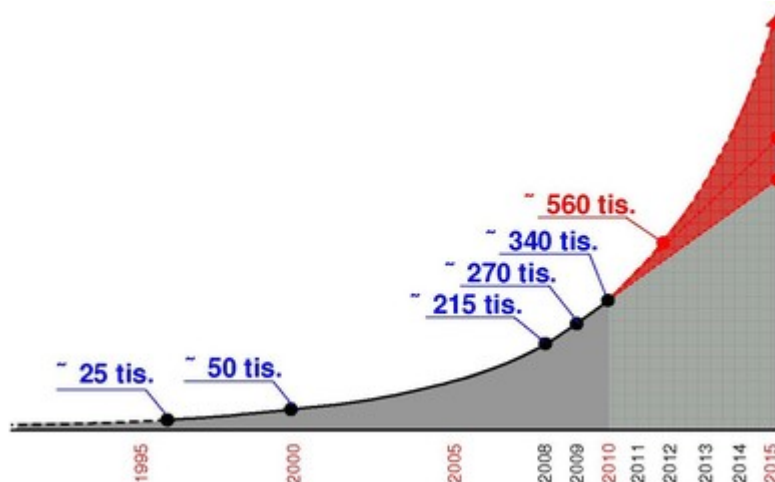
výstavby při poklesnutí teploty pod určitou hranici, jako je tomu např. u provádění betonových konstrukcí. Velkou výhodou dřevěných konstrukcí je také nízká hmotnost, díky níž se hodí do oblastí se špatnými základovými poměry, a na samotných základových konstrukcích lze ušetřit nemalé finanční částky. Na druhou stranu je nutné vnímat potřebu ochrany proti povětrnostním vlivům, degradaci biologickými škůdci, horší akustické vlastnosti, horší akumulaci a přehřívání konstrukcí, nutnost správného skladování stavebního materiálu anebo například jeho ochranu v průběhu výstavby.

Cílem mé práce je přispět do dané problematiky určitým poznatkem, který by postihl chování spojovacích prostředků u mechanicky spojovaných konstrukcí z křížem vrstveného dřeva. Toto chování se pokusím integrovat do jedné z výpočetních metod pro CLT konstrukce. Tím ověřím vhodnost výpočetního modelu, jež bude mít experimentálně ověřené vstupní údaje a jež bude možné validovat na experimentech vzorků reálných velikostí konstrukčních elementů.

2. TECHNOLOGIE KŘÍŽEM VRSTVENÉHO DŘEVA

2.1. Historie

Konstrukční systém dřevěných panelů z křížem vrstveného dřeva je ve stavebním sektoru poměrně čerstvá záležitost. Za kolébku těchto konstrukcí se považuje Rakousko a Německo, kde byl systém představen na počátku 90. let 20. století. Systém byl představován jako unikátní díky své prostorové tuhosti a únosnosti a zároveň jako ekonomicky konkurenceschopné řešení na bázi dřeva, které kombinuje a navyšuje výhody lehkého a těžkého skeletu. O CLT se hovořilo také jako o systému s potenciálem nahradit betonové či zděné konstrukce (jelikož bylo vnímáno jako těžký konstrukční systém, stejně jako beton a zdivo), což bylo po přelomu tisíciletí vzhledem k rozvoji trendu ekologického bydlení velmi atraktivní. Systém si rychle získal oblibu a dále se rozšířil i do zbytku Evropy – především do Skandinávie, a také do severní Ameriky, kde ale stále převažuje spíše sloupkový systém. [1;6]



Obrázek 1: Graf rústu produkce CLT v Evropě od roku 1995 v metrech krychlových [7]

2.2. Zastoupení CLT v České republice

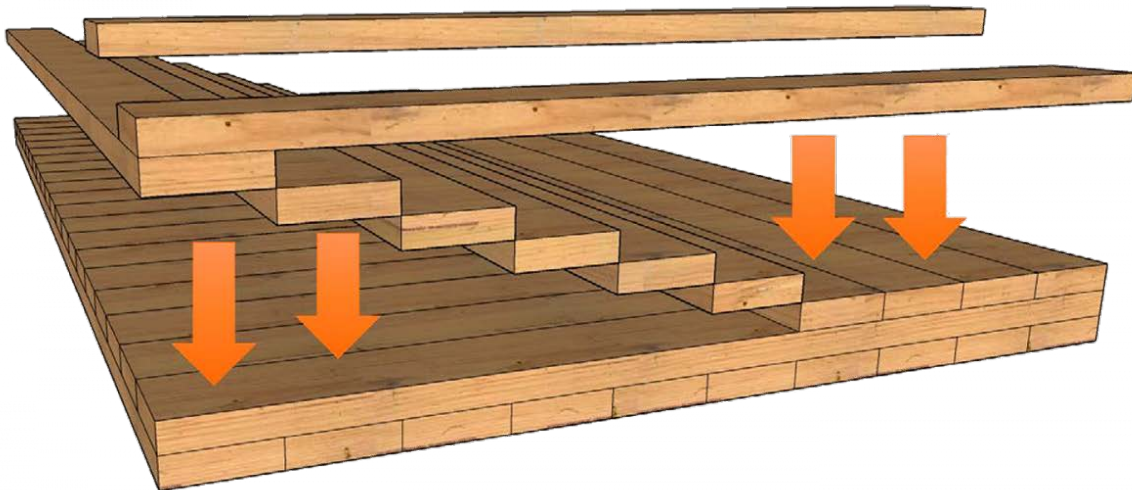
V České republice dochází v průběhu nového tisíciletí kontinuální nárůst zájmu o dřevostavby. Zatímco v roce 1998 byl podíl domů s nosnou konstrukcí na bázi dřeva pouhých 1,5 %, v roce 2010 byl tento podíl již téměř 10 %. Trend zvyšujícího se podílu dřevostaveb přetrvává do dnes. Do popředí se dostává právě výstavba domů z křížem vrstveného dřeva, které postupně nahrazuje lehké rámové a skeletové dřevostavby. Výhodou uplatnění technologie křížem vrstveného dřeva v České republice je blízkost velkých výrobců, jejich kvalitní zastoupení a technická podpora. Většina těchto výrobců sídlí v Rakousku nebo ve Skandinávii, ale i u nás máme výrobce, kteří se výrazně podílí na vývoji této technologie. Těmi jsou například společnosti Agrop Nova, a.s., dřevostavby Biskup, s.r.o., nebo zastoupení finské společnosti Stora Enso Wood Products, s.r.o. [1]

2.3. Obecná charakteristika

Jak již napovídá sám název, technologie CLT spočívá právě ve spolupůsobení jednotlivých, na sebe vzájemně kolmých vrstev dřeva. Jedná se o masivní deskový vysoce únosný konstrukční systém. Jednotlivé konstrukční dílce mohou být kladeny ve svislém, vodorovném i šikmém směru. Primárně jsou využívány pro difuzně otevřené konstrukce. Při správném návrhu skladby konstrukce nedochází ke kondenzaci vodních par a odpadá nutnost použití parozábrany. Mohou být vyráběny v různých pohledových kvalitách, v závislosti na architektonickém záměru. Z architektonického hlediska je zásadní i to, že panely nemusí být vyráběny sériově. Architekti a projektanti tedy nemusí brát při návrhu konstrukcí ohled na modulové a výrobní rozměry. To znamená, že konstrukce mohou být při dodržení základních technologických zásad navrhovány s velkou volností. [1]

2.3.1. Geometrie

Skladby panelů se liší v počtu vrstev a jejich tloušťkách. Zpravidla se vyrábí panely s lichým počtem vrstev, minimum jsou 3 a maximum 9. Tloušťka vrstev se pohybuje od 10 do 50 mm. Tloušťky jednotlivých vrstev se můžou lišit, avšak měly by být osově symetrické. Poměr b/h lamely by se měl pohybovat kolem hodnoty 0,25. Tyto parametry se odvíjí od statického působení panelu a od zatížení, které na něj působí. Rozměrové limity jednotlivých prvků se odvíjí pouze od možností výrobní linky či omezení při dopravě dílců na stavbu. Maximální rozměry vyráběných panelů se liší dle výrobců, zpravidla se ale pohybují kolem 18x3 m. Výrobní proces je velmi přesný. Probíhá pomocí obráběcích CNC zařízení na základě elektronické výkresové dokumentace. Rozměrová tolerance při maximálních výrobních rozměrech je ± 2 mm. [1;7]



Obrázek 2: Typická skladba CLT panelu [8]

2.3.2. Materiál

Hlavním materiálem pro výrobu CLT panelů je smrkové dřevo, ovšem výjimečně se používá i dřevo modřínové, borové, či jedlové. Do budoucna je předmětem vývoje i aplikace dřeva z listnatých stromů, a to z důvodu zachování pestrosti lesních porostů a zastavení kůrovcové kalamity.

2.3.3. Kvalita

Konstrukce je velmi atraktivní i z architektonického hlediska, jelikož interiérová strana může být ponechána jako pohledová, bez dalšího obložení. Z tohoto důvodu se panely vyrábí v různých kvalitách. Základní typy panelů jsou určeny k dalšímu opláštění. Jejich povrch je hrubší a mohou na něm být pozorovatelné vady, jako např. trhliny, zamodráání, spáry lamel, nebo vypadané suky. Tyto vady ovšem nijak neovlivňují statické vlastnosti panelu. Pohledové panely jsou určeny k přiznání v interiéru konstrukce a jsou vyráběny z výběrového dřeva, jejich povrch je velmi hladký a nejsou na něm pozorovatelné spáry, vruty, nebo zbytky lepidla. [1]

2.3.4. Spoje

Spojování vrstev a lamel se provádí dvěma způsoby, a to lepením pod tlakem za studena, či mechanicky pomocí vrutů, hřebů nebo kolíků na bázi dřeva. Jednotlivé metody se velmi liší v tuhostech spojů, popř. celých konstrukčních prvků. Lepené panely jsou výrazně smykově tužší než panely spojované mechanicky.

I samotné lepení se provádí dvěma způsoby. Prvním způsobem je lepení pouze mezi jednotlivými vrstvami. Lamely v jedné vrstvě pak již mezi sebou lepeny nejsou. U takových panelů, zvláště, pokud se jedná o třívrstvé panely s nižší tloušťkou a základní kvalitou provedení, pak může být zjištěna nedostatečná vzduchová neprůvzdušnost. Druhým způsobem je lepení jak jednotlivých vrstev, tak jednotlivých lamel v jedné vrstvě k sobě. Zde je vzduchová neprůvzdušnost zaručena u všech typů panelů. [1]

2.3.5. Požární odolnost

Schopnost odolávat požáru je další velkou výhodou konstrukcí z křížem vrstveného dřeva. To je způsobeno tím, že se jedná o 2D prvky, které odhořívají pouze z jedné strany, na rozdíl od klasických 1D konstrukčních prvků, kde k odhořívání dochází minimálně ze dvou stran. CLT konstrukce dosahují již při 80 mm tloušťce požární odolnosti REI30. Při vyšších tloušťkách konstrukcí je pak možno dosáhnout požární odolnosti až REI90. Také je možné použít protipožární obkladové desky, avšak za cenu zakrytí pohledové konstrukce. Největším omezením staveb na bázi dřeva je maximální dovolená požární výška konstrukce stanovená normativně, v závislosti na hořlavosti konstrukčního systému. Tato výška v České republice nesmí přesáhnout 12 m (u budov s CHÚC DP1, jinak 9 m), avšak po udělení náležitých výjimek lze stavět i větší konstrukce. [9]

2.3.6. Akustika

Problémem dřevěných konstrukcí je akustika. Konstrukce z křížem vrstveného dřeva sice vykazují lepší hodnoty akustického útlumu oproti lehkým rámovým konstrukcím, samy o sobě ale nejsou schopné splnit normově stanovené akustické požadavky. Na to je třeba myslet již v počátku návrhu konstrukce. Lepších hodnot akustického útlumu lze dosáhnout např. pomocí akustických izolací a obkladů, akustických podhledů, kročejových izolací anebo například přitížením stropní konstrukce hmotnějším materiálem. [1]

2.3.7. Montáž

Hlavní výhodou dřevěných prefabrikovaných konstrukcí je rychlost výstavby. Stavební dílce jsou z výrobní linky dopraveny na stavbu většinou automobilovou dopravou. Jelikož se jedná o velkoformátové dílce, je jejich hmotnost poměrně vysoká a je nutné použití jeřábu na staveništi. Pokud je správně připravena základová deska, samotná montáž nosné dřevěné konstrukce trvá v řádu dnů/ týdnů, dle rozsahu konstrukce.

2.4. Výroba CLT panelů

Postup výroby jednotlivých panelů se může v závislosti na výrobcí a použité technologii lišit, nicméně obecný postup výroby lepených CLT panelů probíhá v těchto krocích: [10]

Příprava materiálu

- Řezání profilů lamel
- Sušení
- Pevnostní třídění
- Hoblování
- Oprava vad

Sestavení výrobků

- Příprava lamel pro spojení
- Nanášení lepidla
- Lisování
- Úprava povrchu dle požadavků projektu
- Řezání panelu dle požadavků projektu

Export výrobků

- Označení a balení
- Transport na stavbu

2.4.1. Příprava materiálu

Základním materiálem pro výrobu CLT panelů je rostlé surové řezivo. Většinou se jedná o smrkové dřevo, méně obvykle jsou používány jiné jehličnany a výjimečně listnaté dřeviny. Takové dřevo je zpracováváno na pilách. Technologie křížem vrstveného dřeva umožňuje efektivní využití průřezů vytěžených stromů, a to díky tomu, že lamely lze vyrábět i z odřezků a krajin získaných při řezání trámů.

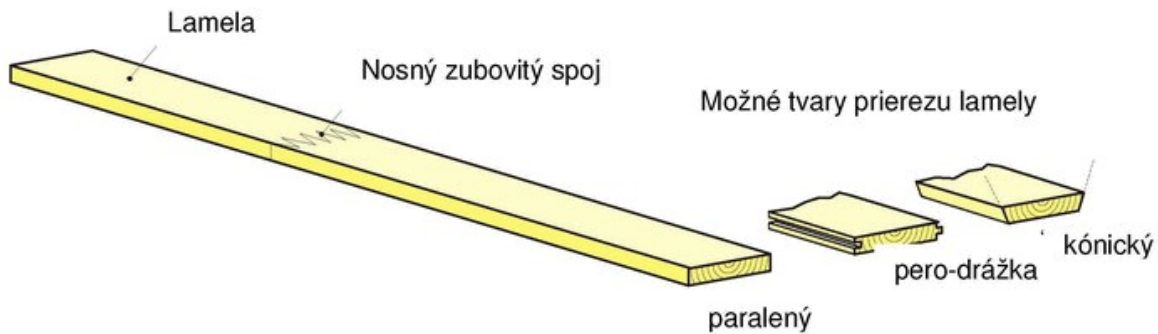
Nahrubo se nařezou se jednotlivá prkna. Ty se nejprve vysuší na vlhkost 12 ± 2 % a následně se provede pevnostní třídění. Pevnostní třídění lze provádět vizuálně, nebo strojně. Pomocí vizuálního zařídění se může rozdělit řezivo do jakostních tříd S7, S10 a S13, které odpovídají pevnostním třídám C16, C24 a C30. Toto zařídění se provádí dle kritérií, jako jsou velikost a množství suků, průměrná šířka letokruhů, odklon vláken, velikost výsušných trhlin, rozsah oblin, zbarvení, hniloba, množství tlakového dřeva, poškození hmyzem, nebo zakřivení. V praxi (a při výrobě CLT panelů nevyjímaje) se většinou používá zařídění strojní, jehož nejběžnějším způsobem je zařídění dle průhybu. Prvek se umístí do zkušebního zařízení a je na něj vyvinuta definovaná síla, při které se měří jeho průhyb. Dle naměřeného průhybu se na základě pevnosti a ohybové tuhosti určí jakostní třída. Lze využívat i obrácený postup, tedy definovat průhyb a jakost určovat dle naměřené působící síly. U strojního třídění se může řezivo zařadit i přesněji, než do zmiňovaných tří tříd při vizuálním třídění (S7, S10, S13). Zařídění řeziva do jakostních tříd a jejich převod do tříd pevnosti je popsán v normách ČSN 73 2824-1, ČSN EN 1912 a ČSN EN 338. V souladu s hodnotami získanými podle těchto norem dále počítá Eurokód 5 (ČSN EN 1995-1-1), dle kterého se provádí návrh nosných dřevěných konstrukcí. Většinou se pro výrobu dřevěných konstrukcí v ČR používá dřevo pevnostní třídy C24 a je tomu tak i u CLT panelů, kde ale příčné vrstvy mohou být tvořeny řezivem i s nižší třídou pevnosti. Také ale platí, že každá vrstva je tvořena lamelami se stejnou třídou pevnosti. [11;19;20;21;22]

Zaříděná prkna se ohoblují do požadovaných finálních rozměrů lamel a opraví se případné vady dřeva. U lepených panelů jsou daleko náročnější požadavky na přesnost opracování a tloušťku lamel než u panelů spojovaných mechanicky. To je dáno tím, že při lepení je předepsaná tloušťka vrstvy lepidla a pokud by nebyla všechna prkna stejné tloušťky, docházelo by k nerovnoměrnému rozložení tlaku při lisování jednotlivých lamel k sobě. Připravené lamely jsou skladovány v klima komoře, aby nedošlo vlivem změn teplot a vlhkosti k jejich kroucení a popraskání vlivem bobtnání a sesychání. [1]

2.4.2. Sestavení výrobků

Sestavení panelů probíhá pomocí automatizovaných CNC linek, které pracují na základě CAD dat. Zde dochází k finálnímu opracování lamel do požadované rozměrové tolerance, vytvoření výřezů (např. pro rozvody TZB, ...), zkrácení na požadované délky atp. Jednotlivé lamely jsou skládány na sraz, a to třemi různými způsoby, viz obr. 2. Mechanické spojování lamel je prováděno taktéž v těchto linkách. Vruty nebo hřebíky jsou montovány ve stanovených rastrech, vždy však platí pravidlo minimálně dvou kusů na jedno křížení lamel. Spojování pomocí kolíků na bázi dřeva je technologicky náročnější. Používají se kolíky

z tvrdého dřeva, tzn. většinou dubové nebo bukové. Do lamel vysušených na vlhkost 12 % se vyvrtají otvory průměru 20 mm. Do nich se natlučou kolíky průměru 20 mm vysušených na vlhkost 6-8 % a přisadí se lamela z další vrstvy. Absorbací okolní vlhkosti kolíky nabobtnají a spoj nabude na tuhosti. Následující odstavce popisují sestavení lepených panelů. [1;11]



Obrázek 3: Možnosti sestavení lamel v rámci jedné vrstvy [7]

Lepení se provádí většinou pomocí jednosložkových emulzních, polyuretanových, fenolických, aminových nebo izokyanátových lepidel. Lepidlo se strojně nanese ve vrstvě 0,1-0,3 mm na lamely a nechá se působit. Každé lepidlo má trochu jiné vlastnosti a mělo by se používat dle postupu daného výrobcem. Používaná lepidla musí garantovat zdravotní nezávadnost. Výrobci musí pomocí mezinárodně uznávaných certifikátů dokládat, že se z lepidel neuvolňuje formaldehyd, jsou netoxická a jsou šetrná k životnímu prostředí. [1;11]

Z lamel se vyskládá geometrie budoucího panelu. U stěn se většinou skládají lamely v lichých vrstvách svise, v sudých vodorovně. U stropních dílců bývají lamely kladeny v lichých vrstvách rovnoběžně s uvažovaným směrem rozponu, v sudých vrstvách kolmo k tomuto směru. Tento postup je doporučen z hlediska statické únosnosti.

Po sestavení lamel s naneseným lepidlem se provádí lisování. To se provádí za studena. Lisovat můžeme buď vakuově, anebo pomocí hydraulického lisu. Vakuově jsme schopni vyvinout tlak v rozmezí 0,02-0,1 MPa. Lisování tlakem pomocí hydrauliky je účinnější a je používáno ve většině případů. Tímto způsobem jsme schopni vyvinout tlak 0,1-1,0 MPa, tedy o řád větší než u lisování vakuového. Ideální hodnota tlaku pro lisování závisí na použitém lepidle a na přesnosti geometrie lamel, běžně se uvádí zhruba kolem 0,8 MPa. [10]

Na závěr se upraví kvalita povrchu broušením dle požadavku projektu, strojově se vyřízne geometrie panelu dle požadavků projektu a jednotlivé panely se předávají na expedici.

2.4.3. Export výrobků

Každý výrobek musí být náležitě označen, aby se na staveništi jednoduše dalo poznat, kam má být daný výrobek umístěn a jak s ním má být zacházeno. Nejběžnější dopravou je automobilová, případně železniční. Výrobky musí být během přepravy uloženy tak, aby nedošlo k jejich deformaci, průhybu nebo otlacení. Nejběžnější způsob je umístění naležato s použitím prokladů a kurtů k sepnutí balíku. U výrobků se běžně připravují oka pro následnou manipulaci pomocí jeřábu.

2.5. Výrobky z křížem vrstveného dřeva

2.5.1. Stěnové panely

Stěnové panely vynikají především výborným poměrem mezi tloušťkou konstrukce a její únosností. Tloušťka nosné konstrukce se pohybuje od 60 do 160 mm. I takto tenké konstrukce jsou schopny přenášet zatížení vícepodlažních budov. Tloušťka nad 160 mm se nedoporučuje navrhovat, jelikož se začíná projevovat vysoká hmotnost panelu a velká spotřeba materiálu. Zatížení je přenášeno pomocí svisle orientovaných vrstev, vodorovně orientované vrstvy slouží k zajištění prostorové tuhosti prvku. Konstrukce stěn z CLT panelů tak plní kromě statické funkce i funkci ztužující, není třeba používat další systémy ztužení. Většinou bývají vyráběny panely se shodnou tloušťkou vrstev, ale není to pravidlo. To platí i o počtu vrstev, který bývá většinou lichý. [1]

Dřevo je na rozdíl od jiných tradičních stavebních materiálů, jako je ocel nebo beton, schopno částečně tepelně izolovat. Vlastnost materiálu vést teplo udává součinitel tepelné vodivosti λ , vyjádřený v jednotkách W/mK. Tato hodnota u dřeva závisí na tom, zda používáme dřevo měkké nebo tvrdé, a zda tepelný tok probíhá kolmo k vláknům nebo rovnoběžně s vlákny. Pro stěnový CLT panel ze smrkového dřeva tedy platí hodnota pro měkké dřevo s tepelným tokem kolmo k vláknům. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro dřevo, a zároveň pro porovnání i pro beton či tepelnou izolaci. [1]

Tabulka 1: Součinitele tepelné vodivosti vybraných materiálů [hodnoty převzány ze softwaru Teplo 2017]

Materiál	λ [W/mK]
Dřevo měkké (tok kolmo k vláknům)	0,18
Dřevo měkké (tok rovnoběžně s vlákny)	0,41
Dřevo tvrdé (tok kolmo k vláknům)	0,22
Dřevo tvrdé (tok rovnoběžně s vlákny)	0,49
Železobeton	1,58
Minerální vata (Isover TF Profi)	0,038

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla [W/(m ² ·K)]		
	Požadované hodnoty $U_{N,20}$	Doporučené hodnoty $U_{rec,20}$	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy $U_{pas,20}$
Stěna vnější	0,30 ¹⁾	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,12

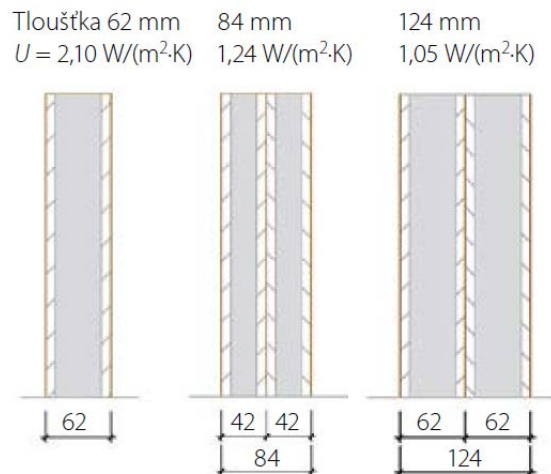
Obrázek 4: Požadavky na součinitel prostupu tepla U pro vnější stěnu dle ČSN 73 0540-2 [12;23]

Ani s těmito poměrně příznivými hodnotami součinitele tepelné vodivosti není schopné dřevo při tloušťkách stěnových panelů 60-160 mm dosáhnout hodnot součinitele prostupu tepla daného normou ČSN 73 0540-2, který je stanoven pro stěnu vnější dle obr. 4. Proto je vždy nutné stěny z panelů CLT z exteriéru zateplit. Součinitele prostupu tepla pro typické varianty samotných CLT panelů jsou uvedeny na obr. 5. Díky nízké tloušťce konstrukce je

ale možné dosáhnout základních požadovaných tepelně technických vlastností stěn již při tloušťce cca 280 mm. To výrazně snižuje poměr mezi zastavěnou a užitnou plochou budovy. [1;23]

Příznivě se ale jeví v závislosti na vyšší hmotnosti CLT konstrukcí jejich akumulační schopnost, závislá na fázovém posunu. To je velká výhoda především při udržování tepelné pohody v letních měsících. [1]

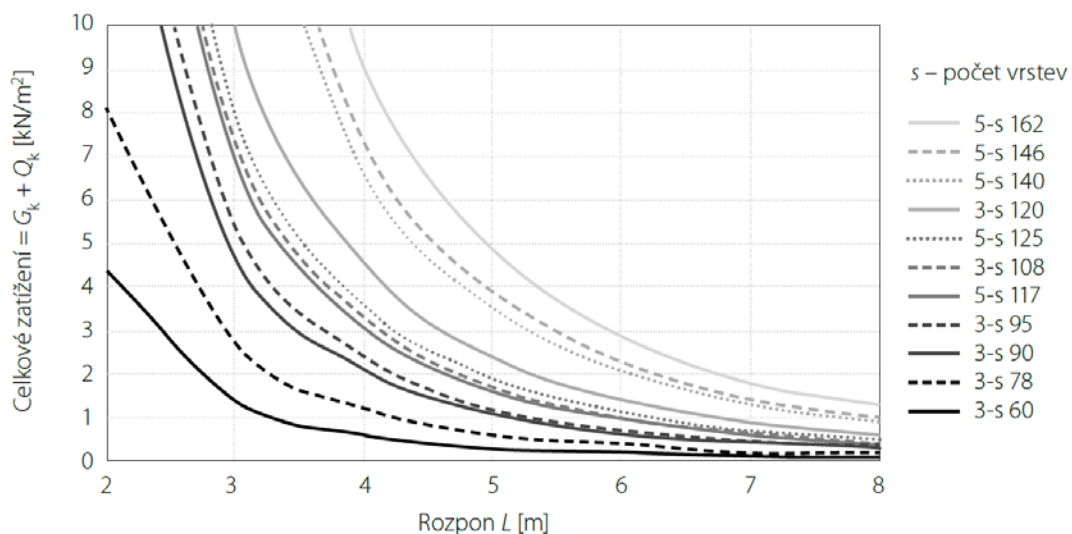
Stěnové panely bývají osazovány většinou kratším rozměrem na výšku. Při výrobních rozměrových možnostech cca 18x3 m je většinou rozměr panelu dostačující, pokud je výška podlaží větší než 3 metry, osazují se panely na výšku přes víc podlaží. Vždy ale musí platit, že svisle orientované vrstvy lamel jsou na vnějších stranách panelu. [1]



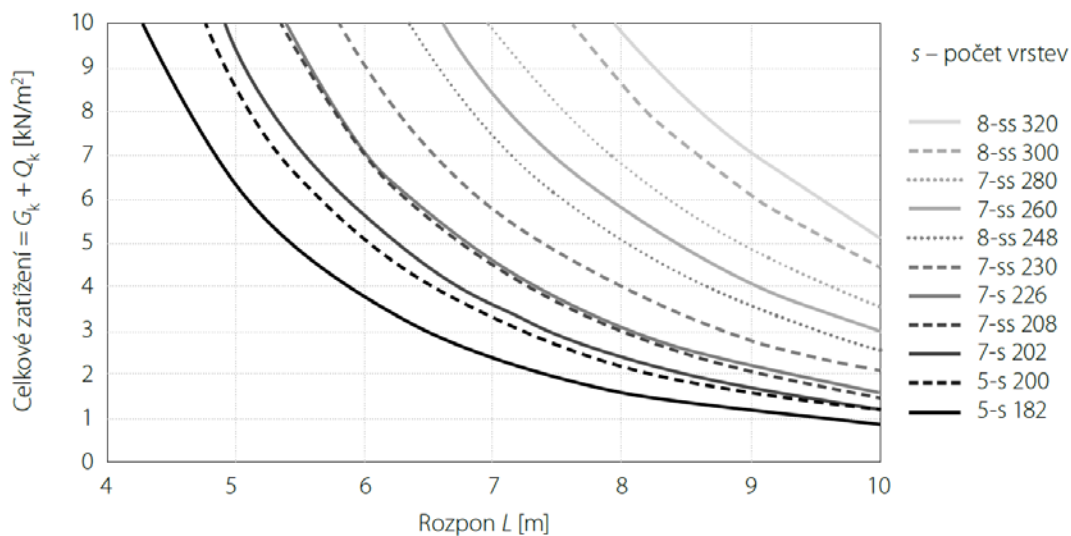
Obrázek 5: Součinitele prostupu tepla U pro typické tloušťky CLT panelů [1]

2.5.2. Stropní a střešní CLT panely

CLT panely lze využít i pro konstrukce plochých a šikmých střech a stropů. Jsou konstrukčně řešeny stejně jako panely stěnové, ale díky rozdílnému typu zatížení je třeba je dimenzovat s větší tloušťkou a tím i s větším počtem vrstev. Krajiní vrstvy jsou orientovány rovnoběžně s rozponem. Příčné vrstvy slouží opět k zajištění prostorové tuhosti prvku. Zároveň ale pomáhají přenášet tzv. valivý smyk, ke kterému u vodorovných konstrukcí tohoto typu dochází. To přispívá k únosnosti panelu. Ideální rozpon těchto konstrukcí je 6-7 m. Orientační křivky pro návrh tloušťky stropních panelů jsou znázorněny v grafech 1 a 2. Návrh závisí na zatížení panelu a jeho rozponu. Grafy jsou platné pro prostý nosník. [1]



Graf 1: Orientační návrh tloušťky stropní konstrukce s rozponem do 8 m [1]



Graf 2: Orientační návrh tloušťky stropní konstrukce s rozponem do 10 m [1]

Při větším rozponu je třeba již masivního průřezu, čímž výrazně narůstá zatížení a využití takového panelu již není efektivní. Vyšší rozpory lze ale překonávat kombinací s dalšími konstrukčními prvky. Jedná se o tzv. alternativní řešení, která budou popsána níže v této kapitole. Tyto alternativní podpůrné konstrukce lze v rámci architektonického návrhu přiznat, anebo je skrýt podhledem, který zároveň vytvoří místo pro vedení ZTI a VZT instalací a elektroinstalací. Taktéž lze prostor vyplnit akustickou izolací nebo ho využít jako protipožární ochranu. Díky velikosti vyráběných CLT panelů lze díky těmto alternativním konstrukcím vytvořit spojitý nosník, který je v únosnosti efektivnější než prostý nosník.

Důležitou vlastností každého stropu na bázi dřeva je akustický útlum. Dostatečného akustického útlumu lze docílit vhodnou skladbou podlahy s dostatečnou vrstvou kročejové izolace, a dále také uložením stropní konstrukce na pružné podložky. [1]

Valivý smyk [13;14]

Valivý smyk je závislý na mnoha faktorech, které jsou uvedené na obr. 6. Obecně je možné říci, že se jedná o zásadní vlastnost při návrhu deskových dřevěných dílců. Jedná se o smykové napětí v rovině kolmo k vláknům. V této rovině je pevnost a tuhost dřeva významně menší než v rovině rovnoběžně s vlákny. Pevnost pro valivý smyk je udávána jako přibližně dvojnásobek pevnosti dřeva v tahu kolmo k vláknům. Platí tedy vztah:

$$f_{v,90,k} = 2f_{t,90,k} \quad (1)$$

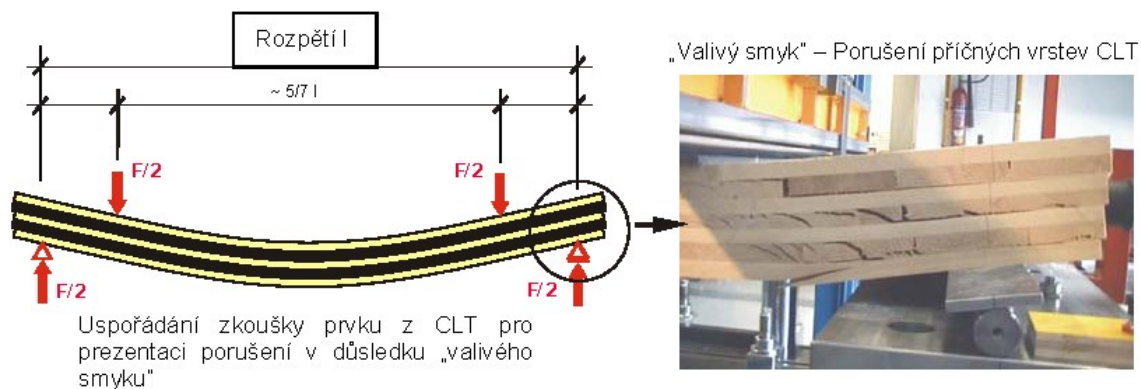
Hodnoty těchto pevností jsou stanoveny v normě ČSN 73 2824-1 v závislosti na pevnostní třídě použitého dřeva. Obecně se však hodnota pevnosti valivého smyku pohybuje kolem hodnoty 1-1,2 MPa. [19]

Porušení může nastat dvěma způsoby, a to buď natočením jednotlivých lamel, anebo usmýknutím podél letokruhů. Toto usmýknutí bývá nejčastěji v místech přechodu jarního a letního dřeva.

Parametry ovlivňující „valivý smyk“	pozitivně negativně
Rozměry lamel v příčné vrstvě	
Poloha letokruhů v lamelě	
Šířka letokruhu (podíl jarního a letního dřeva)	
Výroba Tlak Typ lepidla	<p>lepený bok lamely drážka mezera mezi lamelami</p> <p>velký tlak (> 0,6 N/mm²) malý tlak (např. 0,1 N/mm²)</p>
Typ zatížení	<p>Smyk s tlakovým napětím kolmo k vláknům Smyk s tahovým napětím kolmo k vláknům</p>

Obrázek 6: Parametry ovlivňující valivý smyk [14]

Na obrázku 7 je znázorněno uspořádání zkoušky na porušení valivým smykem. Obrázek zahrnuje i fotografii s módem porušení při experimentu.

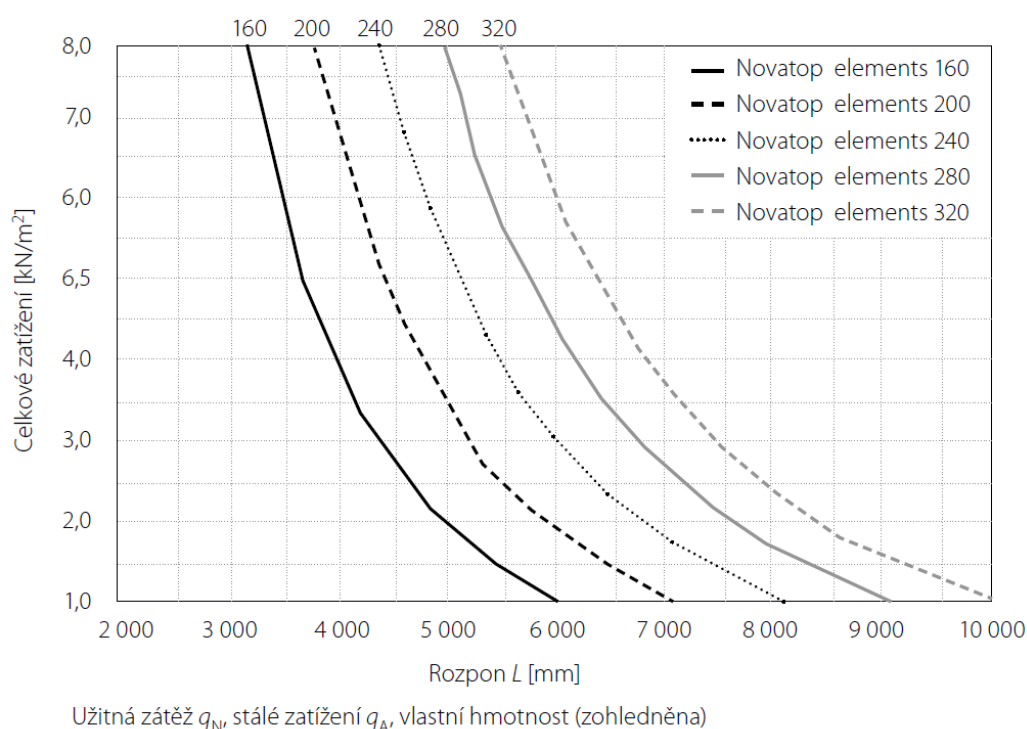


Obrázek 7: Uspořádání experimentu na valivý smyk [14]

Alternativní řešení [1]

- **Vícevrstvé systémové panely se středím nosným roštem**

Tato technologie je odlišná od typické technologie křížem vrstveného dřeva, ale přesto patří do certifikovaného uceleného systému CLT. Konstrukce mají výrazně vyšší tloušťku, ale dochází k úspoře materiálu a k efektivitě konstrukce v rámci poměru hmotnost/únosnost. Spodní a horní část panelu je z vrstvených dřevěných desek. Střední část je z žebér nalepených v příčném i podélném směru. Mezery mezi žebry se dají vyplnit akustickou či tepelnou izolací a je možné mezi žebry vést veškeré instalace technické infrastruktury. Pohledově je tento systém totožný s klasickými pohledovými CLT panely. Tradičním výrobcem těchto panelů je Novatop. Orientační výpočet tloušťky takového panelu je uveden v grafu 3.



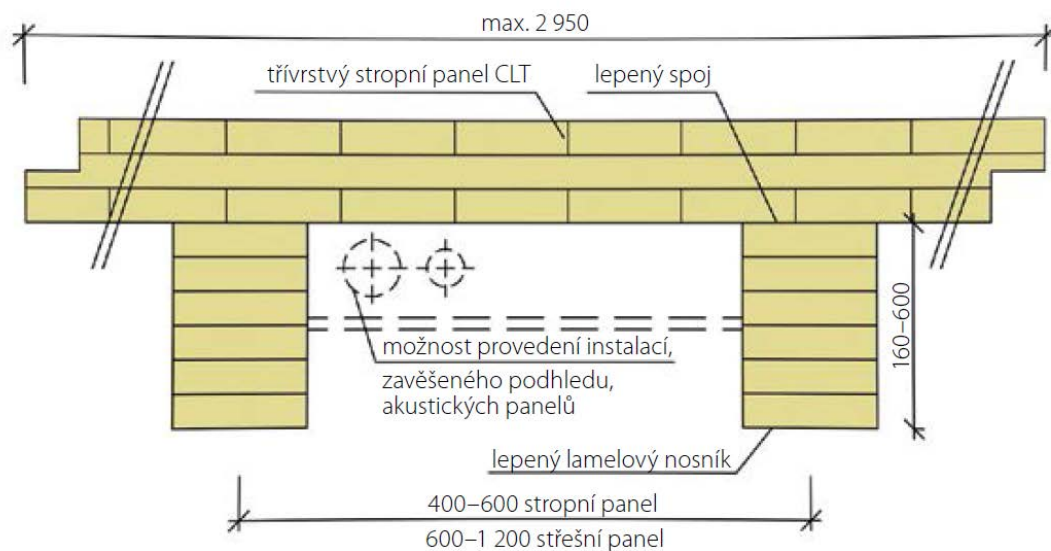
Graf 3: Orientační návrh tloušťky vícevrstvého systémového panelu Novatop [1]



Obrázek 8: Vícevrstvý stropní panel Novatop Element [15]

- **Žebrový spřažený strop**

U tohoto systému se využívá jak panelů CLT, tak lepených lamelových nosníků. Tyto dva konstrukční prvky jsou spřaženy lepením. Vzniká tak prefabrikovaný dílec dodávaný jedním výrobcem. Vzdálenost žebra se pohybuje od 400 do 1200 mm, podle velikosti zatížení. Žebra mohou být úplně nebo částečně zakryta podhledem, ve kterém můžeme opět vést instalace technické infrastruktury či umístit izolaci. Strop ale může být ponechán i jako pohledový. System je znázorněn na obr. 9.



Obrázek 9: Spřažený žebrový stropní panel [1]

- **Kombinace trémového stropu a CLT**

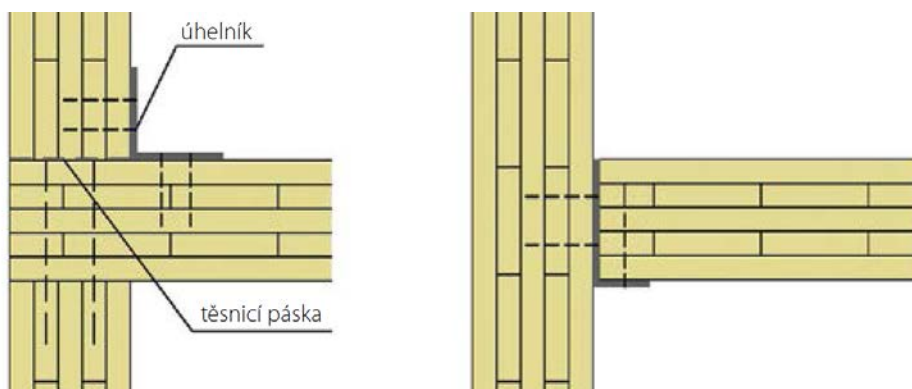
U této varianty mohou být použity jak trámy z rostlého dřeva, tak trámy z lepeného lamelového dřeva. Použití rostlého dřeva je ale možné do rozpětí pouze kolem 4-5 m. Tato varianta je vhodná především pro stavby menšího rozměru, jelikož je časově náročnější, ale zato ekonomicky přívětivější. Trámy nejsou s CLT panely spřaženy, pouze jim vytvářejí poddajné liniové podpory, a tím pro panely vzniká statické působení podobné spojitému nosníku. Nejedná se o jeden ucelený systém jako tomu bylo u předchozího případu.

2.6. Konstrukční spoje

Velká výhoda konstrukcí z křížem vrstveného dřeva je také jednoduchost spojování jednotlivých panelů. Nejčastějšími spojovacími prostředky jsou vruty, hřebíky a ocelové kotvy. Spoje lze dle potřeb realizovat jako viditelné, i jako skryté. U staveb se zvýšenými nároky na vzduchotěsnost se v místech spojů používají vzduchotěsnicí pásky nebo PUR lepidla.

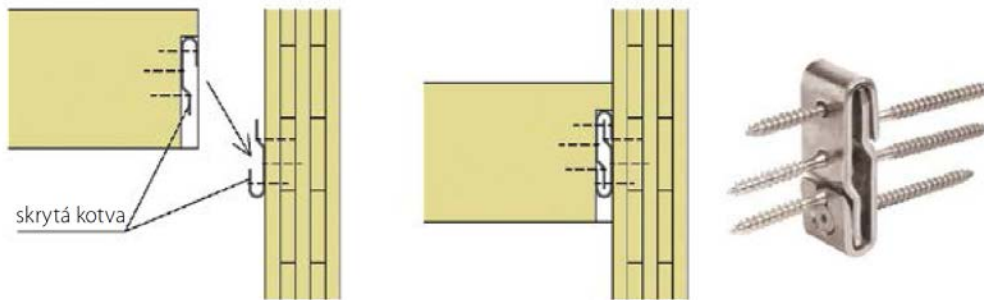
Spodní hrany stěnových panelů bývají většinou kotveny pomocí ocelových děrovaných úhelníků, které se probíjí hřebíky či provrtávají vruty. Pokud se jedná o připojení tohoto panelu k betonovému základu, ocelový profil se připevňuje na chemickou kotvu. U tohoto detailu je možné vložit pod CLT panel ještě podkladní hranol. Stěnový panel je pak lépe chráněn proti vnějším vlivům. Svislé spoje panelů bývají napojovány na sráz a kotveny pomocí vrutů. Je možné použití i příložek a opět u budov se zvýšenými požadavky na vzduchotěsnost se do míst spojů vkládá vzduchotěsnicí páska či vrstva PUR lepidla. [1]

Napojení stěn a stropních konstrukcí se provádí dvěma způsoby. První způsob se nazývá „Platform frame“. Tento způsob se používá při výšce stěnových panelů pouze na jedno podlaží a jedná se o nejpoužívanější systém napojování stropních konstrukcí. Na vrchní hranu stěn jsou kladeny stropní dílce, které se následně připevní pomocí vrutů. Další stěna je pak opět tradičně založena pomocí ocelových úhelníků. Je doporučeno stropní panely ukládat na pružnou podložku pro dosažení útlumu kročejového zvuku. Tento způsob je zobrazen na obrázku č. 10 vlevo. Druhý, méně často používaný způsob se nazývá „Ballon frame“. Tento způsob se používá, pokud jsou stěnové panely průběžné přes více podlaží. Jedná se o připojení stropního panelu ke stěně čelem pomocí ocelových kotev. Ballon frame je zobrazen na obr. č. 10 vpravo. [1]

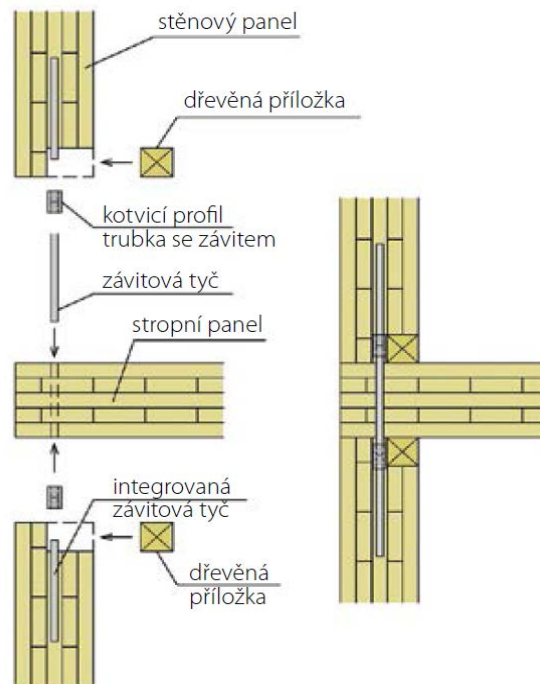


Obrázek 10: Varianty napojení stropních panelů [1]

Používá se ale také celá řada atypických spojů, které jsou potřebné např. při připojení CLT konstrukcí ke konstrukcím na bázi jiného materiálu, nebo pokud je třeba skrytého spoje, který nelze realizovat pomocí běžných spojovacích prostředků. Mezi takové spoje patří např. použití zadlabaných háků (obr. č. 11) nebo závitových tyčí a ocelových trubek, popř systém Rothoblaas (obr. č. 12).



Obrázek 11: Připoj pomocí zadlabaných háků [1]



Obrázek 12: Výše připoj pomocí závitových tyčí a trubek [1], níže systém Rothoblaas [16]

2.7. Mechanické vlastnosti

Určit přesné mechanické vlastnosti dřeva není jednoduché, jelikož se jedná se o ortotropní nehomogenní materiál se přirozeným výskytem lokálních vad. Vlastnosti dřeva nejsou ve všech jeho směrech stejné. Ve směru podélně s vlákny dřevo vyniká výbornou tlakovou únosností, a naopak ve směru kolmém na vlákna dřevo vyniká ohybovou únosností.

Nejpřesnější stanovení mechanických vlastností dřeva se provádí experimentálně. Díky rozdílným vlastnostem tohoto materiálu bylo stanoveno několik pevnostních tříd, pro které byly definovány hodnoty pevností v různých směrech, hodnoty modulů pružnosti, a hodnoty objemové hmotnosti. Tyto hodnoty byly stanovovány ze statistického souboru vzorků za přesně definovaných klimatických podmínek. Mechanickými vlastnostmi dřeva se zabývá norma ČSN EN 408 +A1 (731741). Pevnosti stanovené v této normě jsou hodnoty tzv 5 % kvantilu. To znamená, že pouze 5 % všech zkoušených vzorků dosáhlo menší meze pevnosti oproti uvedené hodnotě, ostatní vzorky dosáhly meze pevnosti vyšší. V praxi to znamená, že např. dřevo pevnostní třídy C24 (číslovka u označení pevnostní třídy dřeva vždy udává charakteristickou hodnotu pevnosti v ohybu) obvykle vykáže pevnost v ohybu třeba i 30 MPa nebo vyšší. [17;18]

V tabulce 2 jsou uvedené pevnostní charakteristiky rostlého dřeva. Tyto charakteristiky se využívají při návrhu konstrukcí z křížem vrstveného dřeva. Je potřeba uvážit, že běžně dochází ke kombinaci pevnostních tříd, jelikož požadavek na pevnost lamel v hlavním směru je větší než požadavek na pevnost lamel ve vedlejším směru. Materiálové charakteristiky průřezu se pak výrazně změní, a to je potřeba zohlednit při návrhu konstrukce.

Tabulka 2: Základní mechanické vlastnosti dřeva dle ČSN 73 2824-1 [19]

Základní mechanické vlastnosti rostlého dřeva					
Vlastnost	Označení	Jednotky	C16 (S7)	C24 (S10)	C30 (S13)
Ohyb	$f_{m,k}$	MPa	16	24	30
Tah	$f_{t,0,k}$	MPa	10	14	18
	$f_{t,90,k}$	MPa	0,5	0,5	0,6
Tlak	$f_{c,0,k}$	MPa	17	21	23
	$f_{c,90,k}$	MPa	2,2	2,5	2,7
Smyk	$f_{v,k}$	MPa	1,8	2,5	3
Modul pružnosti E	$E_{0,mean}$	GPa	8	11	12
	$E_{90,mean}$	GPa	5,4	7,4	8
Modul pružnosti G	G_{mean}	GPa	0,5	0,69	0,75
Hustota	ρ_{mean}	kg/m ³	0,37	0,42	0,46

2.8. Analytické metody výpočtu konstrukcí z křížem vrstveného dřeva

Aktuálně pro návrh konstrukcí z křížem vrstveného dřeva neexistuje žádný jednotný postup stanovený normou. Ovšem existuje několik způsobů, kterými lze tyto konstrukce bezpečně navrhovat. Jednotliví výrobci využívají svých tabulek únosností nebo grafů, které stanovili na základě modifikovaných výpočtů a experimentálních zkoušek. V současné době existují i softwary sloužící přímo k návrhu CLT konstrukcí (např. CLT Designer), nebo je k dispozici rozšíření k obecným statickým softwarům.

Doposud je základním kamenem pro návrh konstrukcí z křížem vrstveného dřeva několik výpočetních postupů. Ty byly získány modifikací již stávajících výpočetních metod fungujících pro jiné typy konstrukcí. Obecně lze říci, že většina výpočetních operací je převzata nebo modifikována z aktuálně platných eurokódů ČSN EN 1990 – Zásady navrhování konstrukcí, ČSN EN 1991 – Zatížení konstrukcí a ČSN EN 1995 – Navrhování dřevěných konstrukcí. [21;24;25]

2.8.1. Modifikovaná Gama metoda

Tato metoda je zde popsána detailněji oproti ostatním, jelikož bude aplikována v 3. části diplomové práce. Metoda vychází z přílohy B eurokódu 5 - ČSN EN 1995-1 Navrhování dřevěných konstrukcí a je založena na teorii lineární pružnosti. Tato metoda je poměrně jednoduchá a zároveň přesná. Nevýhodou ale je závislost průřezových charakteristik na průběhu vnitřních sil. Metoda je nejpřesnější pro prosté nosníky se spojitým zatížením, pro jiné typy nosníků a zatížení (např. bodové síly) je pak chyba v přesnosti do 3 %. [10;21]

Přenos zatížení je uvažován pouze podélnými vrstvami lamel. Příčné vrstvy jsou uvažovány včetně spojovacích prostředků jako součást spoje podélných lamel a jejich modul pružnosti je tedy uvažován rovný nule. Spoje podélných vrstev ale nejsou dokonale tuhé a umožňují prokluz či smykovou deformaci. Zde nastává rozdíl výpočtu lepených a mechanicky spojovaných CLT prvků. U lepených panelů se očekává smyková deformace příčných vrstev vlivem valivého smyku, ale prokluz mezi jednotlivými vrstvami je zabráněn právě slepením těchto vrstev, tudíž bývá minimální a neuvažuje se. U mechanicky spojovaných CLT prvků je situace opačná. Smyková deformace bývá minimální, a tudíž je možno jí za určitých okolností zanedbat. To ale neplatí u prokluzu jednotlivých vrstev, který je rozhodující a nabývá poměrně vysokých hodnot. Jednotlivé mechanické spoje totiž nelze považovat za dokonale tuhé. Dochází k otlacení vrutů do dřeva a také k vytvoření plastických kloubů na vrutech. Spoj se značně deformuje a tím je umožněn prokluz vrstev. [13]

Pro návrh konstrukcí z křížem vrstveného dřeva Gama metodou je třeba stanovit efektivní ohybovou tuhost průřezu EI_{ef} . Ta se vypočte jako:

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (2)$$

- kde: E_i modul pružnosti dané vrstvy
 I_i moment setrvačnosti dané vrstvy
 A_i plocha dané vrstvy
 a_i vzdálenost těžiště dané vrstvy od těžiště průřezu
 γ_i vliv prokluzu mezi podélnými vrstvami

Tuhost spojení mezi jednotlivými podélnými vrstvami je dána součinitelem γ_i . Právě podle tohoto součinitele je metoda pojmenována. Součinitel γ_i je určen na základě poddajnosti příčné vrstvy (vlivem smykové deformace) a poddajnosti mechanických spojovacích prostředků (u lepeného CLT je tato poddajnost rovna nule, jelikož zde tyto prostředky nepoužíváme). Součinitel γ_i se obecně vypočte jako: [13]

$$\gamma_i = \left[1 + \pi^2 E_i A_i \frac{s_i}{(K_i l^2)} \right]^{-1} \quad (3)$$

- kde: l vzdálenost mezi inflexními body momentové čáry
 s_i vzdálenost spojovacích prostředků
 K_i modul prokluzu spojovacího prostředku

Po zahrnutí uvažovaných poddajností do vzorce dostáváme modifikovaný výraz:

$$\gamma_i = \left\{ 1 + \left[\pi^2 E_i A_i \left(\frac{s_{90,i}}{K_{90,i}} + \frac{s_i}{K_i} \right) \frac{1}{l^2} \right] \right\}^{-1} \quad (4)$$

- kde $\frac{s_{90,i}}{K_{90,i}}$ poddajnost příčné vrstvy

- $\frac{s_i}{K_i}$ poddajnost mechanických spojovacích prostředků

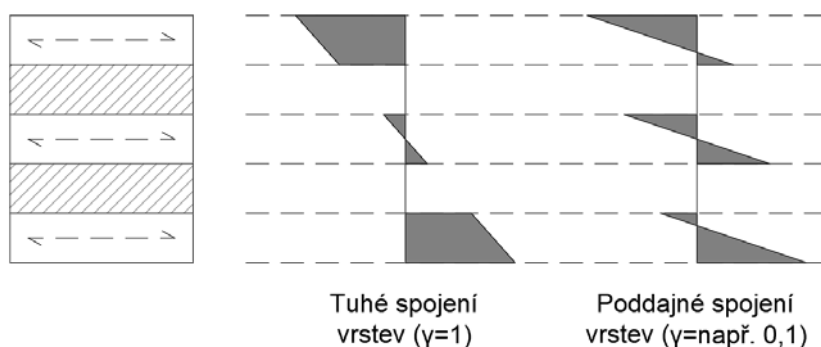
Hodnoty součinitele γ_i se pohybují v rozmezí do 0 do 1, kdy hodnota 1 představuje dokonale tuhý spoj. [13]

Poddajnost příčné vrstvy je ovlivňována deformací způsobenou valivým smykem této vrstvy. Proto poměr $s_{90,i}/K_{90,i}$ nahrazujeme smykovou deformací dle vzorce: [13]

$$\frac{s_{90,i}}{K_{90,i}} = \frac{h_i}{G_r b} \quad (5)$$

- kde: b šířka panelu
 h_i tloušťka příčné vrstvy
 G_r modul pružnosti ve valivém smyku

V momentě, kdy je známa efektivní ohybová tuhost průřezu, se můžou určit normálová napětí. Čím větší je tuhost spojení vrstev efektivního průřezu, tím více průběh napětí v efektivním průřezu odpovídá průběhu napětí plného průřezu (viz obr. 13).



Obrázek 13: Průběh normálových napětí v efektivním průřezu v závislosti na tuhosti spojení efektivních vrstev

Normálové napětí v průřezu se vypočte podle vztahu:

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_{m,i} \quad (6)$$

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{E I_{eff}} \quad (7)$$

$$\sigma_{m,i} = \pm \frac{0,5 E_i h_i M}{E I_{eff}} \quad (8)$$

kde: a_i vzdálenost těžiště konkrétní vrstvy od těžiště celého průřezu

M ohybový moment v konkrétním místě na konstrukci

h_i tloušťka konkrétní vrstvy

Maximální smykové napětí se vyskytují v místech s nulovým normálovým napětím na průřezu, tzn. obvykle v místě neutrální osy.

Maximální smykové napětí se vypočte podle vztahu:

$$\tau_{max} = \frac{\sum E_i S_{y,i}}{E I_{eff} b_{eff}} V \quad (9)$$

kde: $S_{y,i}$ statický moment setrvačnosti konkrétní vrstvy nad neutrální osou

V smyková síla v konkrétním místě na konstrukci

b_{eff} efektivní šířka prvku vypočtená dle vzorce:

$$b_{eff} = k_{cr} b \quad (10)$$

kde: k_{cr} součinitel vlivu trhlin (lepené CLT = 1; mech. spojované CLT = 0,67)

Zatížení spojovacího prostředku se vypočte obecně podle vztahu:

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i}{E I_{eff}} V \quad (11)$$

Pozn.: Aplikování tohoto vztahu na konstrukci z CLT je poměrně složité. Jeho použití proto nedoporučuji, modifikace vzorce by mohla být předmětem dalšího výzkumu.

Pro posouzení mezního stavu použitelnosti se vypočte průhyb na konstrukci dle vztahu modifikovaného pro zkušební těleso z kapitoly 3.

$$w = \frac{F_1 a}{24 E I_{lok}} (3l^2 - 4a^2) + \frac{F_1 a \beta}{GA} \quad (12)$$

kde: F_1 Maximální síla působící na konstrukci (v našem případě $\frac{1}{2} F_{max}$)

l rozpětí prvku

$E I_{lok}$ Lokální ohybová tuhost zkušební tělesa

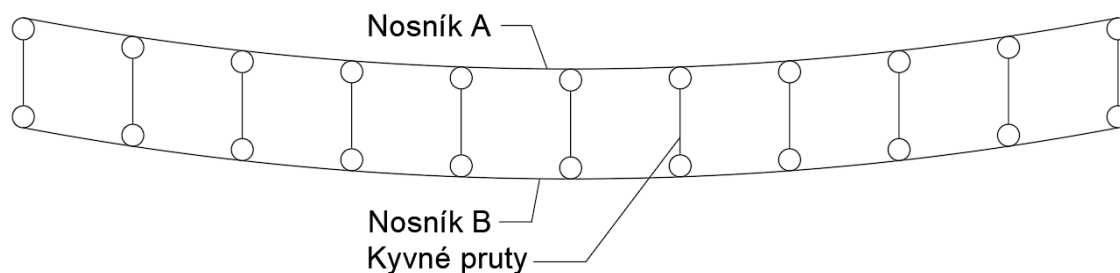
a vzdálenost působící síly od podpory

$\frac{\beta}{GA}$ převrácená hodnota smykové tuhosti

2.8.2. Metoda smykové analogie

Tato výpočetní metoda je velmi přesná, ale také poměrně složitá a neobejde se bez použití statického softwaru. Uvažuje se i s příčnými vrstvami a jejich schopností přenášet zatížení. Použití je velmi univerzální, metodou smykové analogie se můžou navrhovat v podstatě veškeré konstrukční typy CLT nehladě na to, zda jsou lepené, či mechanicky spojované. [10]

Metoda smykové analogie uvažuje rozdílné hodnoty modulu pružnosti v ohybu a ve smyku pro jednotlivé vrstvy. Hlavním principem je rozdělení panelu do dvou virtuálních nosníků, které se můžou označit např. A a B. První nosník (A) představuje vlastní ohybovou pevnost jednotlivých vrstev podél jejich neutrálních os. Druhý nosník (B) představuje Steinerovy doplňky, smykovou pevnost panelu a pružnost spojení vrstev. Nosníky jsou vzájemně spojeny nekonečně tuhými kyvnými pruty, jelikož je třeba zajistit stejnou deformaci obou nosníků. Spojením těchto nosníků se dostanou vlastnosti plnohodnotného průřezu. [13]



Obrázek 14: Náhradní konstrukce složená z nosníků A a B

Efektivní ohybová tuhost průřezu se vypočte dle vztahu:

$$EI_{eff} = EI_A + EI_B \quad (13)$$

Ohybová tuhost nosníku A reprezentuje ohybovou tuhost všech vrstev dle vztahu:

$$EI_A = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} \quad (14)$$

Ohybová tuhost nosníku B reprezentuje Steinerovy doplňky všech vrstev dle vztahu:

$$EI_B = \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i \quad (15)$$

- kde: z_i vzdálenost těžiště konkrétní vrstvy od těžiště celého průřezu
 A_i plocha konkrétní vrstvy
 h_i tloušťka konkrétní vrstvy
 b_i šířka konkrétní vrstvy
 E_i modul pružnosti konkrétní vrstvy (u podélných vrstev se uvažuje hodnota $E_{0,mean}$; u příčných vrstev se uvažuje hodnota $E_{90,mean}$. V případech, kdy k sobě lamely nejsou na boku slepené, se předpokládá, že tyto vrstvy nejsou schopné v příčném směru přenášet normálové napětí. Uvažovaný modul pružnosti je v takových případech $E_{90,mean} = 0$ MPa.

Nosník A se uvažuje jako smykově nekonečně tuhý: $GA = \infty$.

Nosník B reprezentuje také smykovou tuhost a tuhost spojení vrstev, jejíž převrácená hodnota se určí dle vztahu:

$$\frac{1}{GA_B} = \frac{1}{a^2} \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{k_i} + \frac{h_1}{2G_1 b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} + \frac{h_n}{2G_n b_n} \right] \quad (16)$$

- kde: a_i vzdálenost těžišť obou krajních vrstev
 k_i tuhost mechanického spoje
 h_i tloušťka konkrétní vrstvy
 b_i šířka konkrétní vrstvy
 G_i modul pružnosti ve smyku konkrétní vrstvy (u podélných vrstev se uvažuje hodnota modulu pružnosti ve smyku podélně s vlákny G_{mean} , u příčných vrstev se uvažuje hodnota modulu pružnosti ve valivém smyku $G_{r,mean}$.)

Pozn.: index 1 znamená uvažování hodnot první vrstvy, index n znamená uvažování hodnot poslední vrstvy.

Tuhost mechanických spojů se vypočte dle vztahu:

$$k_i = \frac{n_i K_i}{s_i} \quad (17)$$

kde: s_i vzdálenost spojovacích prostředků (ve směru pnutí)

n_i počet řad spojovacích prostředků na šířku prvku

K_i modul prokluzu jednoho spojovacího prostředku (pro mezní stav únosnosti se uvažuje hodnota $K_i = K_u$, pro mezní stav použitelnosti se uvažuje hodnota $K_i = K_{ser}$; hodnoty těchto modulů se určí dle ČSN EN 1995-1-1)

Potřebné vnitřní síly v konkrétních vrstvách se vypočítají dle vztahů:

$$M_{A,i} = \frac{E_i I_i}{E I_A} M_A \quad (18)$$

$$V_{A,i} = \frac{E_i I_i}{E I_A} V_A \quad (19)$$

$$N_{B,i} = \frac{E_i A_i z_i}{E I_B} M_B \quad (20)$$

kde: z_i vzdálenost těžiště konkrétní vrstvy od těžiště celého průřezu

M_A ohybový moment na nosníku A

M_B ohybový moment na nosníku B

V_A posouvající síla na nosníku A

Ve chvíli, kdy jsou známé vnitřní síly působící v jednotlivých vrstvách, je možné dopočítat v těchto vrstvách normálové a smykové napětí dle vztahů:

$$\sigma_{A,i} = \pm \frac{M_{A,i} h_i}{I_i} \quad (21)$$

$$\tau_{A,i} = 1,5 \frac{V_{A,i}}{b_i h_i} \quad (22)$$

$$\sigma_{B,i} = \frac{N_{B,i}}{b_i h_i} \quad (23)$$

$$\tau_{B,i+1} = \frac{V_B}{b_i E I_B} \sum_{j=i+1}^n E_j A_j z_j \quad (24)$$

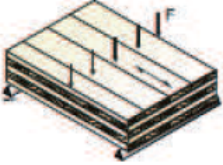
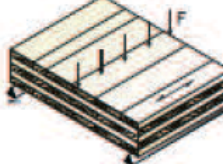

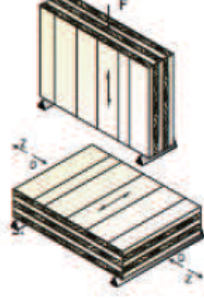
Sečtením normálových a smykových napětí z nosníků A a B se dostane celkové normálové a smykové napětí na plnohodnotném průřezu:

$$\sigma_i = \sigma_{A,i} + \sigma_{B,i} \quad (25)$$

$$\tau_i = \tau_{A,i} + \tau_{B,i+1} \quad (26)$$

2.8.3. Metoda kompozitní teorie (K-metoda)

Tato metoda je naopak oproti smykové analogii velmi jednoduchá, její použití je ale omezené. Pro návrh konstrukcí touto metodou se totiž používají tabulky obsahující jen několik statických schémat. K-metoda je proto ideální pomůckou pro jednoduché ověření správnosti návrhu konstrukcí pomocí složitějších metod. Při výpočtu se zanedbává smyková deformace prvku a napětí se počítá na průřezových charakteristikách celého průřezu, do kterého se neuvažuje vliv působení příčných vrstev. Tato zjednodušení pak nahrazuje součinitel k_i , kterým se upravují materiálové vlastnosti dřeva. Tento součinitel lze vyčíst z tabulek statických schémat, ilustrovanými na obr. 15. [10;13]

zatížení	k_i
	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$

Obrázek 15: Statická schémata s přiřazením jednotlivých koeficientů k_i [10]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Z různých experimentálních analýz je známo, že při zatížení a následné deformaci zkušební tělesa z křížem vrstveného dřeva dojde mezi mechanicky spojenými lamelami buď k jejich vzájemnému natočení, nebo posunu (prokluzu vrstev). Způsob deformace závisí na geometrii zkušební tělesa a způsobu jeho zatížení. Problematika deformace natočením je již zpracována Ing. Lukášem Velebitem, Ph.D. v jeho disertační práci. [11] Problematika vzájemného prokluzu v jednom směru však doposud zpracována není, proto jsem se rozhodl experimentální část diplomové práce věnovat právě tomuto tématu a přispět do ní určitým poznatkem. K názorné ukázce prokluzu jednotlivých vrstev dochází např. při ohybové zkoušce mechanicky spojovaných stropních panelů z křížem vrstveného dřeva.

3.1. Experimentální stanovení smykové únosnosti CLT panelů při zatížení aplikovaném kolmo k rovině panelu

Na UCEEB ČVUT proběhla série experimentů zaměřená na stanovení únosnosti a chování mechanicky spojovaných zkušebních těles z křížem vrstveného dřeva. Zkušební tělesa představovala různé konstrukční části stavby (stěnové panely, stropní panely, překlady atp..) a lišila se geometrií a počtem vrstev (3 a 5). Každý typ zkušební tělesa byl zastoupen šesti vzorky, aby bylo možné udělat statistické vyhodnocení. Stanovení smykové únosnosti stropních CLT panelů je příklad jednoho ze série těchto experimentů.

3.1.1. Předmět zkoušky a identifikační údaje

Hlavním předmětem zkoušky je stanovení lokální smykové únosnosti a smykové tuhosti šesti třívrstevých a šesti pětivrstevých zkušebních těles tvořených panely z mechanicky spojovaného křížem vrstveného dřeva.

Označení zkušebních těles:

Třívrstvé: 3L01-3L06

Pětivrstvé: 5L01-5L06

Datum provedení zkoušek a klimatické podmínky:

Zkušební těleso 3L-01: 14. 10. 2022; teplota vzduchu 22,4 °C, rel. vlhkost vzduchu 52 %

Zkušební těleso 3L-02: 15. 10. 2022; teplota vzduchu 22,2 °C, rel. vlhkost vzduchu 51 %

Zkušební těleso 3L-03: 15. 10. 2022; teplota vzduchu 22,2 °C, rel. vlhkost vzduchu 51 %

Zkušební těleso 3L-04: 16. 10. 2022; teplota vzduchu 22,5 °C, rel. vlhkost vzduchu 48 %

Zkušební těleso 3L-05: 16. 10. 2022; teplota vzduchu 22,5 °C, rel. vlhkost vzduchu 48 %

Zkušební těleso 3L-06: 16. 10. 2022; teplota vzduchu 22,5 °C, rel. vlhkost vzduchu 48 %

Zkušební těleso 5L-01: 17. 10. 2022; teplota vzduchu 22,5 °C, rel. vlhkost vzduchu 48 %

Zkušební těleso 5L-02: 17. 10. 2022; teplota vzduchu 22,5 °C, rel. vlhkost vzduchu 51 %

Zkušební těleso 5L-03: 18. 10. 2022; teplota vzduchu 22,6 °C, rel. vlhkost vzduchu 51 %

Zkušební těleso 5L-01: 18. 10. 2022; teplota vzduchu 22,6 °C, rel. vlhkost vzduchu 51 %

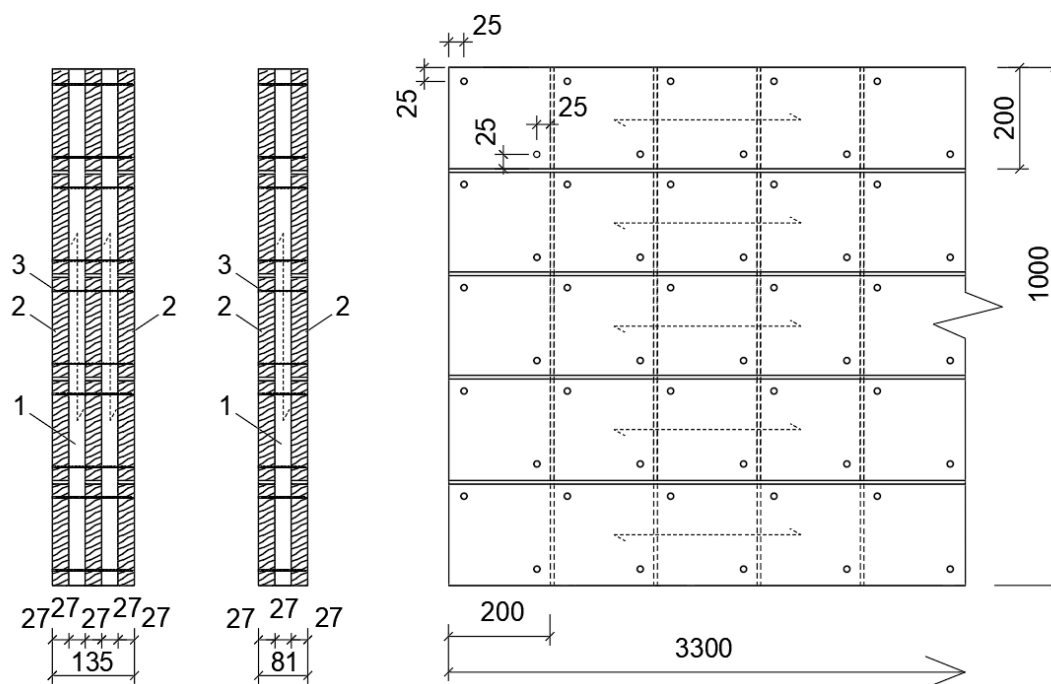
Zkušební těleso 5L-02: 18. 10. 2022; teplota vzduchu 22,6 °C, rel. vlhkost vzduchu 51 %

Zkušební těleso 5L-03: 18. 10. 2022; teplota vzduchu 22,6 °C, rel. vlhkost vzduchu 51 %

3.1.2. Specifikace zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena v prostorách objednatele a dodána do zkušební laboratoře již zkompletovaná. Tělesa byla ke zkoušce dodána bez vizuálně pozorovatelných vad a poškození, které by mohly negativně ovlivnit stanovení zkoumaných parametrů.

Třívrstvé panely o rozměru 1 000 x 81 x 3 300 mm a pětivrstvé panely o rozměru 1 000 x 135 x 3 300 mm byly vyrobeny z jehličnatého dřeva a byly tvořeny lamelami tloušťky 27 mm a šířky 200 mm. Šířka spár mezi lamelami se pohybovala mezi 0 a 2 mm. Liché vrstvy byly orientovány ve směru rozpětí, sudé vrstvy k nim byly orientovány kolmo. Pro spojení vrstev bylo v každém křížení lamel použito dvou celozávitových pozinkovaných vrutů Würth 5 x 80 mm s diagonálními roztečemi 200 mm, uspořádaných dle schématu na obr. 16.



Obrázek 16: Schéma geometrie zkušebních těles

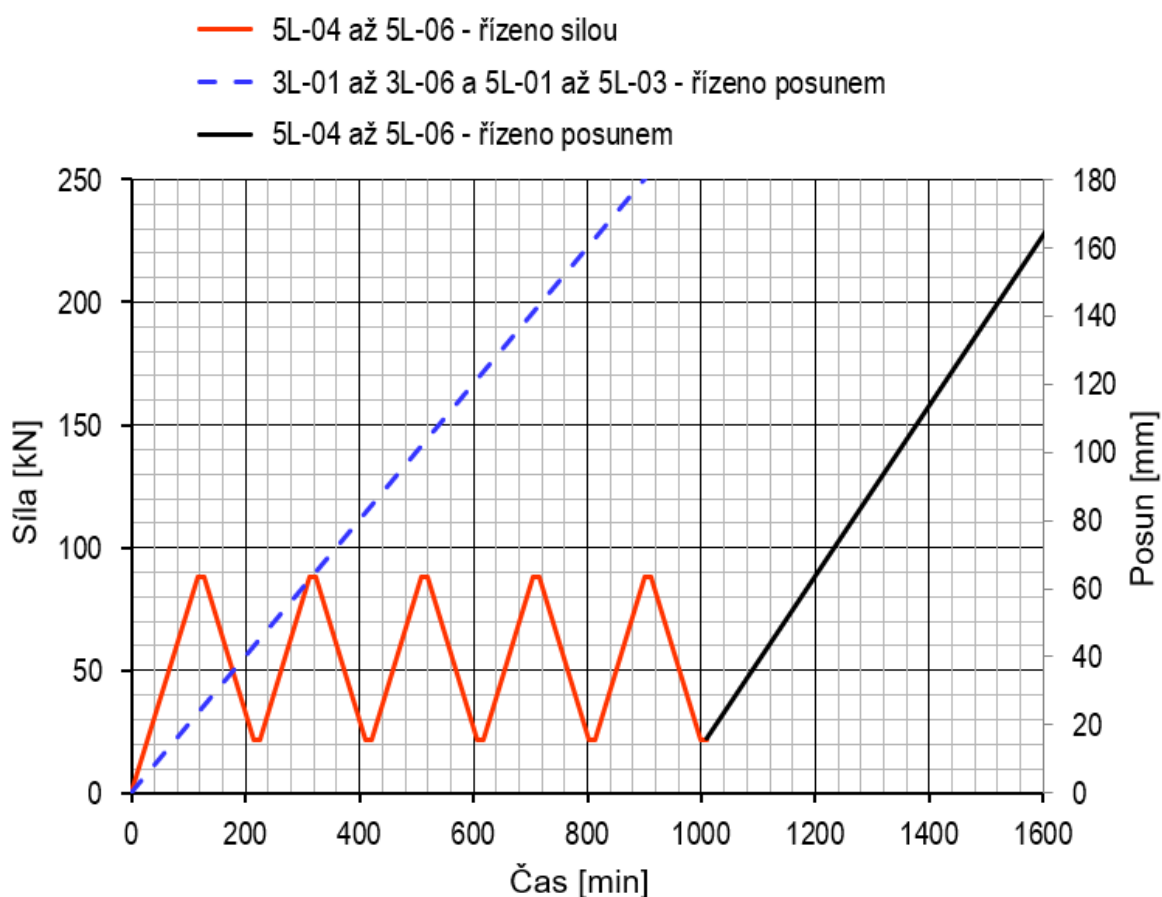
Legenda:

- 1 – příčná vrstva lamel
- 2 – podélná vrstva lamel
- 3 – spojovací prostředek

3.1.3. Popis a uspořádání zkoušky

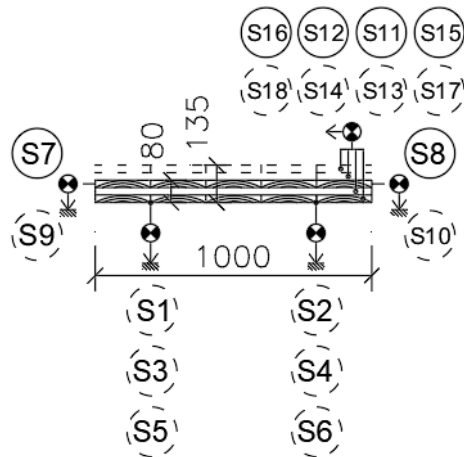
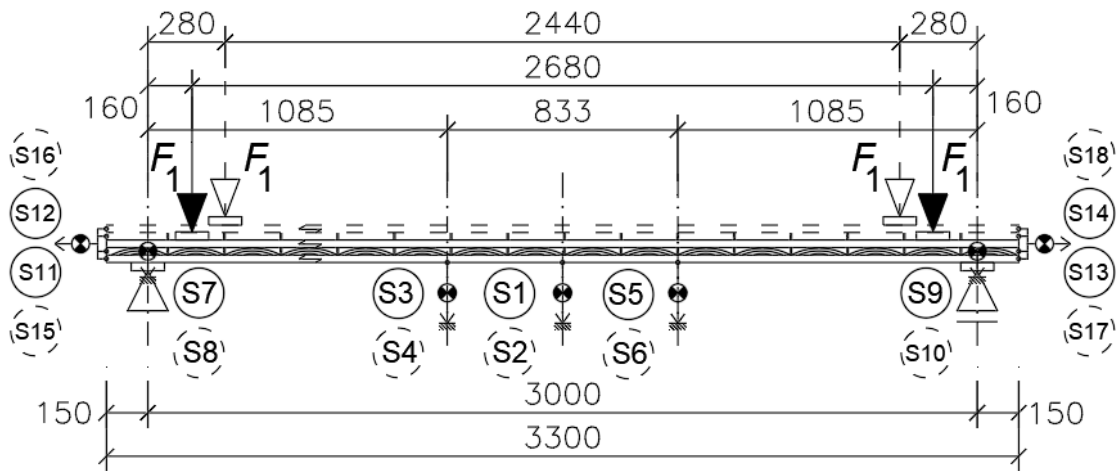
Smyková zkouška pro stanovení smykové únosnosti a tuhosti CLT panelů byla provedena dle zkušební normy ČSN EN 408+A1 (73 1741). Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností. [17]

Zkušební tělesa byla zatěžována ohybem symetricky dvěma břemeny umístěnými blízko podpor tak, aby v panelu nastalo maximální možné smykové napětí. Rozpětí panelu 3 000 mm, vzdálenost břemen u třívrstvých panelů 2680 mm, u pětivrstvých panelů 2440 mm. Zkušební tělesa byla při zkoušce prostě podepřena. Zatížení bylo vnášeno hydraulickým válcem s maximální silou 630 kN. Zatížení bylo přenášeno přes ocelové roznášedlo složené ze dvou svařovaných U profilů (výška 345 mm, šířka pásnice 160 mm, tloušťka pásnic a stojiny 25 mm) a ocelová válcová ložiska. Zatěžování zkušebních těles probíhalo podle schématu na obr. 17. Zatěžování zkušebních těles 3L-01 až 3L-06 a 5L-01 až 5L-03 bylo řízeno posunem s konstantní rychlostí 0,2 mm/sec. Zatěžování zkušebních těles 5L-04 až 5L-06 bylo ve fázi cyklického zatěžování řízeno silou s konstantní rychlostí 0,75 kN/sec a po dokončení cyklického zatěžování bylo řízeno posunem s konstantní rychlostí 0,25 mm/sec. [17]

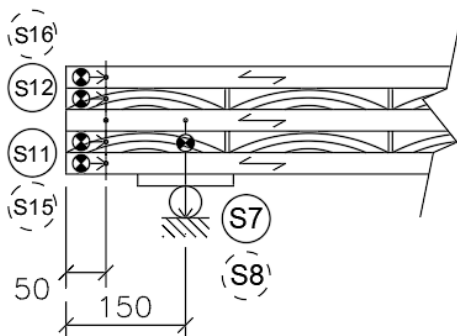


Obrázek 17: Zatěžovací schéma zkušebních těles

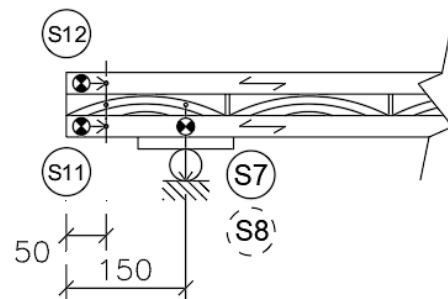
V průběhu zkoušek bylo kontinuálně zaznamenáváno působící zatížení a také deformace zkušebních těles v bodech S1-S18, definovaných v kap. 3.1.4. a na obr. 18.



Detail v místě podpory
- pětivrstvý panel



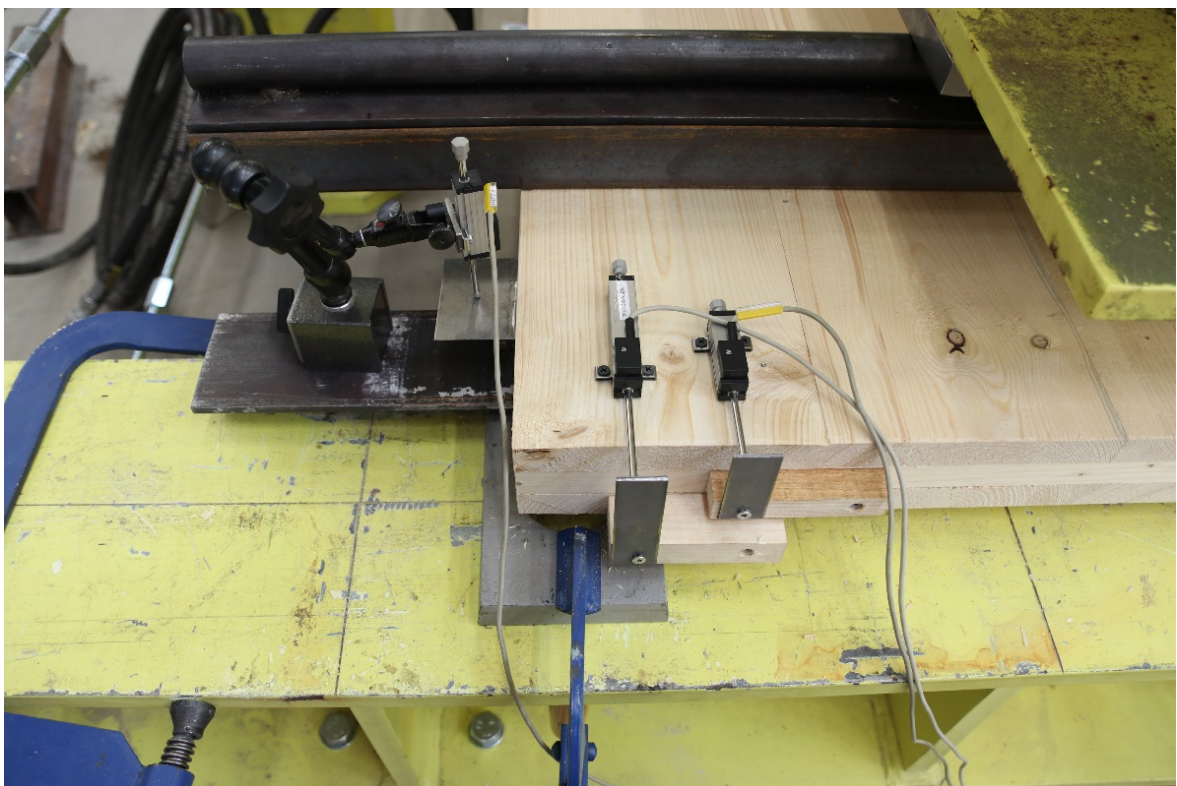
Detail v místě podpory
- třívrstvý panel



Obrázek 18: Schéma rozložení zkoušky



Obrázek 19: Uspořádání zkoušky v laboratoři



Obrázek 20: Umístění kloubových podpor a TR snímačů měřících prokluz vrstev a otačení podpory



Obrázek 21: Umístění lankových WDS snímačů měřících svislý průhyb zkušebního tělesa

3.1.4. Použité zkušební zařízení a sledované veličiny

Při statické zatěžovací zkoušce byla použita měřicí linka složená z následujících komponent:

- měřicí ústředna DEWE -51-USB-2-16, vč. soft. DEWESoft 6.3;
- válec INOVA AHS 630-130 s lineárním pohonem a horním hydrostatickým ložiskem, siloměr GTM RF - 630 (2), Snímač polohy DGO 300 mm/0,25 %;
- pružinový potenciometrický snímač dráhy TR0025, měřicí rozsah 25 mm;
- pružinový potenciometrický snímač dráhy TR0050, měřicí rozsah 50 mm;
- pružinový potenciometrický snímač dráhy TR0075, měřicí rozsah 75 mm;
- lankový snímač WDS-300.

Použitá měřicí ústředna DEWE je 32-kanálové elektronické měřicí zařízení, jehož výrobcem je firma Dewetron. Tato ústředna v sobě má zabudovaný počítač, který pomocí softwaru Dewesoft zpracovává zaznamenané signály připojených snímačů, a také polohu a sílu na válci. Software je pro potřeby prováděných experimentů standardně nastaven k zaznamenávání 10 hodnot za sekundu. Ústředna umožňuje dle počtu vstupních kanálů zaznamenávat až 32 hodnot najednou. Získané údaje jsou nahrávány přímo na pevný disk a je možné je po dokončení zkoušky exportovat např. do excelového formátu xlsx.

Použitý hydraulický válec INOVA disponuje zatěžovacím rozsahem 0-630 kN, přičemž se dá zatěžovat jak tlakem, tak tahem. Maximální posun tohoto válce je 300 mm. Ovládání je řízeno softwarem INOVA, který je instalován v externím notebooku. Ten komunikuje s válcem skrz LAN kabel připojený do centrální stanice.

Odezva prvku na zatěžovací síly byla měřena v následujících bodech (viz obr. 18):

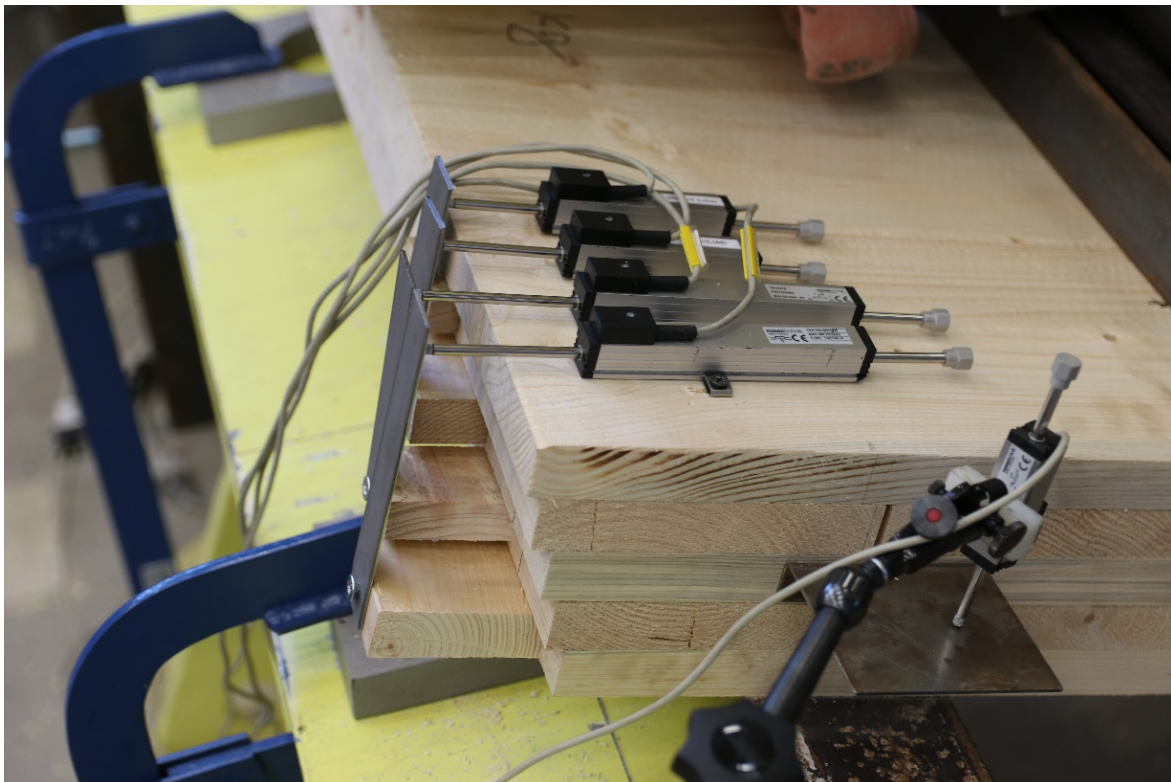
- bod S1 – svislá deformace na spodní straně při levé hraně uprostřed rozpětí (snímač WDS-300);
- bod S2 – svislá deformace na spodní straně při pravé hraně uprostřed rozpětí (snímač WDS-300);
- bod S3 – svislá deformace na spodní straně při levé hraně v 5/18 rozpětí (snímač WDS-300);
- bod S4 – svislá deformace na spodní straně při pravé hraně v 5/18 rozpětí (snímač WDS-300);
- bod S5 – svislá deformace na spodní straně při levé hraně v 5/18 rozpětí (snímač WDS-300);
- bod S6 – svislá deformace na spodní straně při pravé hraně v 5/18 rozpětí (snímač WDS-300);
- bod S7 – svislá deformace na boční straně v neutrální ose v místě podpory (snímač TR0025);
- bod S8 – svislá deformace na boční straně v neutrální ose v místě podpory (snímač TR0025);
- bod S9 – svislá deformace na boční straně v neutrální ose v místě podpory (snímač TR0025);
- bod S10 – svislá deformace na boční straně v neutrální ose v místě podpory (snímač TR0025).
- bod S11 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a sousední spodní lamelou.
- bod S12 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a sousední svrchní lamelou.
- bod S13 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a sousední spodní lamelou.
- bod S14 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a sousední svrchní lamelou.
- bod S15 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a krajní spodní lamelou.
- bod S16 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a krajní svrchní lamelou.
- bod S17 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a krajní spodní lamelou.
- bod S18 – vodorovná deformace na čelní straně mezi středovou a krajní svrchní lamelou.

Deformace v bodech S11-S18 byly měřeny vůči krajní svrchní vrstvě lamel a naměřené hodnoty byly přepočítány tak, aby byly ekvivalentní k popisu výše. Deformace od svrchu druhé a třetí vrstvy lamel byly měřeny pomocí snímačů TR0050, deformace od svrchu čtvrté a páté vrstvy lamel byly měřeny pomocí snímačů TR0075.

3.1.5. Způsob porušení zkušebních těles

Chování všech dvanácti zkoumaných zkušebních těles v průběhu zatěžování včetně způsobu jejich porušení bylo velmi podobné.

S narůstající svislou deformací při zatěžování postupně docházelo k vzájemnému jednosměrnému prokluzu jednotlivých vrstev lamel v důsledku otláčování vláken dřeva osazenými spojovacími prostředky a jejich deformací. Otláčování vláken probíhalo pouze ve směru těchto prokluzů, tedy v podélném směru panelů. Diagonální rozmístění spojovacích prostředků nemělo na směr prokluzu/otlačení žádný vliv. Velikost prokluzu se lineárně zvětšovala směrem k čelnímu okraji panelů. U těchto okrajů byly spojovací prostředky namáhány nejvíce a s narůstajícím zatížením na nich docházelo k vytváření plastických kloubů a k jejich následnému porušení. V okamžiku porušení spojovacího prostředku se zatížení přeneslo na další spoj v pořadí směrem ke středu panelu a způsob porušení se opakoval. Porušení dřevěných lamel nastávalo pravidelně v místech působení zatížení, a to při spodním povrchu panelu. I přesto, že zkouška byla koncipována jako smyková, porušení lamel nastávalo dosažením pevnosti v tahu za ohybu. Z tohoto poznatku lze usuzovat, že smyková únosnost panelů z křížem vrstveného dřeva je mnohem větší než únosnost ohybová.



Obrázek 22: Prokluz jednotlivých vrstev a jeho měření pomocí TR snímačů



Obrázek 23: Ukázka porušení třívrstvého panelu



Obrázek 24: Ukázka porušení třívrstvého panelu



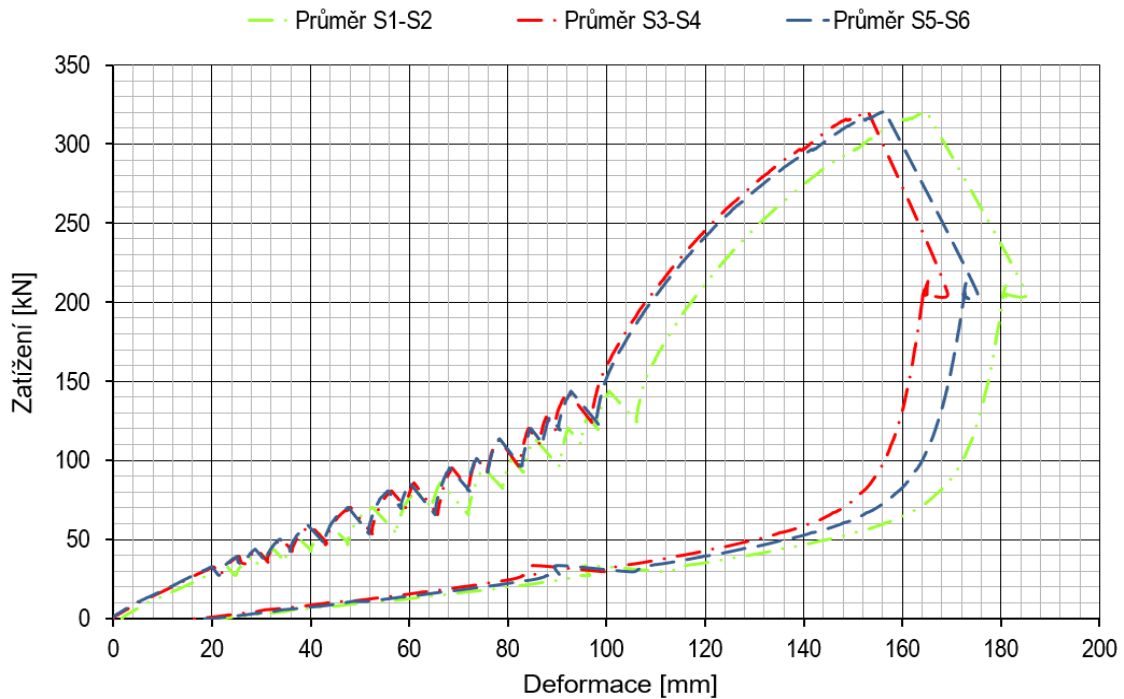
Obrázek 25: Ukázka porušení pětivrstvého panelu



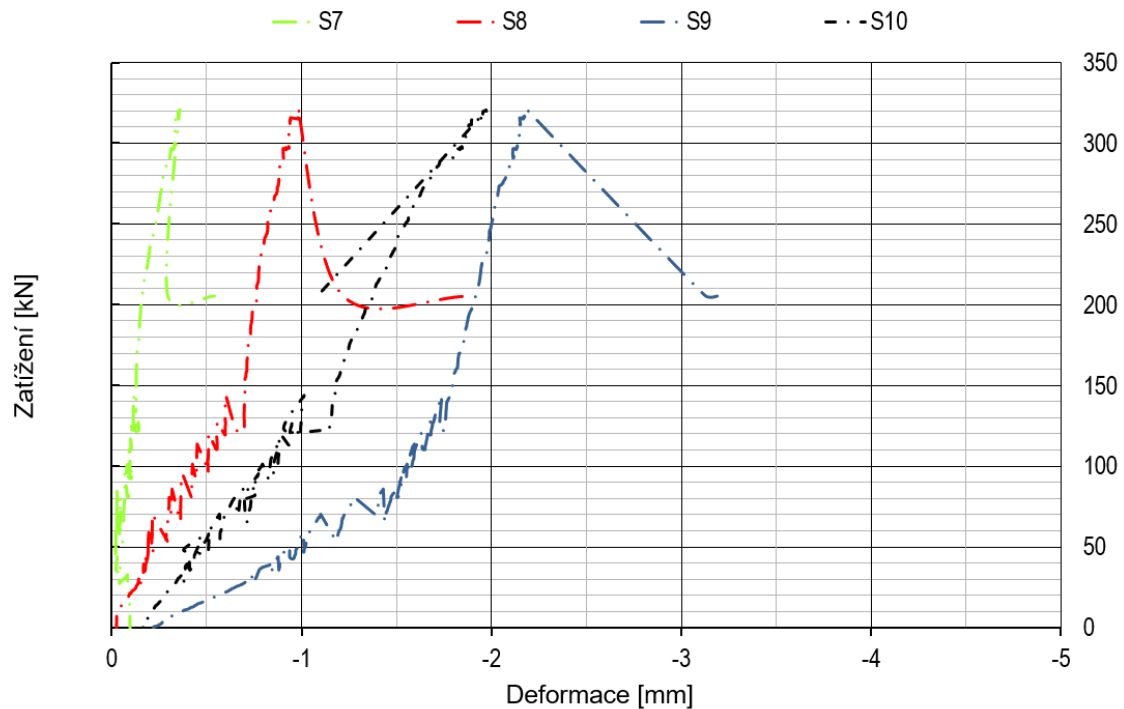
Obrázek 26: Ukázka porušení pětivrstvého panelu

3.1.6. Vyhodnocení získaných dat

Závislost deformací a zatížení panelů 3L-01 až 3L-06 je zobrazena na obr. 27 až obr. 38. Závislost deformací a zatížení panelů 5L-01 až 5L-06 je zobrazena na obr. 39 až obr. 50. Jednotlivé křivky zobrazené v grafech odpovídají poloze snímačů, uvedených na obr. 18.



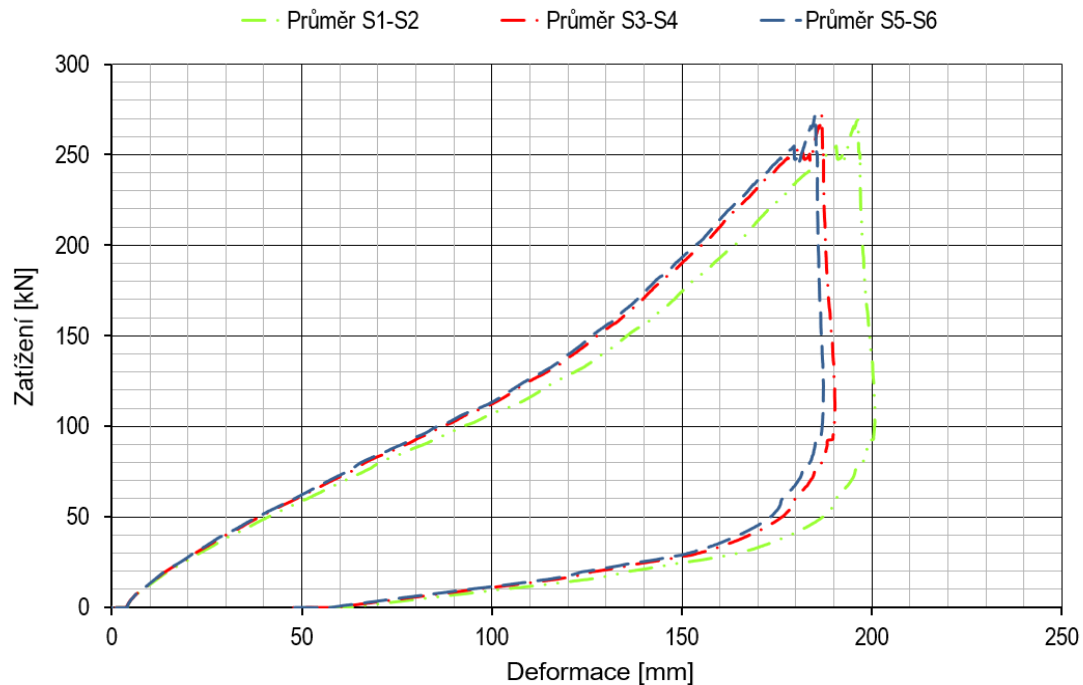
Obrázek 27: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-01 (snímače S1 – S6)



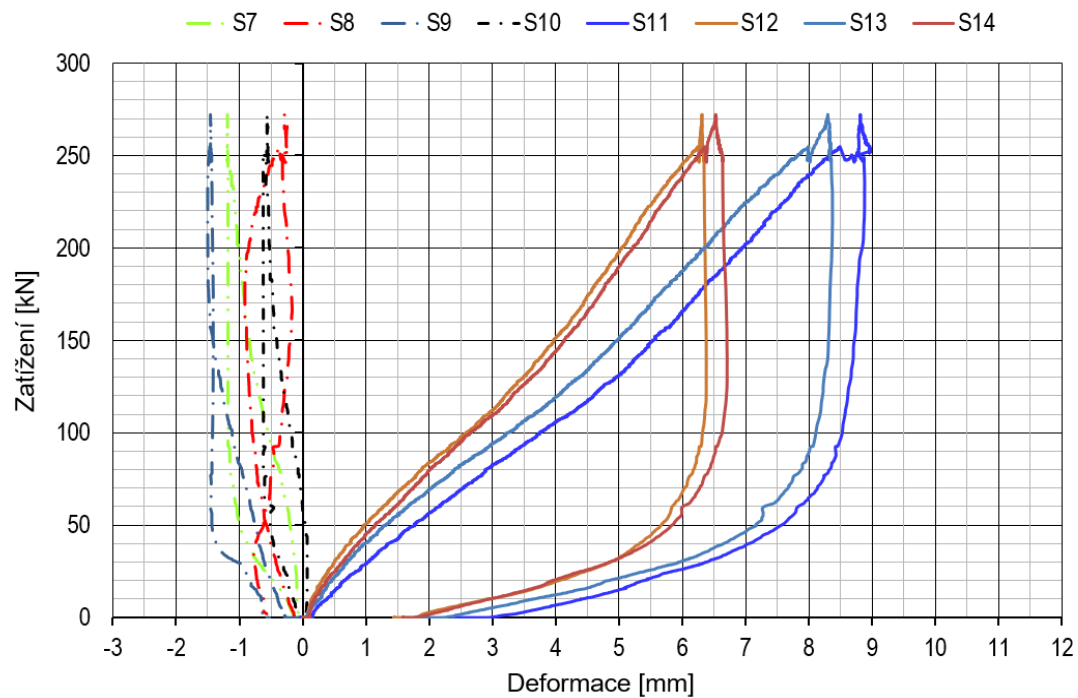
Obrázek 28: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-01 (snímače S7 – S10)

Při zkoušce prvního vzorku třívrstvého panelu nebylo provedeno měření deformací v bodech S11-S14. U všech dalších panelů již tyto deformace měřeny byly.

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-01 je $F_{3L-01,max} = 324,8$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,3L-01,max} = 162,4$ kN.

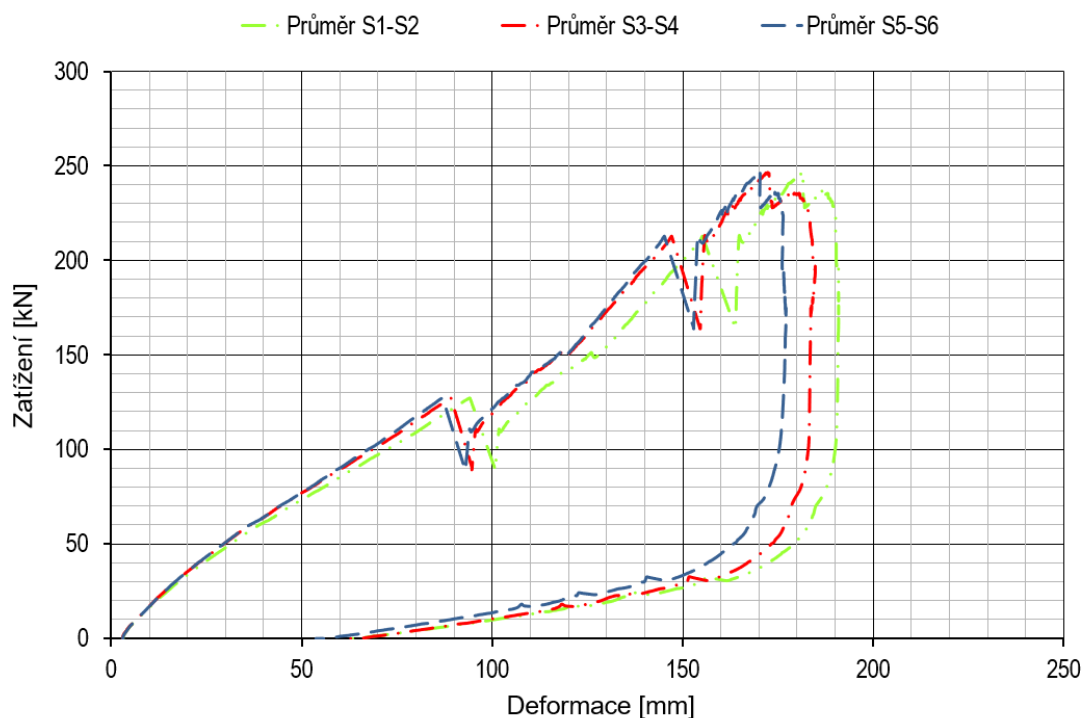


Obrázek 29: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-02 (snímače S1 – S6)

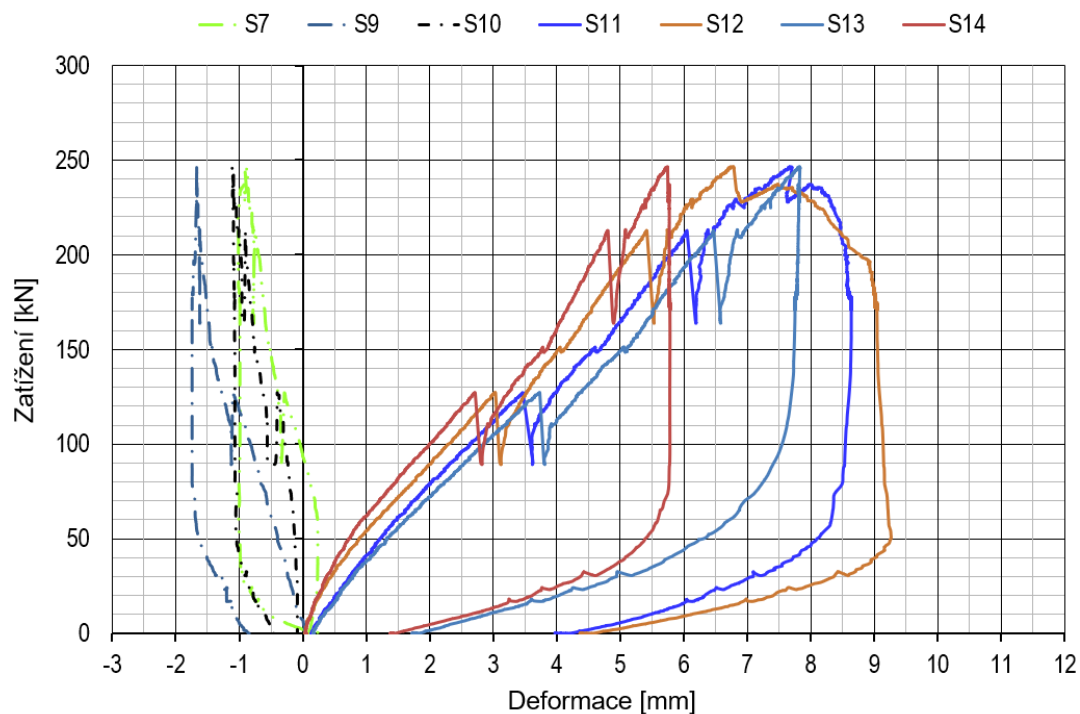


Obrázek 30: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-02 (snímače S7 – S14)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-02 je $F_{3L-02,max} = 279,97 \text{ kN}$, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,3L-02,max} = 139,99 \text{ kN}$.

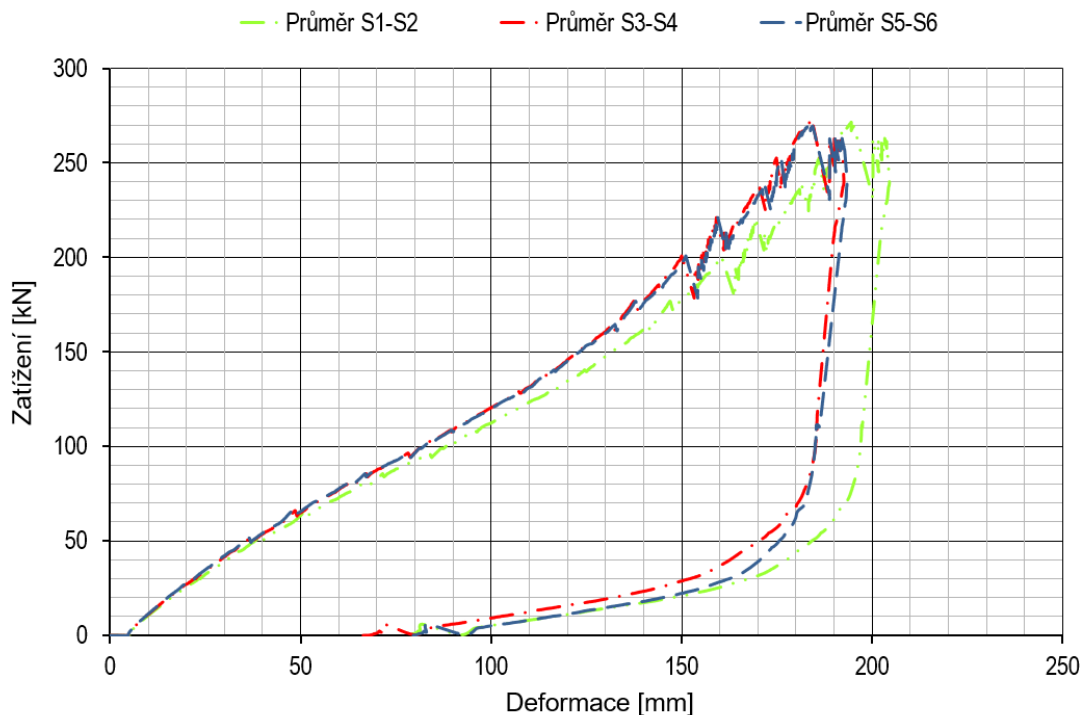


Obrázek 31: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-03 (snimače S1 – S6)

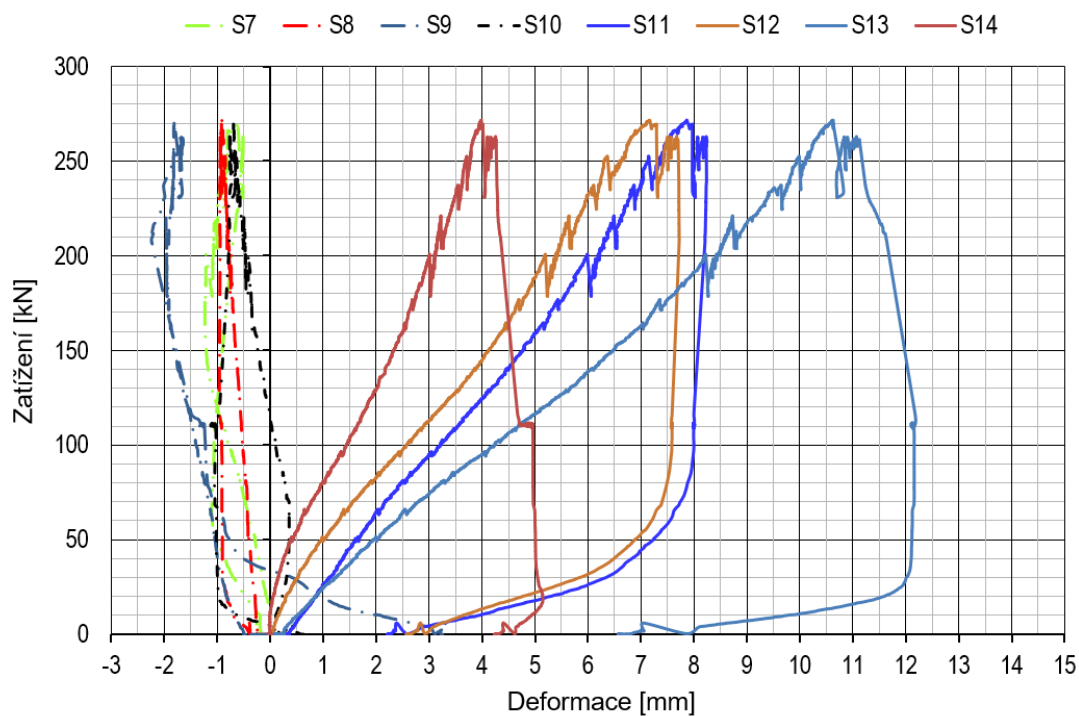


Obrázek 32: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-03 (snimače S7 – S14; S8 vyřazeno)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-03 je $F_{3L-03,max} = 254,33 \text{ kN}$, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,3L-03,max} = 127,16 \text{ kN}$.

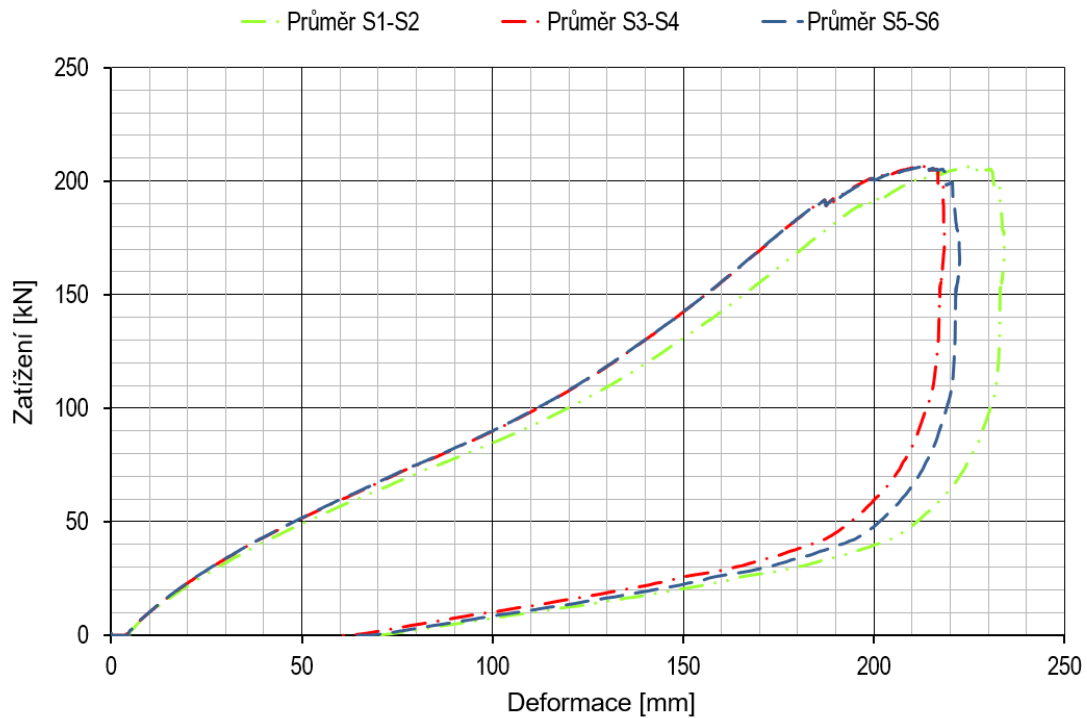


Obrázek 33: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-04 (snimače S1 – S6)

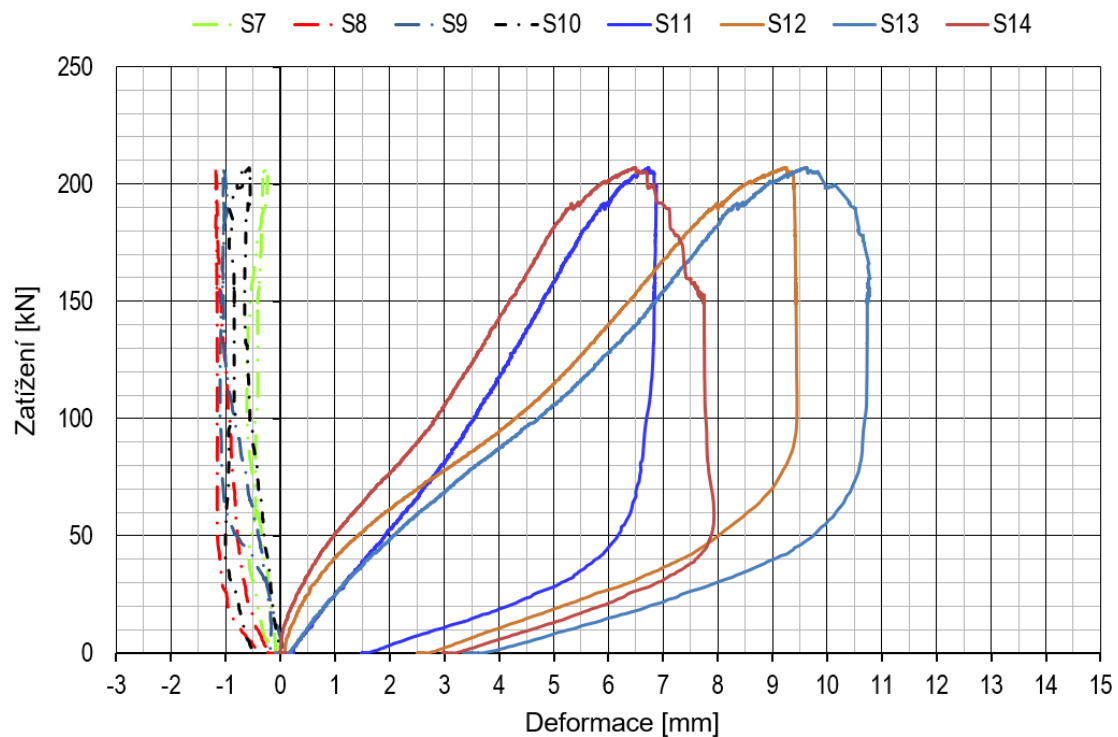


Obrázek 34: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-04 (snimače S7 – S14)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-04 je $F_{3L-04,max} = 279,34$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,3L-04,max} = 139,67$ kN.

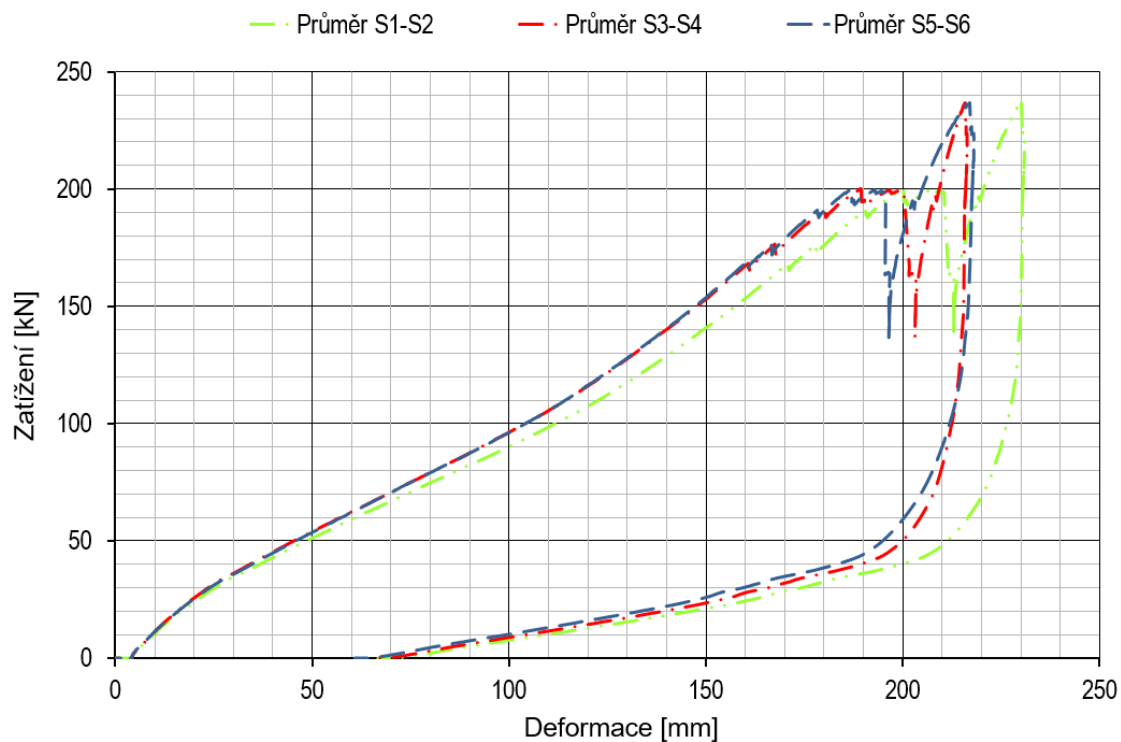


Obrázek 35: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-05 (snímače S1 – S6)

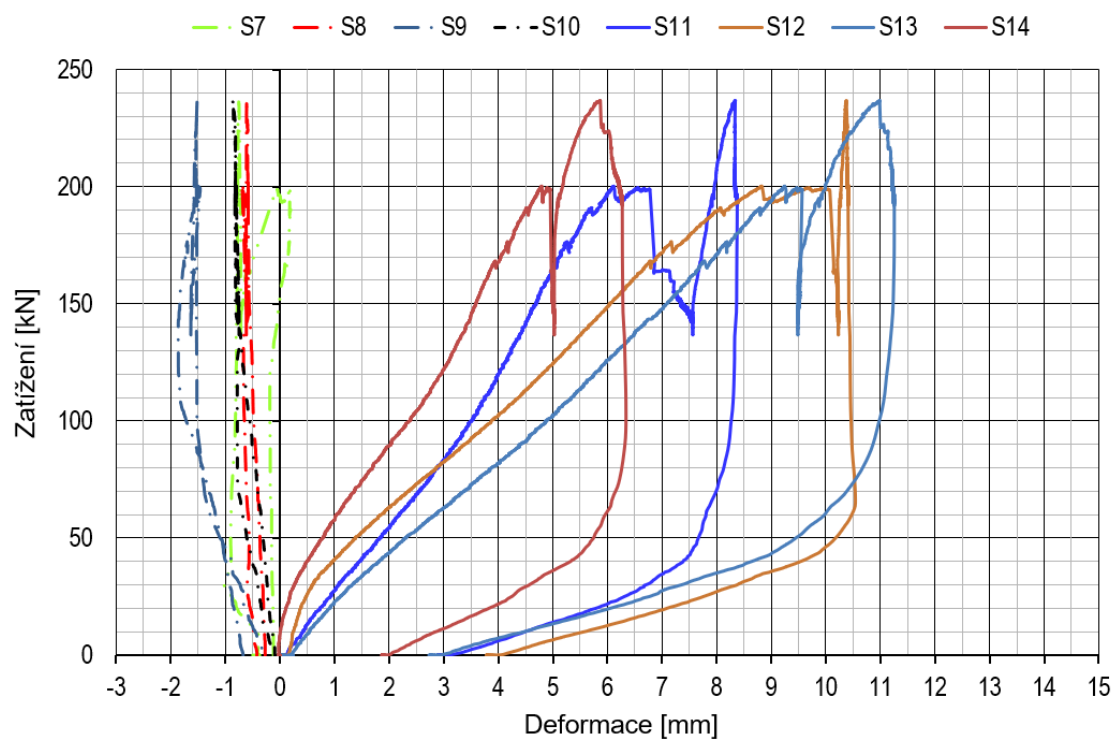


Obrázek 36: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-05 (snímače S7 – S14)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-05 je $F_{3L-05,max} = 214,73$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,3L-05,max} = 107,37$ kN.

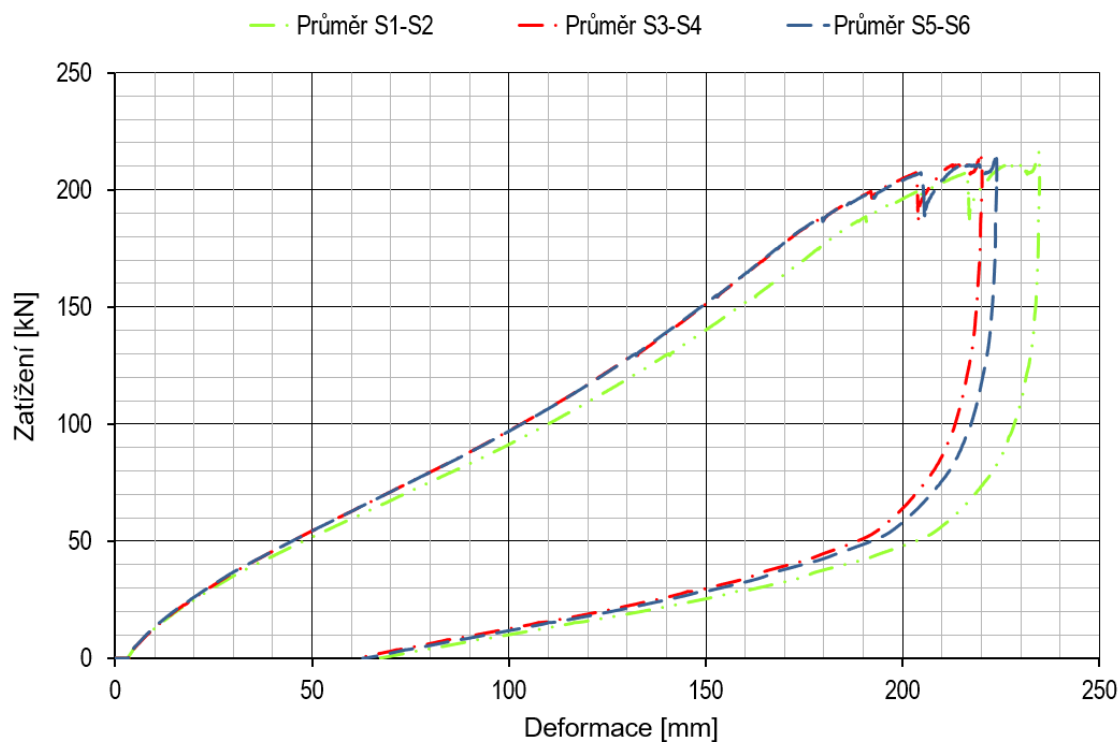


Obrázek 37: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-06 (snímače S1 – S6)

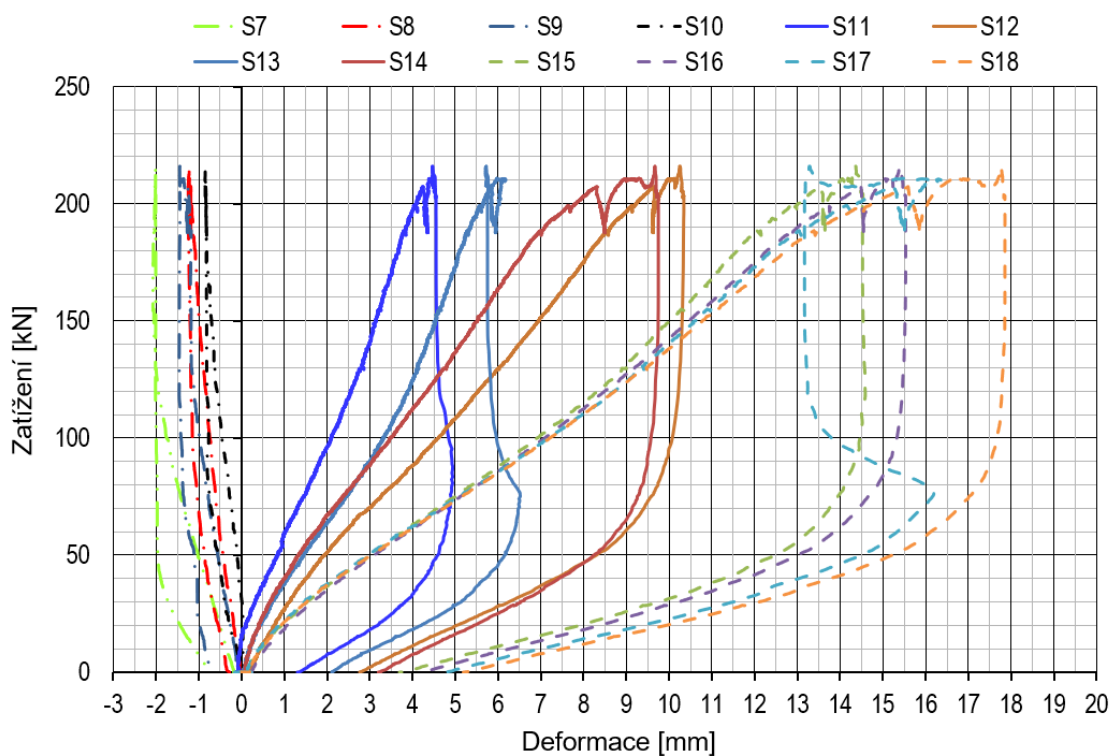


Obrázek 38: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-06 (snímače S7 – S14)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-06 je $F_{3L-06,max} = 244,57$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,3L-06,max} = 122,29$ kN.

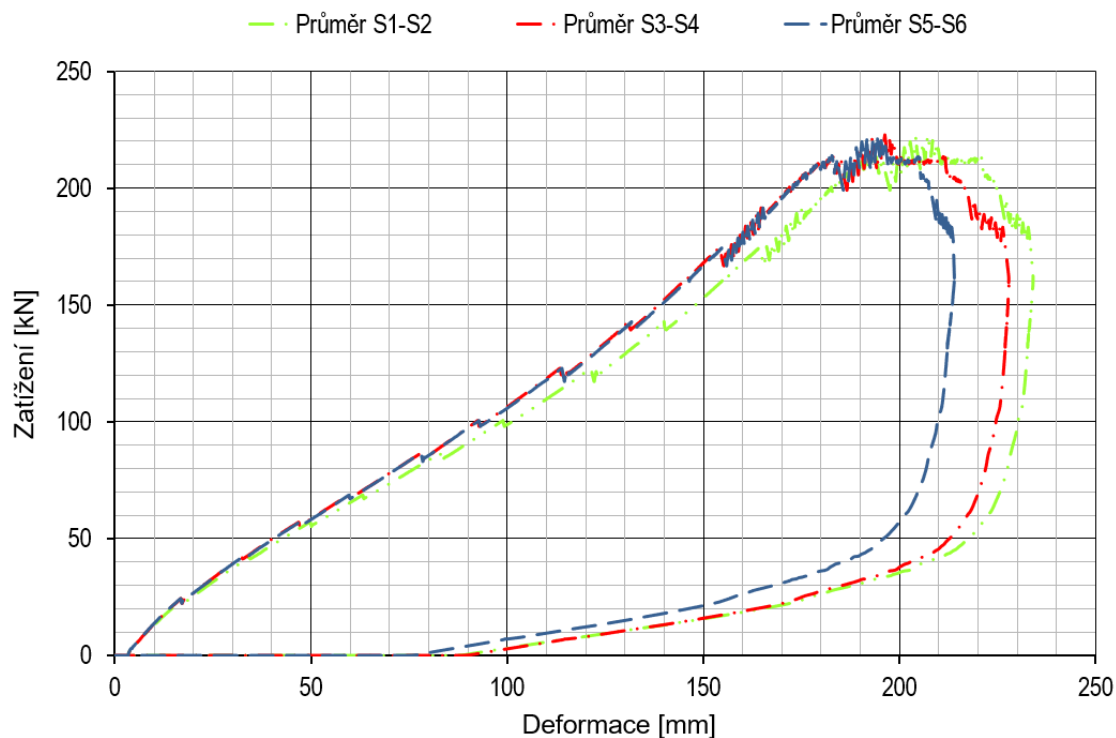


Obrázek 39: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-01 (snimače S1 – S6)

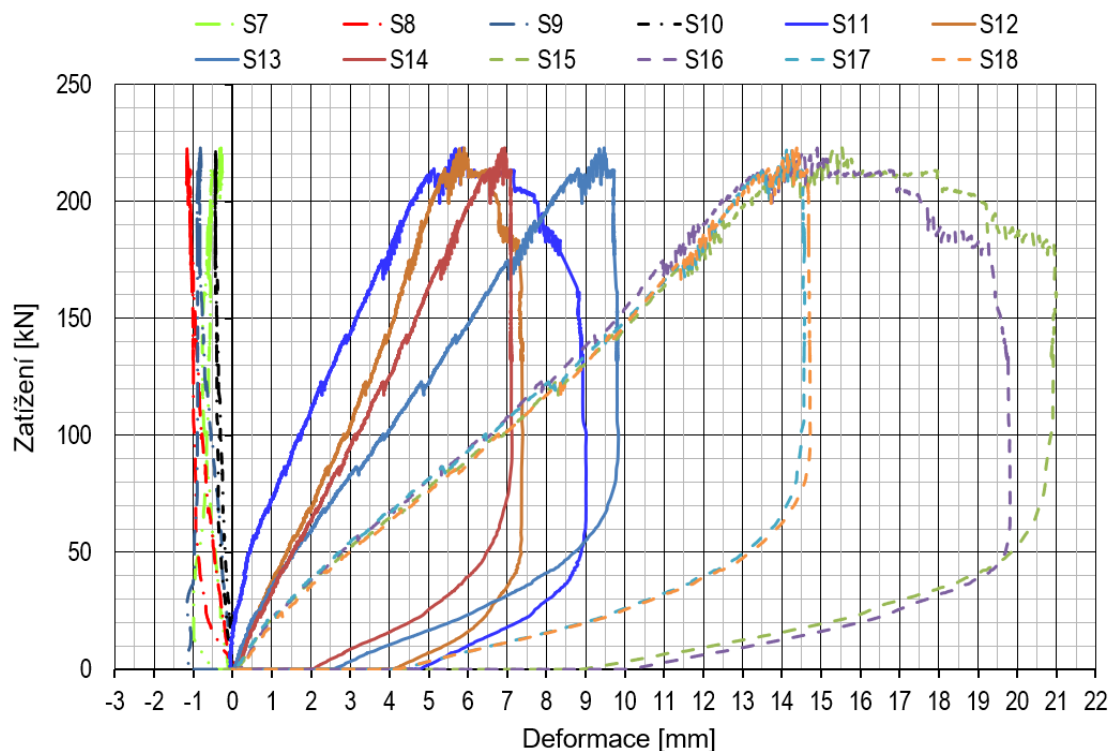


Obrázek 40: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-01 (snimače S7 – S18)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 5L-01 je $F_{5L-01,max} = 223,81$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,5L-01,max} = 111,90$ kN.

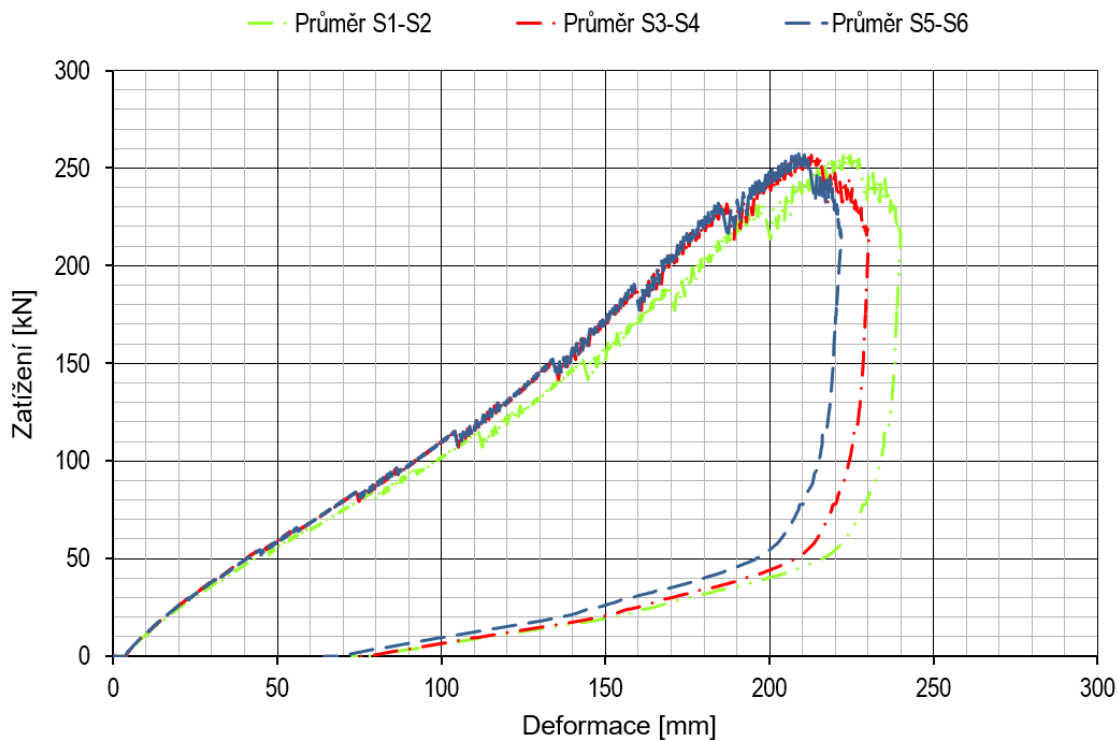


Obrázek 41: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-02 (snímače S1 – S6)

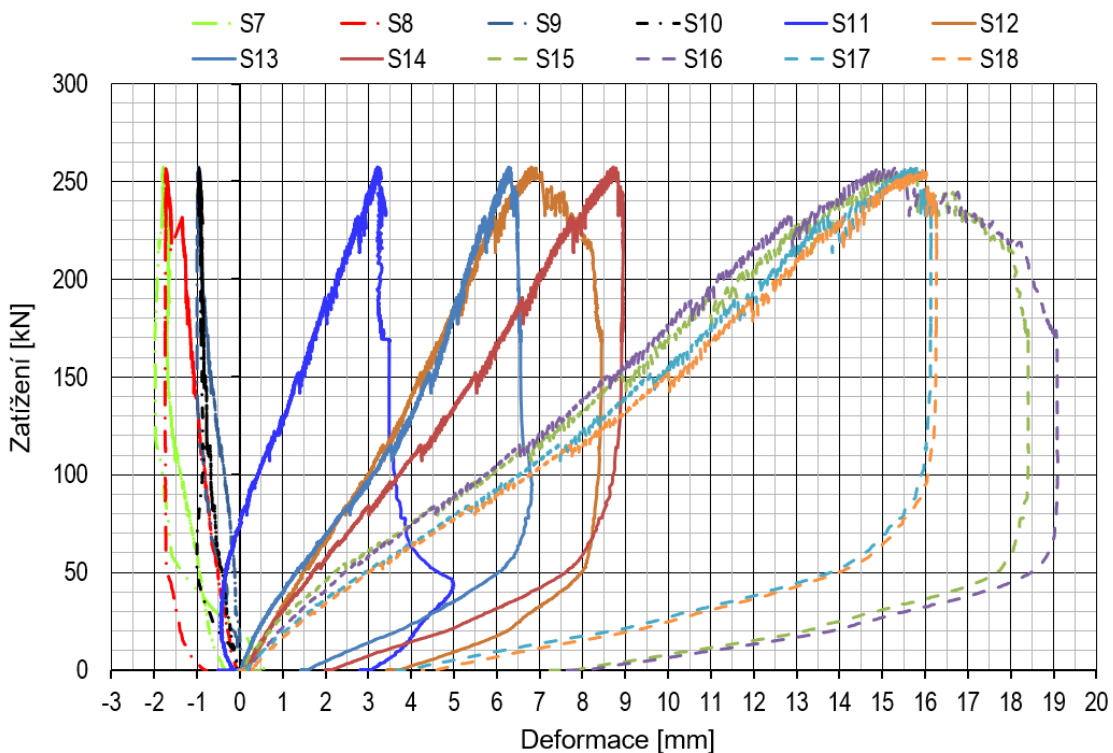


Obrázek 42: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-02 (snímače S7 – S18)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 5L-02 je $F_{5L-02,max} = 230,62$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,5L-02,max} = 115,31$ kN.

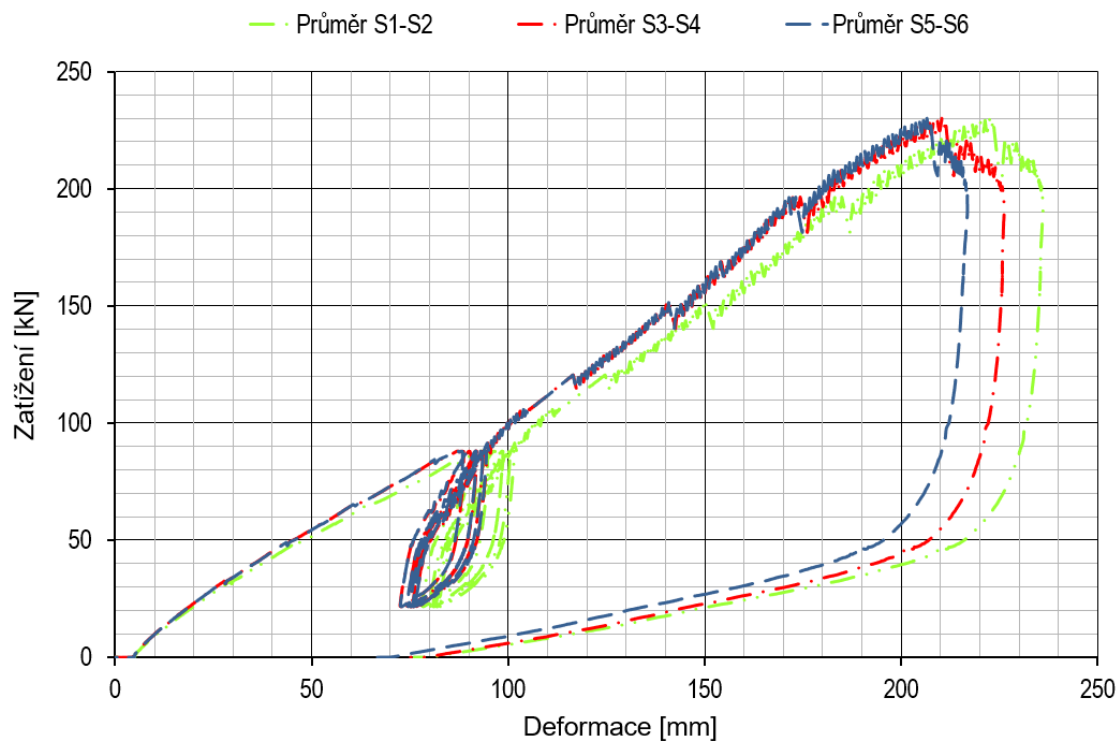


Obrázek 43: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-03 (snímače S1 – S6)

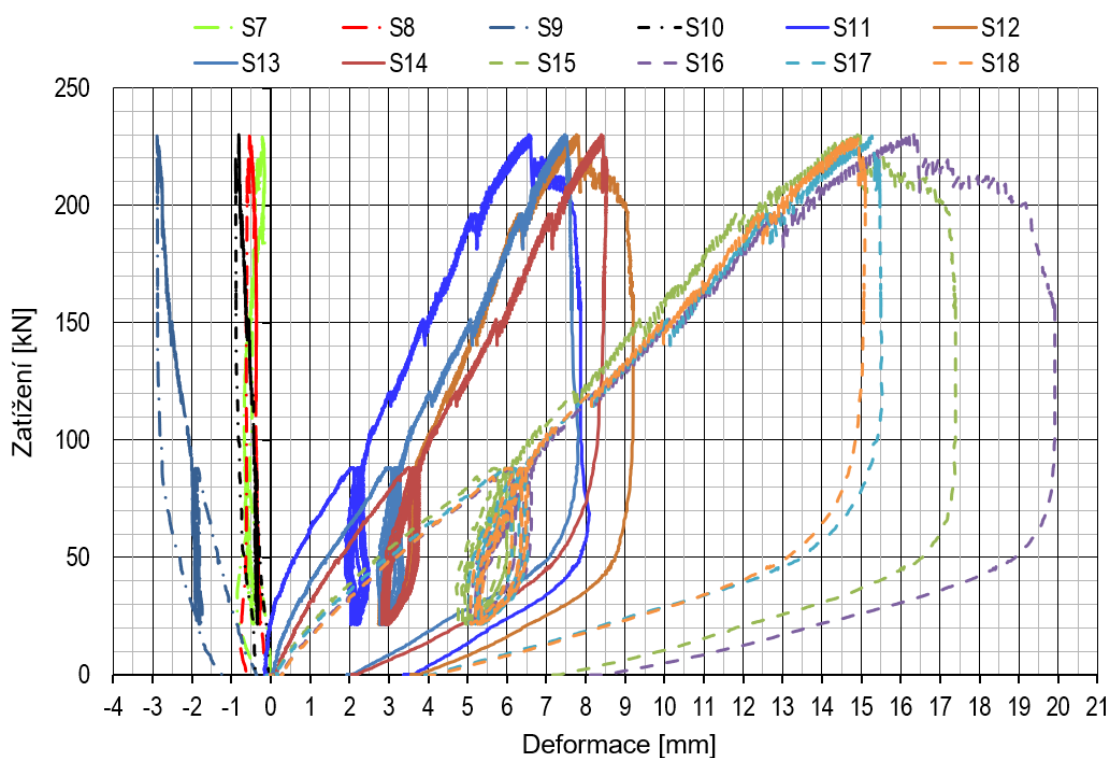


Obrázek 44: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-03 (snímače S7 – S18)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 5L-03 je $F_{5L-03,max} = 265,17$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,5L-03,max} = 132,58$ kN.

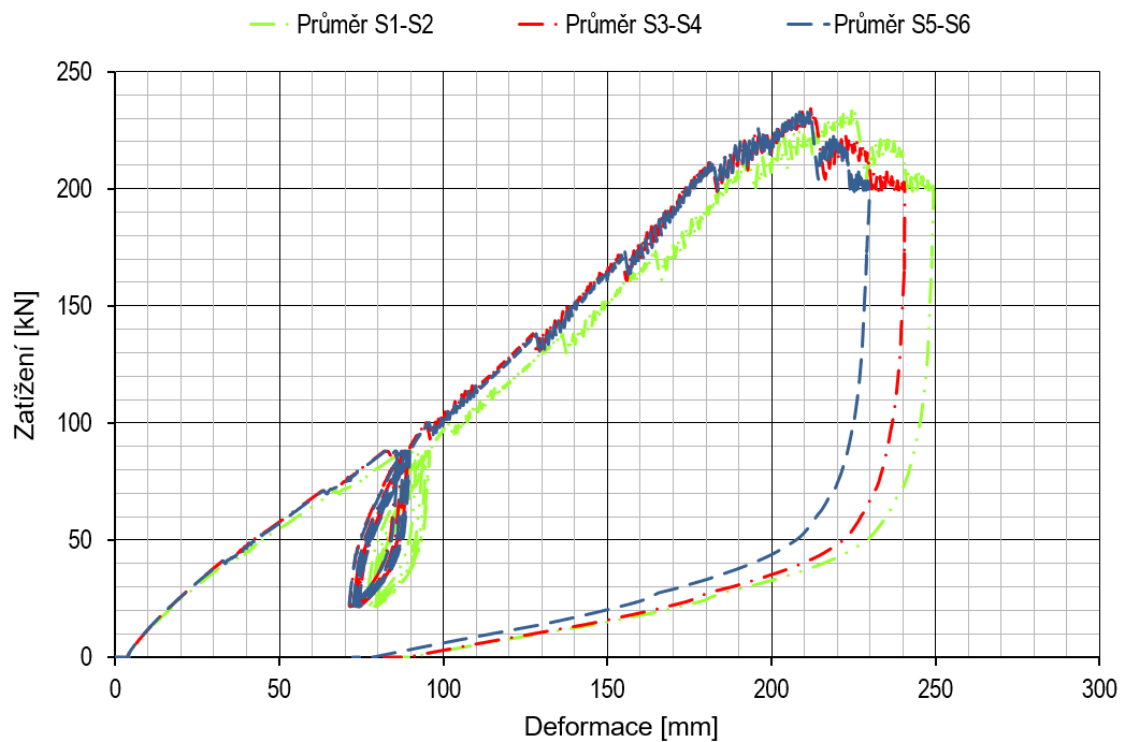


Obrázek 45: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-04 (snímače S1 – S6)

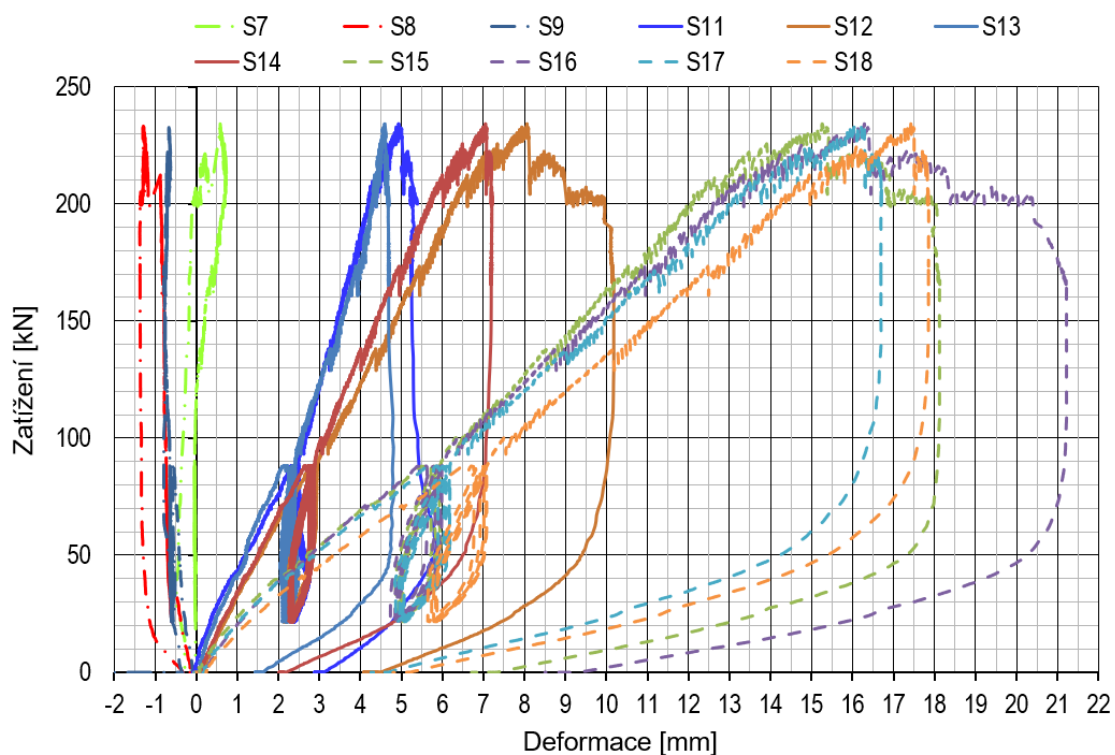


Obrázek 46: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-04 (snímače S7 – S18)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 5L-04 je $F_{5L-04,max} = 237,86$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,5L-04,max} = 118,93$ kN.

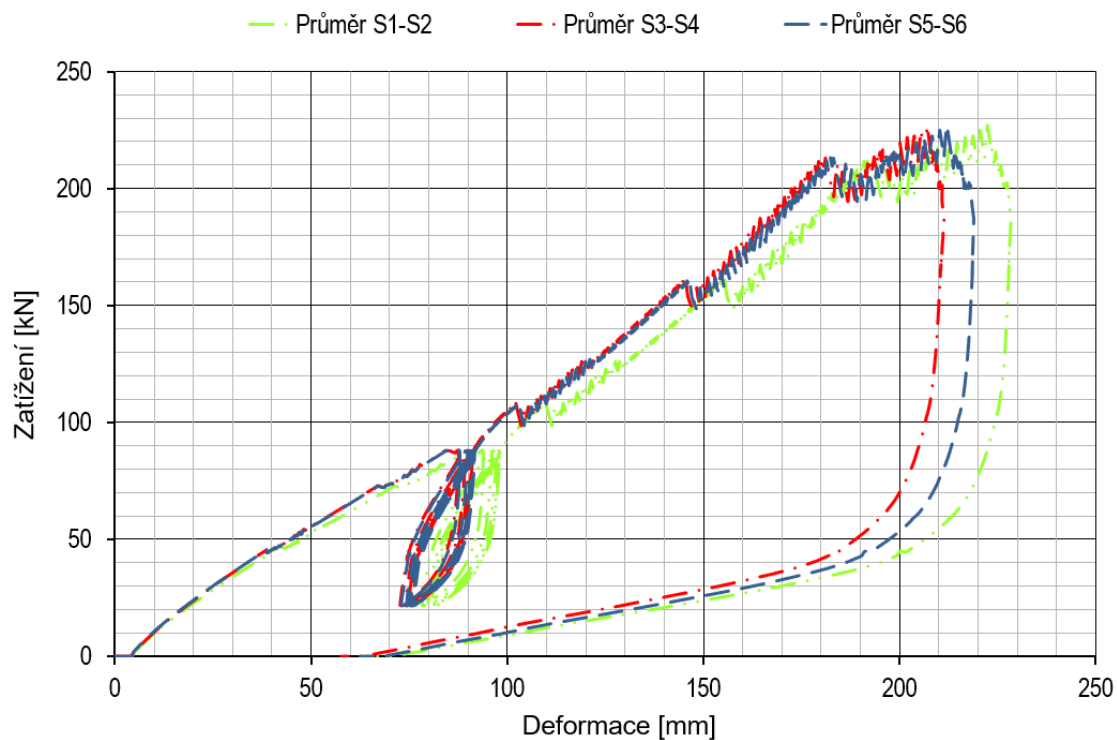


Obrázek 47: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-05 (snímače S1 – S6)

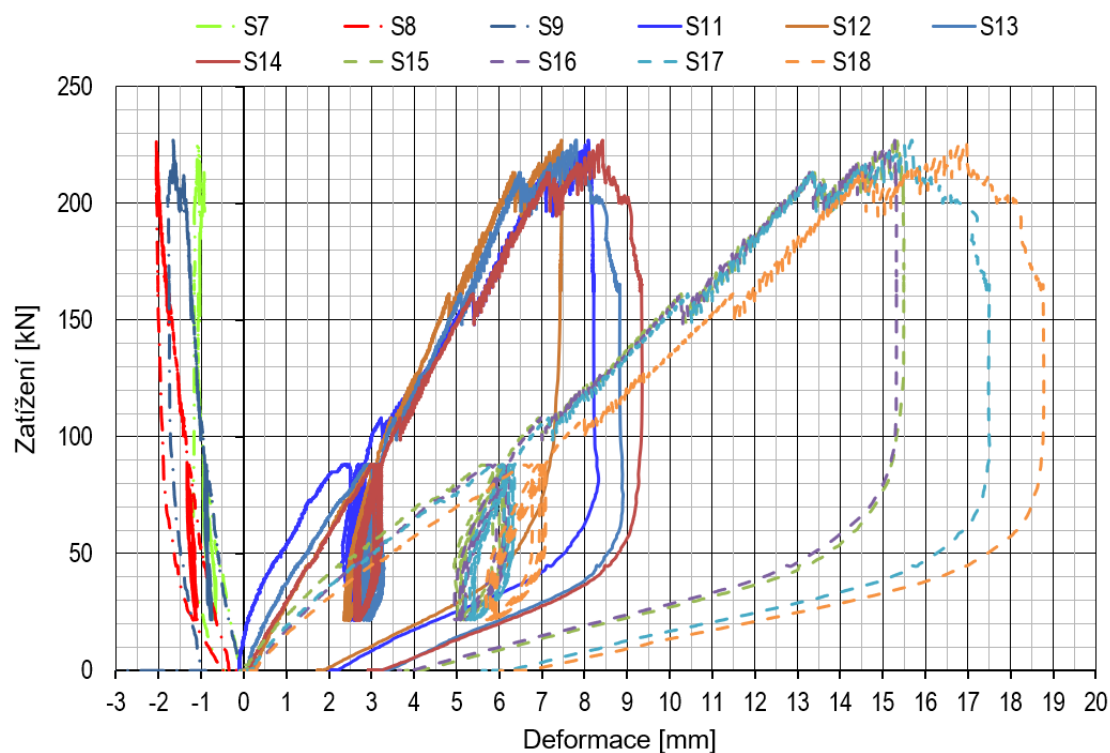


Obrázek 48: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-05 (snímače S7 – S18; S10 vyřazeno)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 5L-05 je $F_{5L-05,max} = 241,94$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,5L-05,max} = 120,97$ kN.



Obrázek 49: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-06 (snímače S1 – S6)



Obrázek 50: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-06 (snímače S7 – S18; S10 vyřazeno)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 5L-06 je $F_{5L-06,max} = 234,75$ kN, což odpovídá smykové posouvající síle $V_{r,5L-06,max} = 117,37$ kN.

3.1.7. Únosnost ve smyku kolmo k vláknům

Charakteristické hodnoty (5% kvantily) posouvající síly $V_{r,k}$ byly určeny z výsledků experimentů na základě normy ČSN EN 14 358. Pro volbu vhodného parametrického rozdělení pravděpodobnosti byla využita metoda reziduálního (zbytkového) součtu čtverců. [26]

Vyhodnocení charakteristické hodnoty smykové únosnosti třívrstvých panelů je shrnuto v tab. 3 a pětivrstvých panelů v tab. 4.

Tabulka 3: Vyhodnocení char. hodnoty smykové únosnosti třívrstvých panelů

Zkušební těleso	V_r [kN]	\bar{Y}	$(V_{r,i} - \bar{Y})^2$	S_y	k_s	$V_{r,k}$ [kN]
3L-01	162,40		855,91			
3L-02	139,99		46,79			
3L-03	127,16	133,15	35,77	18,78	2,34	89,10
3L-04	139,67		42,57			
3L-05	107,37		664,58			
3L-06	122,29		117,95			

Tabulka 4: Vyhodnocení char. hodnoty smykové únosnosti pětivrstvých panelů

Zkušební těleso	V_r [kN]	\bar{Y}	$(V_{r,i} - \bar{Y})^2$	S_y	k_s	$V_{r,k}$ [kN]
5L-01	111,90		83,34			
5L-02	115,31		32,73			
5L-03	132,58	121,03	133,41	7,31	2,34	103,90
5L-04	118,93		4,43			
5L-05	120,97		0,00			
5L-06	117,37		13,39			

Charakteristická průměrná hodnota $V_{r,k}$ je uvažována jako průměrná hodnota \bar{y} (vztah (29)).

Použitý vztah pro výpočet posouvající síly při maximálním zatížení ve smyku kolmo na vlákna:

$$V_{r,i} = \frac{F_{max,i}}{2} \quad [kN] \quad (27)$$

kde: $F_{max,i}$ velikost maximální zatěžovací síly naměřená siloměrem na zatěžovacím lisu při čtyřbodové bodové ohybové zkoušce v N

Použitý vztah pro určení parametrického rozdělení pravděpodobnosti:

$$s_{y,x}^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (y_i - Y_i)^2 \quad (28)$$

kde: $s_{y,x}^2$ rozptyl
 n počet zkoušených vzorků
 y_i pravděpodobnost
 Y_i hodnota funkce hustoty parametrického rozdělení pravděpodobnosti v hodnotě x_i

Použité vztahy pro výpočet charakteristické hodnoty (5 % kvantilu):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \quad (29)$$

$$s_y = \max \left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}; 0,05 \cdot \bar{y} \right) \quad (30)$$

$$k_s(n) = \frac{6,5 n + 6}{3,7 n - 3} \quad (31)$$

$$m_k = \bar{y} - k_s(n) \cdot s_y \quad (32)$$

kde: \bar{y} průměrná hodnota
 m_i hodnota zatížení pro i-té měření
 s_y směrodatná odchylka měřeného souboru
 $k_s(n)$ součinitel zohledňující počet zkoušených vzorků
 (pro 6 měření je $k_s = 2,34$)
 m_k obecné vyjádření 5% kvantilu charakteristické hodnoty, zde odpovídá veličině $V_{r,k}$

3.1.8. Smyková tuhost panelů

Pro vyhodnocení smykové tuhosti panelů bylo třeba stanovit prvně lokální ohybovou tuhost EI_{lok} . Pro její stanovení byly použity naměřené hodnoty 10 % a 40 % z maximálního zatížení F_{max} a příslušné hodnoty svislé deformace w_{01} a w_{04} . Pro následné vyhodnocení smykové tuhosti GA/β byly při stejných hodnotách zatížení použity příslušné hodnoty svislé deformace $w_{glob,01}$ a $w_{glob,04}$. [17;27]

Vyhodnocení charakteristické hodnoty smykové tuhosti třívrstvých panelů je shrnuto v tab. 5 a pětivrstvých panelů v tab. 6.

Tabulka 5: Vyhodnocení char. hodnoty smykových tuhostí třívrstvých panelů

Zkušební těleso	F_{\max} [kN]	$EI_{\text{lok},i}$ [Nmm ²]	EI_{lok} [Nmm ²]	GA_i/β [N]	GA/β [N]
Násobitel	-	10^{11}	10^{11}	10^6	10^6
3L-01	324,80	1,29781		0,91930	
3L-02	279,97	0,99452		0,74509	
3L-03	254,33	1,40915	1,06134	0,57992	0,75489
3L-04	279,34	1,07022		0,92494	
3L-05	214,73	0,77894		0,66044	
3L-06	244,57	0,81743		0,69963	

Tabulka 6: Vyhodnocení char. hodnoty smykových tuhostí pětivrstvých panelů

Zkušební těleso	F_{\max} [kN]	$EI_{\text{lok},i}$ [Nmm ²]	EI_{lok} [Nmm ²]	GA_i/β [N]	GA/β [N]
Násobitel	-	10^{11}	10^{11}	10^6	10^6
5L-01	223,81	1,46707		1,02206	
5L-02	230,62	1,71833		0,81102	
5L-03	265,17	1,70317	1,57491	1,15458	1,15726
5L-04	237,86	1,49313		1,21240	
5L-05	241,94	1,58036		1,17346	
5L-06	234,75	1,48740		1,57001	

Hodnoty lokální ohybové tuhosti se stanoví ze vztahu:

$$EI_{\text{lok},i} = \frac{al^2(F_{04,i} - F_{01,i})}{16(w_{04,i} - w_{01,i})} \quad [\text{Nmm}^2] \quad (33)$$

- kde: EI_{lok} lokální ohybová tuhost zkušebního tělesa v Nmm²
 a vzdálenost mezi podporou a místem působení zatížení v mm
 l vzdálenost mezi průhyby v bodech S3, S4 a S5, S6
 $F_{04,i} - F_{01,i}$ přírůstek zatížení na regresní přímce s korelačním koeficientem 0,99 nebo lepším včetně síly vyvolané vlastní tíhou roznášecích prvků v N

$w_{04,i} - w_{01,i}$ přírůstek deformace mezi průměrem bodů S3, S4, S5, S6 a průměrem bodů S1, S2, odpovídající $F_{04,i} - F_{01,i}$ v mm

Smyková tuhost se udává ve formě GA/β . Tento zlomek je vyjádřen pomocí upraveného vztahu:

$$\frac{GA}{\beta} = \frac{\frac{1}{2}(F_{04,i} - F_{01,i})a}{(w_{glob,04,i} - w_{glob,01,i}) - \frac{\frac{1}{2}(F_{04,i} - F_{01,i})(3aL^2 - 4a^3)}{24EI_{lok,i}}} [N] \quad (34)$$

kde:	GA	smyková tuhost zkušebního tělesa v N
	$EI_{lok,i}$	lokální ohybová tuhost zkušebního tělesa v Nmm ²
	a	vzdálenost mezi podporou a místem působení zatížení v mm
	L	rozpon uložení zkušebního tělesa v mm
	β	součinitel smykové poddajnosti – bezrozměrný
	$F_{04,i} - F_{01,i}$	přírůstek zatížení na regresní přímce s korelačním koeficientem 0,99 nebo lepším včetně síly vyvolané vlastní tíhou roznášecích prvků v N
	$w_{glob,04,i} - w_{glob,01,i}$	přírůstek celkové deformace odpovídající $F_{04,i} - F_{01,i}$ v mm

Charakteristická průměrná hodnota GA/β je uvažována jako průměrná hodnota \bar{y} , viz vztah (30).

3.1.9. Závěr experimentu

Průměrná hodnota smykové únosnosti třívrstvých panelů stanovená ze zkoušek šesti zkušebních těles je $V_r = 133,15$ kN. Charakteristická hodnota smykové únosnosti třívrstvých panelů je $V_{r,k} = 89,10$ kN.

Charakteristická průměrná hodnota smykové tuhosti třívrstvých panelů stanovená ze zkoušek šesti zkušebních těles je $GA/\beta = 0,75489 \cdot 10^6$ N.

Průměrná hodnota smykové únosnosti pětivrstvých panelů stanovená ze zkoušek šesti zkušebních těles je $V_r = 121,03$ kN. Charakteristická hodnota smykové únosnosti pětivrstvých panelů je $V_{r,k} = 103,9$ kN.

Charakteristická průměrná hodnota smykové tuhosti pětivrstvých panelů stanovená ze zkoušek šesti zkušebních těles je $GA/\beta = 1,15726 \cdot 10^6$ N.

Jak již bylo popsáno v kapitole 3.1.5., v průběhu zkoušek docházelo nejprve k porušení spojovacích prostředků. Takto se postupně porušovaly jednotlivé řady mechanických spojů od kraje zkušebního tělesa směrem do středu. Až následně docházelo k porušení těles tahem za ohybu podélných lamel při spodním povrchu. V tento okamžik byla vždy zkouška ukončena, jelikož zatížení nebylo dále schopné narůstat. Otázkou ale je, kde je hranice

mezního stavu únosnosti zkušební tělesa. Pravděpodobně by mezní stav únosnosti neměl být uvažován při dosažení pevnosti v tahu za ohybu dřevěných lamel při spodním povrchu, případně jejich smykovým porušením, ale již při zmiňovaném porušení první řady mechanických spojovacích prostředků. Dle ČSN EN 26891 – „Dřevěné konstrukce – Spoje s mechanickými spojovacími prostředky – Všeobecné zásady pro zjišťování charakteristik únosnosti a přetvoření“ je za mezní stav únosnosti těchto spojů uvažován dříve nastávající scénář, a to buď porušení spojovacího prostředku anebo překročení posunutí 15 mm. Proto, aby bylo možné určit hodnotu mezního stavu únosnosti zkoušených stropních CLT panelů, je nutné stanovit sílu působící na spojovací prostředek na mezi únosnosti. Tuto sílu bude nutné následně integrovat do smykových zkoušek stropních CLT panelů a dopočítat, při jakém zatížení zkušebních těles nastává mezní stav únosnosti v první řadě spojovacích prvků. Z tohoto důvodu byla dodatečně provedena smyková zkouška spojovacích prostředků třívrstvého panelu z křížem vrstveného dřeva.

3.2. Experimentální stanovení smykové únosnosti spojovacích prostředků třívrstvého CLT panelu

Na UCEEB ČVUT byla vytvořena zkušební tělesa reprezentující mechanický spoj třívrstvého panelu z křížem vrstveného dřeva. Celkem bylo vytvořeno 8 ks zkušebních těles pro dostatečné přesné statistické vyhodnocení experimentu.

3.2.1. Předmět zkoušky a identifikační údaje

Hlavním předmětem zkoušky je stanovení lokální smykové únosnosti mechanického spoje třívrstvého panelu z křížem vrstveného dřeva a stanovení maximální smykové síly působící na spojovací prostředek.

Označení zkušebních těles:

Třívrstvé: 3L07-3L14

Datum provedení zkoušek a klimatické podmínky:

Zkušební těleso 3L-07: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

Zkušební těleso 3L-08: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

Zkušební těleso 3L-09: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

Zkušební těleso 3L-10: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

Zkušební těleso 3L-11: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

Zkušební těleso 3L-12: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

Zkušební těleso 3L-13: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

Zkušební těleso 3L-14: 29. 11. 2022; teplota vzduchu 18,8 °C, rel. vlhkost vzduchu 40 %

3.2.2. Specifikace zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena z rozebraných odzkoušených CLT panelů. Byly použity lamely z míst jejich nejmenších namáhání, většinou z příčných vrstev, z důvodu zachování jejich pevnosti. Kvalita provedení zkoušených vzorků odpovídala kvalitě spojení panelů dodaných od výrobce. Zkoušená tělesa byla zkoušena bez vizuálně pozorovatelných vad a poškození, které by mohly negativně ovlivnit stanovení zkoumaných parametrů.

Vzorky z jehličnatého dřeva byly vyrobeny z dvou podélných lamel rozměrů 500x27x200 mm a jedné příčné lamely rozměrů 330x27x200 mm. Podélné lamely byly oproti sobě posunuty o 100 mm, aby byl umožněn volný posun. Šířka spár mezi lamelami se pohybovala mezi 0 a 2 mm. Pro spojení vrstev bylo použito dvou celozávitových pozinkovaných vrutů Würth 5 x 80 mm s diagonálními roztečemi 200 mm, uspořádaných dle schématu na obr. 51.

Stanovení základních fyzikálních veličin zkušebních těles:

V rámci tohoto experimentu bylo provedeno stanovení základních fyzikálních veličin dřevěných lamel pomocí těchto vztahů:

Objem lamely:

$$V_L = bht \quad (35)$$

kde: b šířka lamely v mm
h výška lamely v mm
t tloušťka lamely v mm

Hmotnost vysušené lamely:

$$W = \frac{m_m - m_d}{m_d} * 100 \quad (36)$$

$$m_d = \frac{m_m}{1 + \frac{W}{100}} \quad (37)$$

kde: W naměřená vlhkost v %
m_m hmotnost vzorku při běžných klimatických podmínkách v g
m_d hmotnost vysušeného vzorku v g

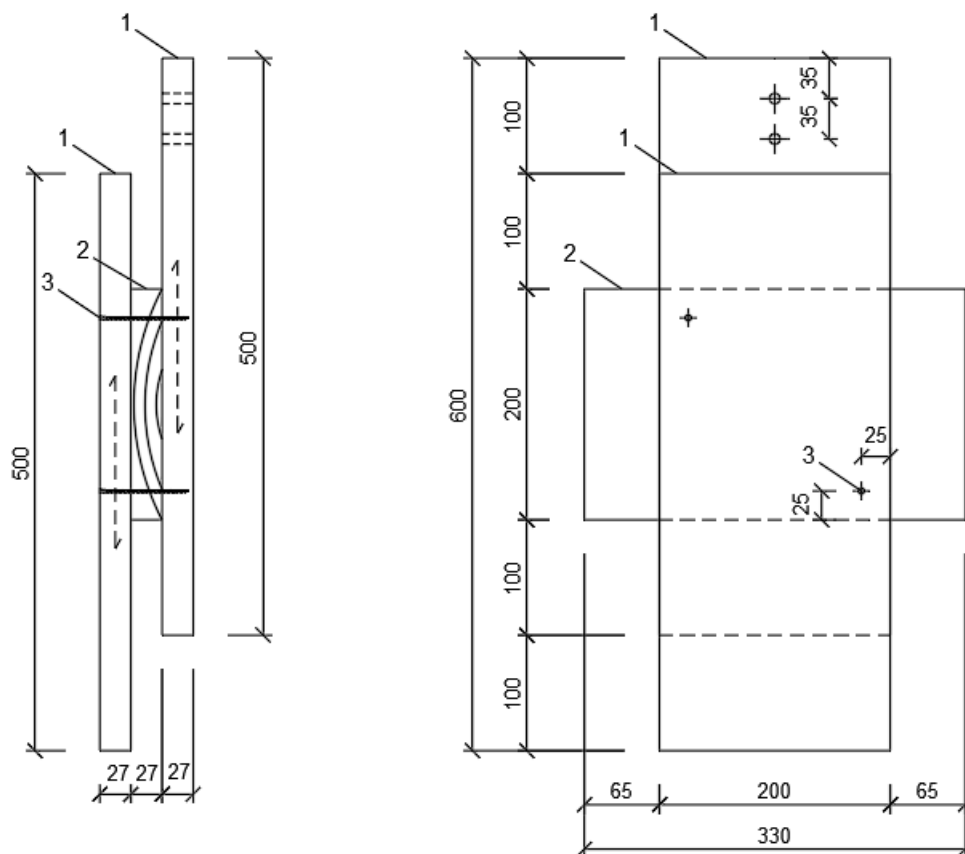
Objemová hmotnost lamely:

$$\rho_L = \frac{m_m}{V_L} \quad (38)$$

Fyzikální vlastnosti byly měřeny pouze u čtyř z osmi vzorků, jelikož už se takto jedná o dostatečný statistický soubor dat. Veškeré naměřené i vypočtené hodnoty základních fyzikálních veličin jsou uvedeny v tabulce č. 7. Objemová hmotnost dřevěných lamel při běžných klimatických podmínkách byla stanovena na $\rho_c=435,3 \text{ kg/m}^3$.

Tabulka 7: Objemové a vlhkostní parametry zkušebních těles

Číslo tělesa	Typ lamely	b [mm]	h [mm]	t [mm]	V_L [mm ³]	m_m [g]	W [%]	m_d [g]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_v [kg/m ³]	ρ_c [kg/m ³]
3L-08	podélná	198	499	26	2568852	1296,92	11,5	1163,2	504,9		
	příčná	198	332	27	1774872	782,66	12,7	694,5	441,0	455,1	
	podélná	199	498	26	2576652	1080,86	11,9	965,9	419,5		
3L-10	podélná	199	499	26	2581826	1190,75	11,8	1065,1	461,2		
	příčná	200	332	27	1792800	679,01	11,7	607,9	378,7	438,8	
	podélná	198	498	27	2662308	1268,83	12,1	1131,9	476,6		435,3
3L-12	podélná	199	500	27	2686500	1077,24	11,7	964,4	401,0		
	příčná	199	331	27	1778463	739,89	11,3	664,8	416,0	395,3	
	podélná	200	499	27	2694600	993,66	11,7	889,6	368,8		
3L-14	podélná	198	499	26	2568852	1170,50	12,6	1039,5	455,7		
	příčná	200	332	27	1792800	796,35	10,6	720,0	444,2	452,0	
	podélná	199	499	27	2681127	1222,80	11,9	1092,8	456,1		



Obrázek 51: Schéma geometrie zkušebních těles

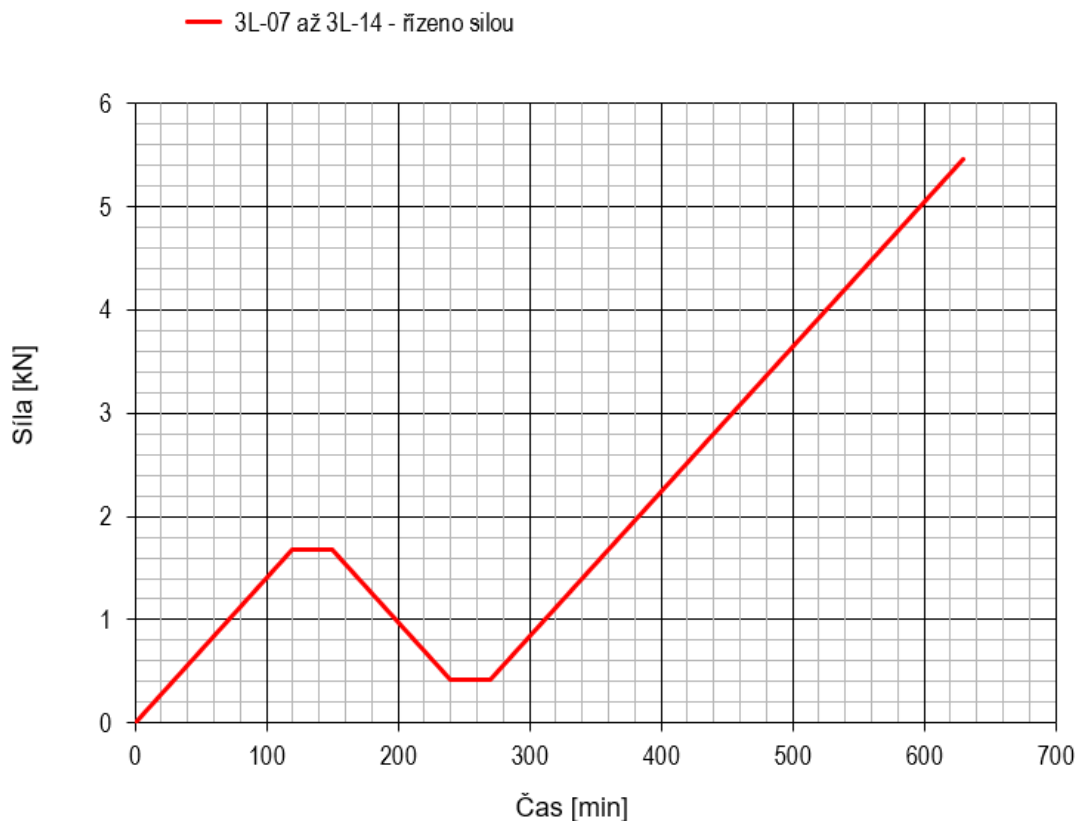
Legenda:

- 1 – podélná vrstva lamel
- 2 – příčná vrstva lamel
- 3 – spojovací prostředek

3.2.3. Popis a uspořádání zkoušky

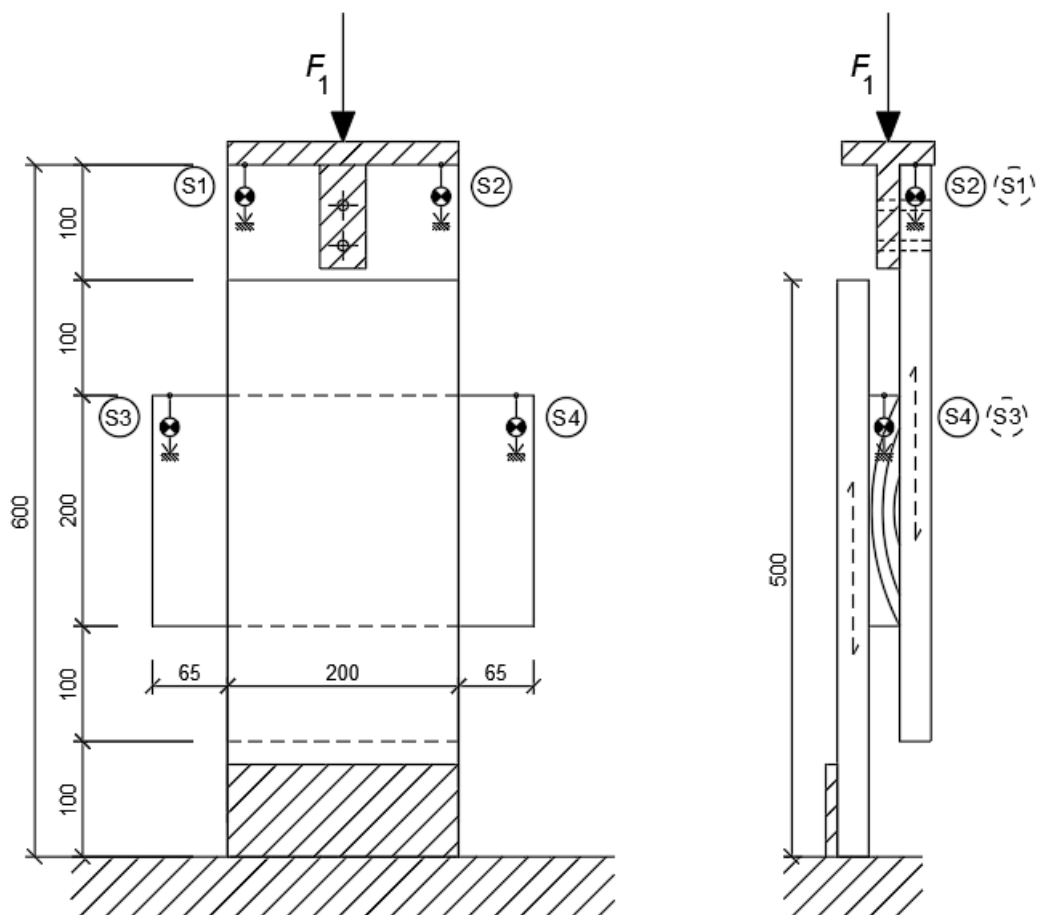
Smyková zkouška pro stanovení smykové únosnosti spojovacích prostředků byla provedena dle zkušební normy ČSN EN 26891 – „Dřevěné konstrukce – Spoje s mechanickými spojovacími prostředky – Všeobecné zásady pro zjišťování charakteristik únosnosti a přetvoření“ a ČSN EN 408+A1 (73 1741) – „Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností“. [17;27]

Zkušební tělesa byla zatěžována smykem jedním břemenem působícím na horní část zkušební tělesa. Zatížení bylo přenášeno přes dřevěný T-profil uchycený k hydraulickému lisu a k horní části zkušební tělesa pomocí dvou šroubů M8. Uchycení bylo provedeno tak, aby vznikala co nejmenší možná excentricita při zatížení. Výška zkušební tělesa byla 600 mm. Zkušební tělesa byla při spodní straně zapřena o ocelový T-profil, který byl tuze uchycený k rámu. Zatížení bylo vnášeno tlakovou silou hydraulickým válcem s maximální silou 50 kN. Zatěžování zkušebních těles probíhalo podle schématu na obr. 52. Pomocí jedné pilotní zkoušky byla stanovena odhadovaná maximální síla na $F_{est} = 4,2$ kN. Dle pokynů normy byla následně všechna zkušební tělesa zatěžována lineárně na hodnotu $0,4F_{est} = 1,68$ kN, v tomto bodě zkouška setrvala po dobu 30 sekund a následně probíhalo odtížení na $0,1F_{est} = 0,42$ kN. V tomto bodě opět zkouška setrvala po dobu 30 sekund a následně probíhalo zatížení až do porušení spojovacích prostředků. Zatěžování všech zkušebních těles 3L-07 až 3L-14 bylo řízeno silou s konstantní rychlostí 0,014 kN/sec. [17;27]



Obrázek 52: Zatěžovací diagram zkušebních těles

V průběhu zkoušek bylo kontinuálně zaznamenáváno působící zatížení a také deformace zkušebních těles v bodech S1-S4, definovaných v kap. 3.2.4. a na obr. 53.



Obrázek 53: Schéma rozložení zkoušky



Obrázek 54: Uspořádání zkoušky v laboratoři; umístění snímačů TR25 k měření prokluzu střední příčné vrstvy a snímačů TR50 k měření prokluzu krajní vrstvy

3.2.4. Použité zkušební zařízení a sledované veličiny

Při statické zatěžovací zkoušce byla použita měřicí linka složená z následujících komponent:

- měřicí ústředna DEWE -51-USB-2-16, vč. soft. DEWESoft 6.3;
- válec INOVA AHS 50-100 s lineárním pohonem a horním hydrostatickým ložiskem, siloměr GTM RF - 50 (2), Snímač polohy DGO 100 mm/0,25 %;
- pružinový potenciometrický snímač dráhy TR0025, měřicí rozsah 25 mm;
- pružinový potenciometrický snímač dráhy TR0050, měřicí rozsah 50 mm;

Použitá měřicí ústředna je již blíže popsána v kapitole 3.1.4. Software je pro potřeby prováděného experimentu nastaven k zaznamenávání 10 hodnot za sekundu. Získané údaje byly nahrávány přímo na pevný disk a po dokončení zkoušky byly exportovány do excelového formátu xlsx.

Použitý hydraulický válec INOVA disponuje zatěžovacím rozsahem 0-50 kN, přičemž se dá zatěžovat jak tlakem, tak tahem. Maximální posun tohoto válce je 100 mm. Ovládání je řízeno softwarem INOVA, který je instalován v externím notebooku. Ten komunikuje s válcem skrz LAN kabel připojený do centrální stanice.

Odezva prvku na zatěžovací síly byla měřena v následujících bodech (viz obr. 53):

- bod S1 – svislá deformace na krajní podélné lamele při levé straně (snímač TR-50);
- bod S2 – svislá deformace na krajní podélné lamele při pravé straně (snímač TR-50);
- bod S3 – svislá deformace na střední příčné lamele při levé straně (snímač TR-25);
- bod S4 – svislá deformace na střední příčné lamele při pravé straně (snímač TR-25);

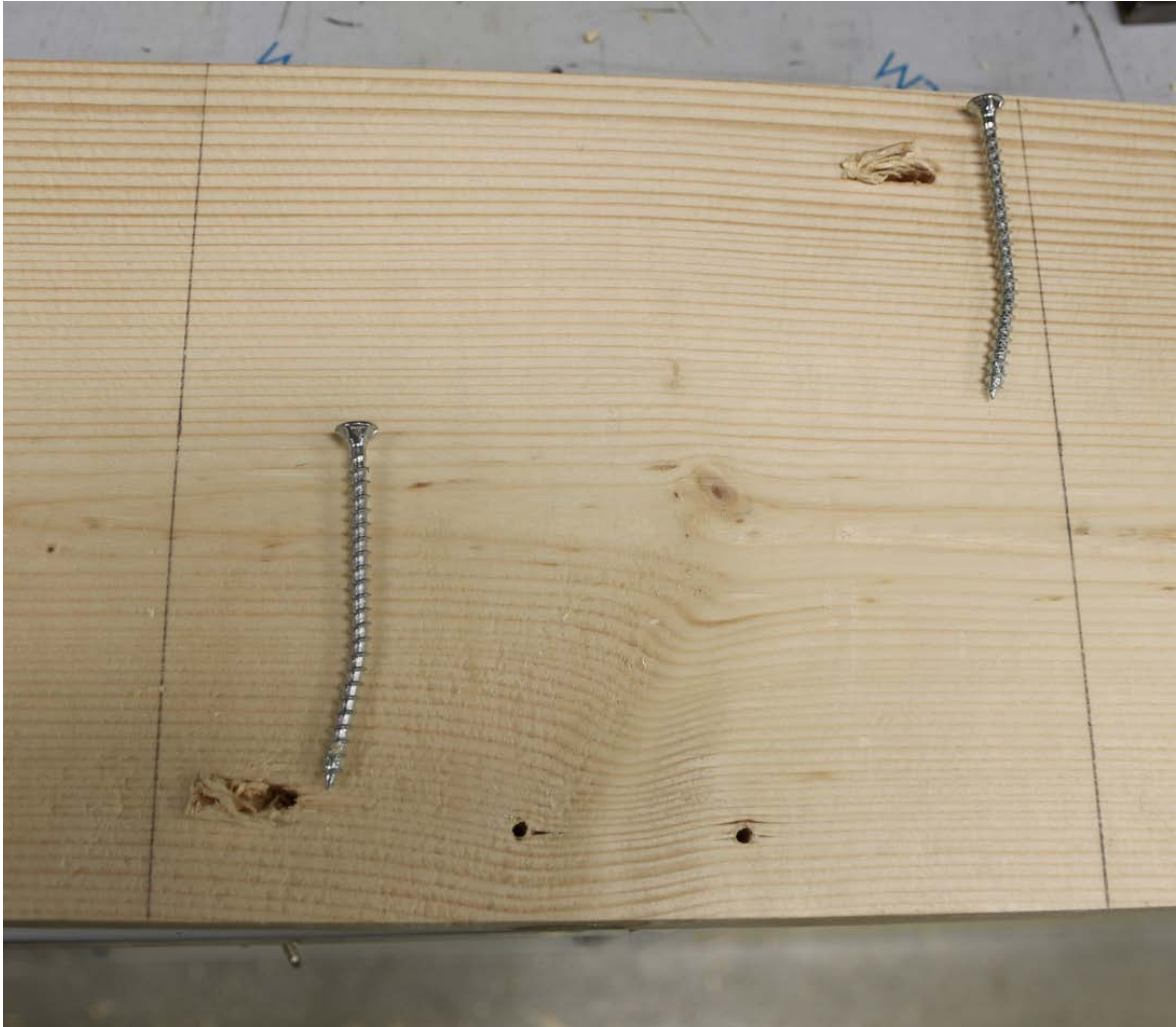
3.2.5. Způsob porušení zkušebních těles

Chování všech osmi zkušebních těles v průběhu zatěžování včetně způsobu jejich porušení bylo velmi podobné.

Z grafů je patrné, že při zatěžování zpočátku začala narůstat deformace v přední spáře, která pokračovala víceméně lineárně až do porušení zkušebního tělesa. To znamená, že vrut v této spáře ani nezačal plastizovat. Deformace v zadní spáře začala narůstat obvykle o něco později. Po natočení vrutů a jejich otláčení do dřeva tato deformace obvykle narůstala lineárně až do okamžiku dosažení meze kluzu, kdy vrut v místě této spáry začal plastizovat. Následně se deformace začala zrychlovat až do dosažení meze pevnosti, kdy klesla zatěžovací síla a došlo k ukončení zkoušky. Zajímavým poznatkem tedy je, že na každém vrutu se nevytváří dva plastické klouby (na levé i pravé straně od střední lamely), ale pouze jeden plastický kloub, a to na straně blíže ke špičce vrutu. Důkazem toho jsou právě grafy znázorňující deformace, kde je vidět, že příčná vrstva vykazovala menší deformace než krajní vrstva.



Obrázek 55: Porušený vzorek – linie nakreslené tužkou značí původní lícování vrstev vzorku. Na fotografii je vidět posunutí zadní podélné vrstvy, které je výrazně větší než posunutí střední vrstvy. Vytvoření plastického kloubu lze tedy očekávat mezi střední a zadní vrstvou.



Obrázek 56: Rozebraný porušený vzorek. Na fotografii je vidět otlačení dřeva od vrtů a způsob porušení vrtů. Lze si všimnout, že na vrtech opravdu vzniká pouze jeden plastický kloub a že porušení obou vrtů je stejné, nezáleží tedy na jejich diagonálním rozmístění. Přesně takového porušení nastalo i u zbylých sedmi zkušebních těles.

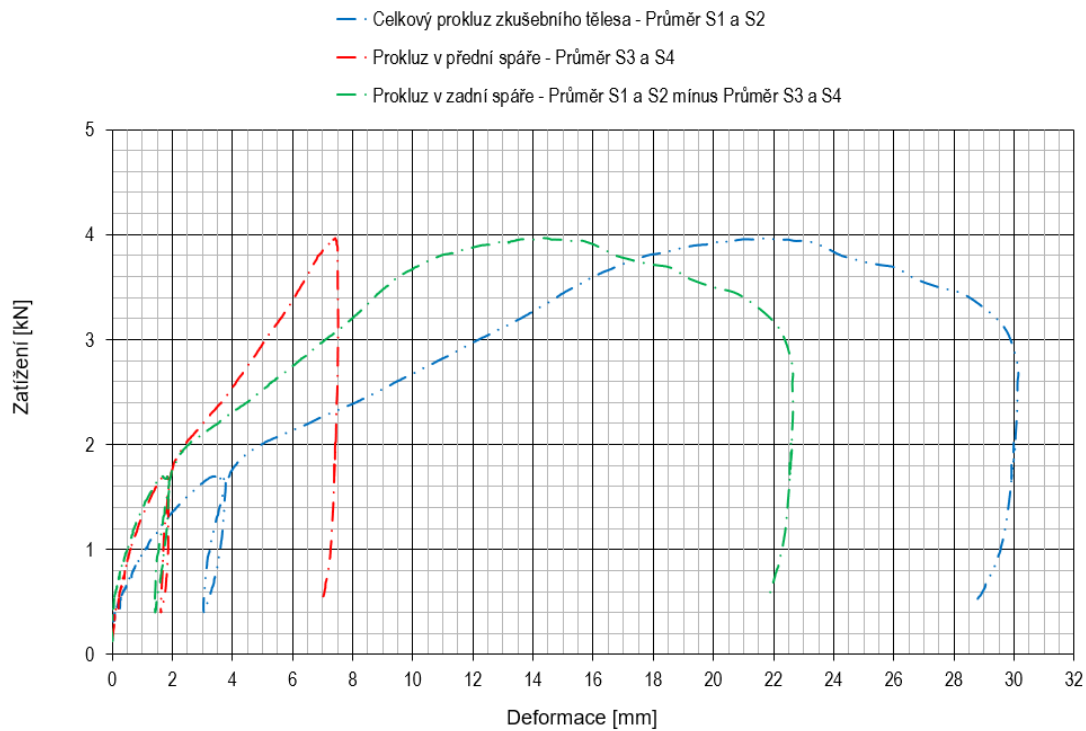
3.2.6. Vyhodnocení získaných dat

Závislost deformací a zatížení panelů 3L-07 až 3L-14 je zobrazena na obr. 57 až obr. 62. Jednotlivé křivky zobrazené v grafech odpovídají poloze snímačů, uvedených na obr. 53. Znázorněné křivky znázorňují jak prokluz v jednotlivých spárách, tak celkový prokluz na zkušebním tělese.

První dvě zkušební tělesa byla zkoušena na měřicím zařízení MTS, kde nebyla možnost měření deformací. U těchto zkoušek byla zaznamenána pouze maximální působící síla.

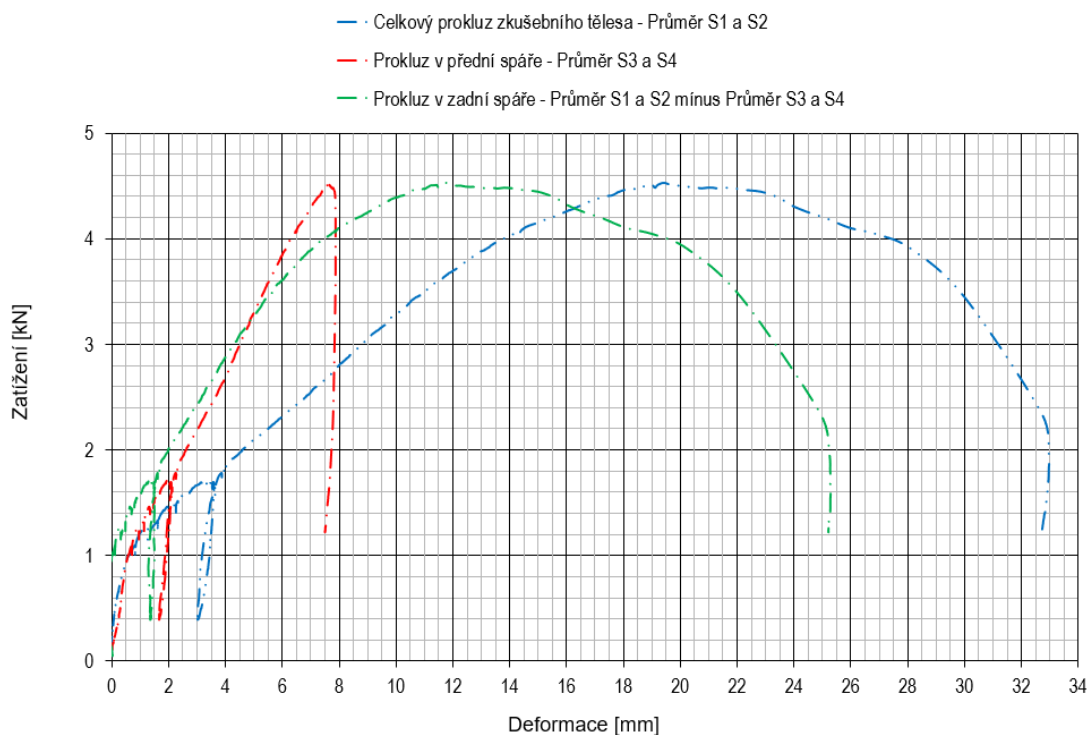
Zkušební těleso 3L-07: $F_{3L-07,max} = 3,47 \text{ kN}$

Zkušební těleso 3L-08: $F_{3L-08,max} = 3,99 \text{ kN}$



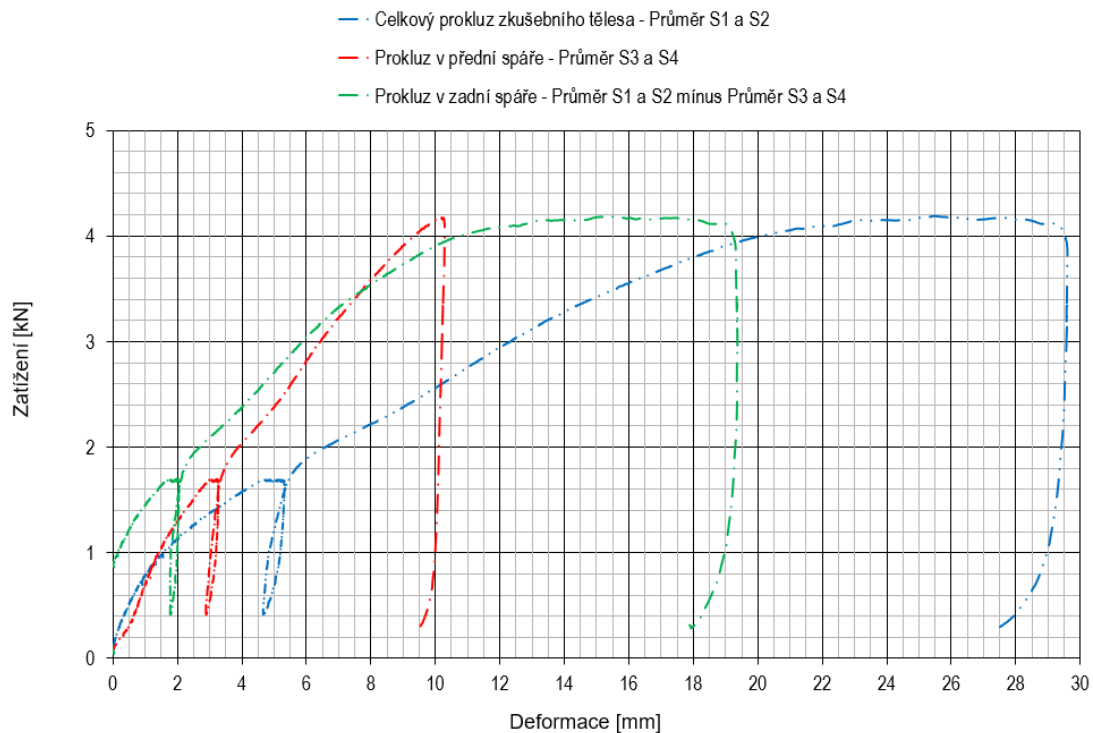
Obrázek 57: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-09 (snímače S1 – S4)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-09 je $F_{3L-09,max} = 3,97$ kN.



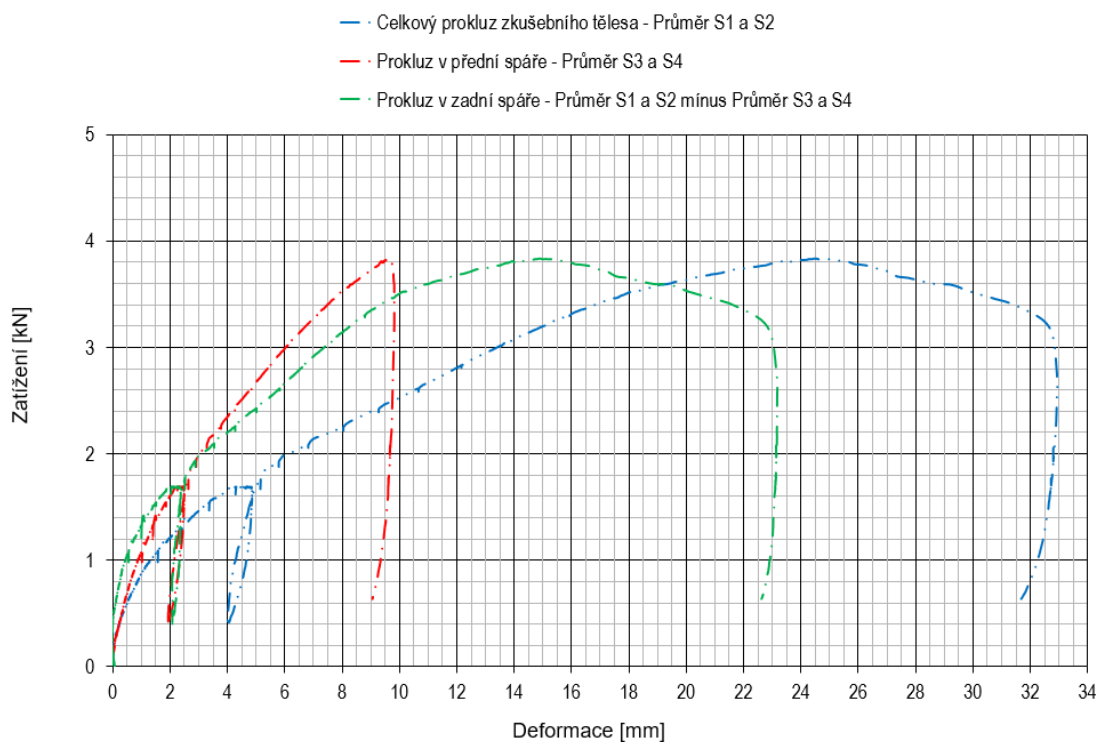
Obrázek 58: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-10 (snímače S1 – S4)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-10 je $F_{3L-10,max} = 4,53$ kN.



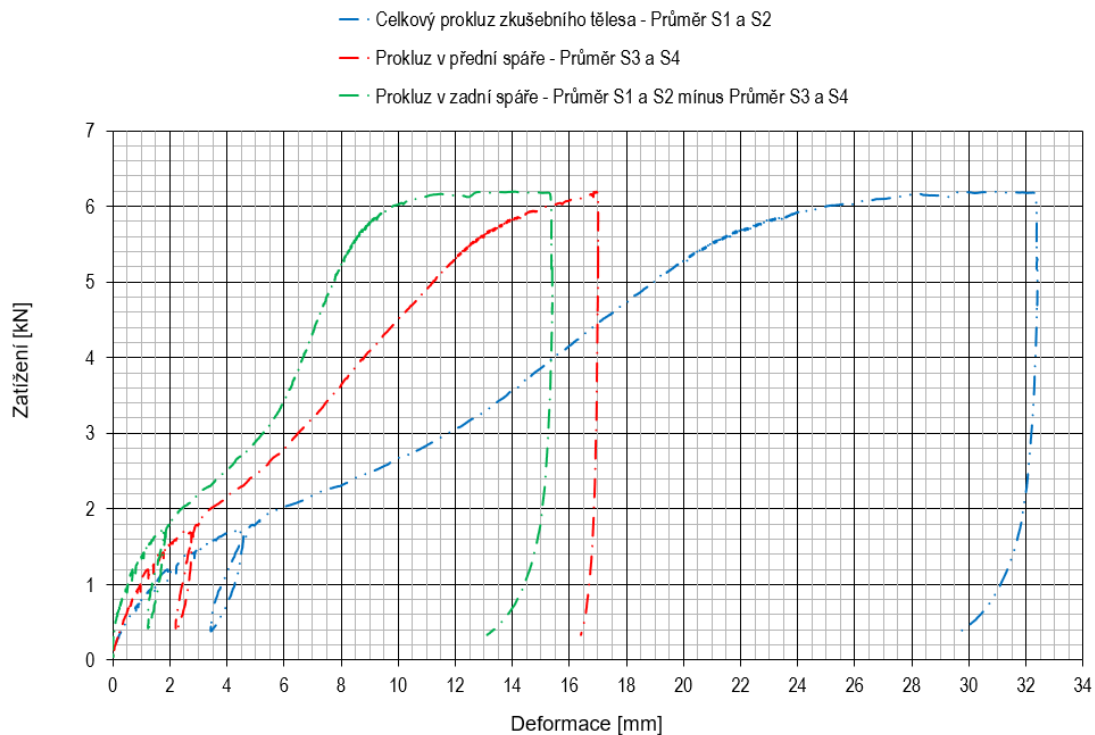
Obrázek 59: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-11 (snímače S1 – S4)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-11 je $F_{3L-11,max} = 4,19$ kN.



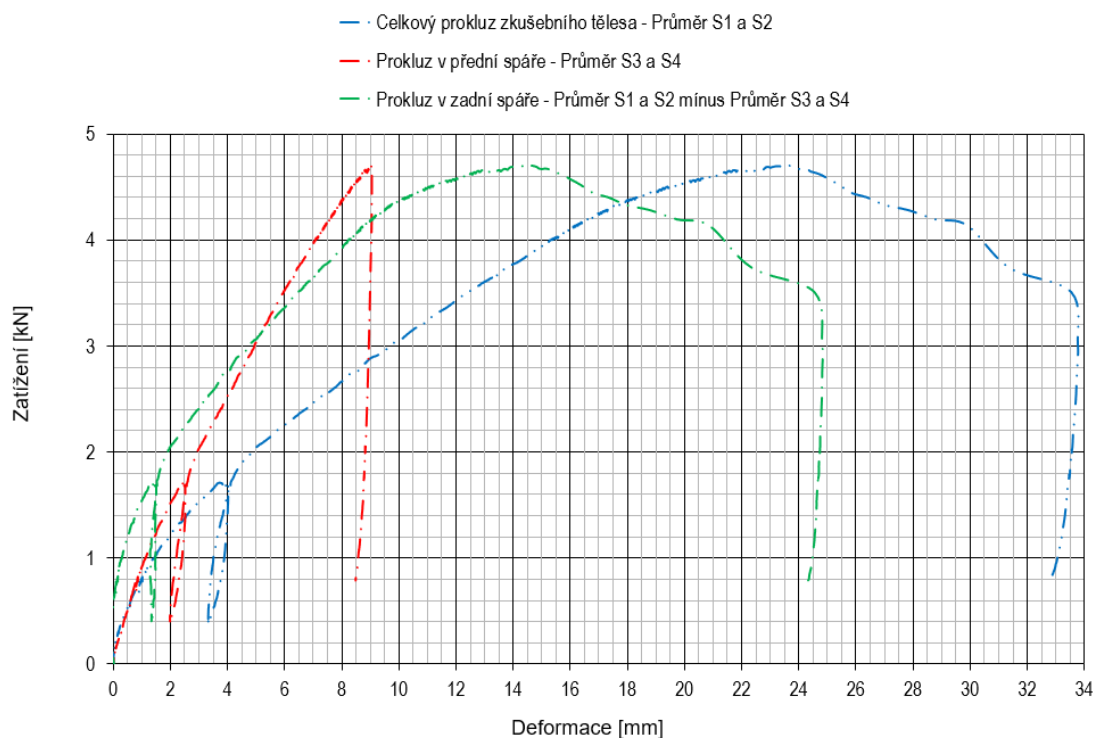
Obrázek 60: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-12 (snímače S1 – S4)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-12 je $F_{3L-12,max} = 3,83$ kN.



Obrázek 61: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-13 (snímače S1 – S4)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-13 je $F_{3L-13,max} = 6,19$ kN.



Obrázek 62: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-14 (snímače S1 – S4)

Maximální hodnota působícího zatížení na zkušební těleso 3L-14 je $F_{3L-14,max} = 4,70$ kN.

Hodnota výsledku ze zkoušky tělesa 3L-13 je podezřele vysoká, tudíž lze předpokládat, že během zkoušky mohlo dojít k neočekávanému chování zkušební tělesa, které mělo za následek jeho zpevnění a tím i větší únosnost. Tato hodnota bude prověřena a v případě překročení maximální povolené odchylky 30 % od aritmetického průměru všech hodnot bude tato zkouška považována za neplatnou. Z naměřených hodnot byly stanoveny aritmetické průměry hodnot dle vzorce:

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (39)$$

$$\bar{F}_{max} = \frac{\sum_1^n F_{max,i}}{n} = \frac{34,87}{8} = 4,36 \text{ kN} \quad (40)$$

30 % z průměrné hodnoty zatížení je tedy 1,31 kN, všechny naměřené hodnoty tedy musí být v rozsahu $4,36 \pm 1,31$ kN, tj. 3,05-5,67 kN. Výsledek zkoušky 3L-13 je tedy považován za neplatný a dále bude počítáno pouze se sedmi zkušebními tělesy.

3.2.7. Únosnost spojovacího prostředku ve smyku

Charakteristické hodnoty (5% kvantily) smykové síly $V_{r,k}$ byly určeny z výsledků experimentů na základě ČSN EN 14 358. Pro volbu vhodného parametrického rozdělení pravděpodobnosti byla využita metoda reziduálního (zbytkového) součtu čtverců. [26]

Vyhodnocení charakteristické hodnoty smykové únosnosti jednoho spojovacího prostředku třívrstvého panelu je shrnuto v tab. 8.

Tabulka 8: Vyhodnocení charakteristické hodnoty smykové únosnosti jednoho spojovacího prostředku

Zkušební těleso	V_r [kN]	\bar{Y}	$(V_{r,i} - \bar{Y})^2$	S_y	k_s	$V_{r,k}$ [kN]
3L-07	1,74		0,10			
3L-08	2,00		0,00			
3L-09	1,99		0,00			
3L-10	2,27	2,05	0,05	0,21	2,25	1,57
3L-11	2,10		0,00			
3L-12	1,92		0,02			
3L-14	2,35		0,09			

Charakteristická průměrná hodnota $V_{r,k}$ je uvažována jako průměrná hodnota \bar{y} (vztah (43)).

Použitý vztah pro výpočet maximální únosnosti jednoho spojovacího prostředku ve smyku:

$$V_{r,i} = \frac{F_{max,i}}{2} \text{ [kN]} \quad (41)$$

kde: $F_{\max,i}$ velikost maximální zatěžovací síly naměřená siloměrem na zatěžovacím lisu při smykové zkoušce prokluzu vrstev v N

Použitý vztah pro určení parametrického rozdělení pravděpodobnosti:

$$s_{y,x}^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (y_i - Y_i)^2 \quad (42)$$

kde: $s_{y,x}^2$ rozptyl
 n počet zkoušených vzorků
 y_i pravděpodobnost
 Y_i hodnota funkce hustoty parametrického rozdělení pravděpodobnosti v hodnotě x_i

Použité vztahy pro výpočet charakteristické hodnoty (5 % kvantilu):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \quad (43)$$

$$s_y = \max \left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}; 0,05 \cdot \bar{y} \right) \quad (44)$$

$$k_s(n) = \frac{6,5 n + 6}{3,7 n - 3} \quad (45)$$

$$m_k = \bar{y} - k_s(n) \cdot s_y \quad (46)$$

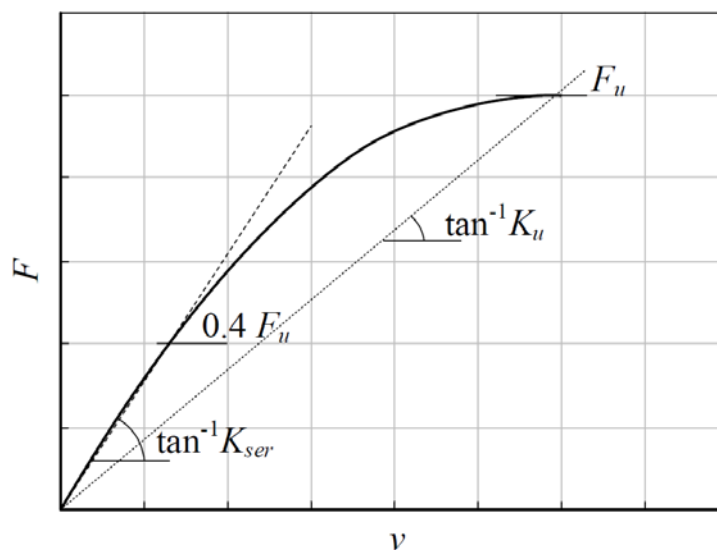
kde: \bar{y} průměrná hodnota
 m_i hodnota zatížení pro i-té měření
 s_y směrodatná odchylka měřeného souboru
 $k_s(n)$ součinitel zohledňující počet zkoušených vzorků
 (pro 7 měření je $k_s = 2,25$)
 m_k obecné vyjádření 5% kvantilu charakteristické hodnoty, zde odpovídá veličině $V_{r,k}$

3.2.8. Modul prokluzu spojovacího prostředku

Pokud mají posuzované konstrukční prvky nějaké mechanické spoje namáhané smykem, je nutné uvážit prokluz v těchto spojích. Ten je zohledněn právě modulem prokluzu. Rozlišujeme modul prokluzu pro mezní stav použitelnosti K_{ser} , a modul prokluzu pro mezní stav únosnosti K_u . Obecně mezi těmito dvěma hodnotami platí vztah:

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (47)$$

Tento vztah je odvozen z grafu na obrázku č. 63, na kterém je zobrazen pracovní diagram spojovacího prostředku. Počáteční nelineární chování křivky způsobené dosednutím zkušebního tělesa je eliminováno. Lineární průběh křivky pracovního diagramu je uvažován bezpečně mezi 10 % a 40 % předpokládané únosnosti spojovacího prostředku. Tento trend křivky je definován modulem prokluzu K_{ser} . V momentu dosažení meze kluzu začne průřez spojovacího prvku plastizovat, křivka se mění na exponenciální, deformace spojovacího prostředku je již trvalá. Následně křivka dosáhne svého vrcholu, tedy meze pevnosti f_u . Pokud se spojí počáteční bod a bod na mezi pevnosti, dostaneme tuhost definovanou jako modul prokluzu K_u , dosahující 2/3 hodnot K_{ser} . [27;28]



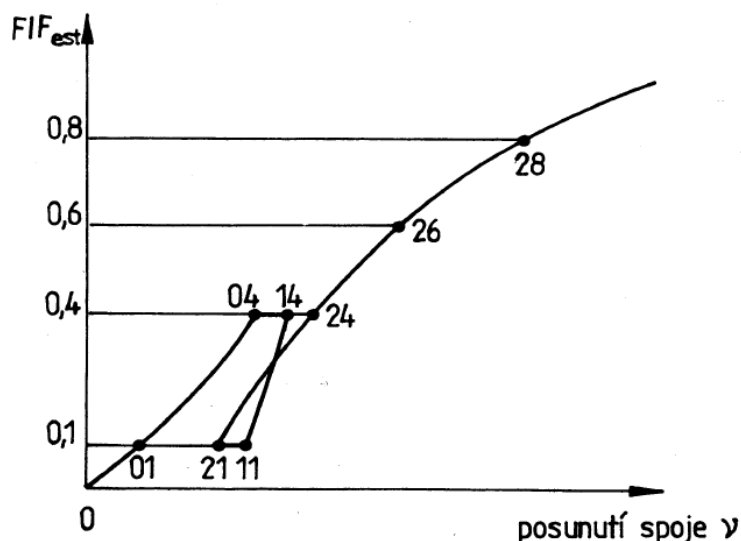
Obrázek 63: Pracovní diagram spojovacího prostředku a ukázka vztahu mezi K_{ser} a K_u . [28]

Modul prokluzu pro mezní stav použitelnosti K_{ser} se může určit pomocí dvou způsobů. Tím prvním je způsob určení modulu prokluzu na základě experimentů, dle postupu uvedeného v normě ČSN EN 26891 – „Dřevěné konstrukce – Spoje s mechanickými spojovacími prostředky – Všeobecné zásady pro zjišťování charakteristik únosnosti a přetvoření“ v části 8.5 Výpočty. Zde je uveden vzorec pro výpočet modifikovaného počátečního posunutí: [27]

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3} (v_{04,i} - v_{01,i}) \quad (48)$$

kde: $v_{04,i}$ posunutí konkrétního spoje při zatížení 40% F_{est}

$v_{01,i}$ posunutí konkrétního spoje při zatížení 10% F_{est}

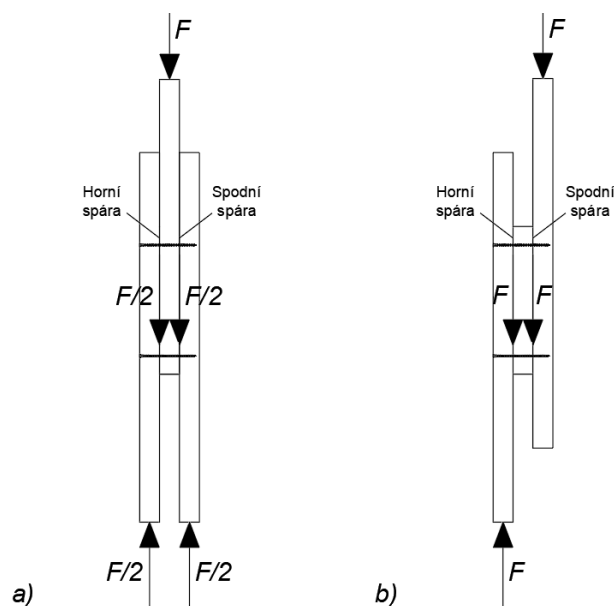


Obrázek 64: Idealizovaný diagram zatížení – posunutí a naznačené hodnoty při 10 % a 40 % F_{est} [27]

Modul prokluzu se následně vypočte dle vztahu:

$$k_s = 0,4 \frac{F_{est}}{v_{i,mod}} \quad (49)$$

Základním úvahou pro správné určení modulu prokluzu je pochopení přenosu zatížení ve zkušebním tělese. Většina podobných experimentů je prováděna dle schématu na obr. 65 a, kde dochází k zatížení prostřední vrstvy a zatížení se roznáší přes spojovací prostředek do krajních vrstev silou o velikosti $F/2$. V tomto případě je ale vystihující schéma na obr. 65 b, kde je zatěžována jedna krajní lamela, ze které se zatížení musí přenést do druhé krajní lamely. V takovém případě se zatížení přenáší silou o velikosti F .



Obrázek 65: a – typická zkouška prokluzu spojovacího prostředku
b – modifikovaná zkouška prokluzu spojovacího prostředku platná pro zkoumaná zkušební tělesa

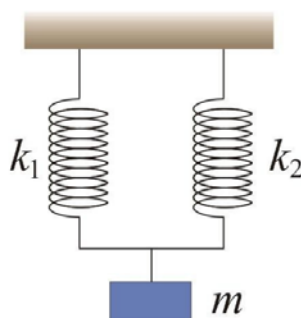
V tabulce č. 9. jsou uvedené hodnoty K_{ser} vypočtené na základě uvedených vztahů. Hodnoty jsou uvedené pro zkušební tělesa 3L-09 až 3L-14, pro zkušební tělesa 3L-07 a 3L-08 nejsou k dispozici potřebná data a zkušební těleso 3L-13 může být do těchto výpočtů opět zahrnuto, jelikož z grafu na obrázku č. 61 je vidět, že v rozmezí hodnot použitých k výpočtu K_{ser} probíhala zkouška správně.

Tabulka 9: Hodnoty K_{ser} získané na základě experimentů (rozdělení na horní a spodní spáru je naznačeno na obrázku č. 65, kde hraje zásadní roli poloha vrutu)

Zkušební těleso	Horní spára		Spodní spára		Celkem	
	$v_{i,mod}$ [mm]	$K_{ser,i}$ [N/mm]	$v_{i,mod}$ [mm]	$K_{ser,i}$ [N/mm]	$v_{i,mod}$ [mm]	$K_{ser,c}$ [N/mm]
3L-09	2,047	820,71	2,117	793,58	4,165	403,36
3L-10	2,171	773,84	1,852	907,13	4,023	417,60
3L-11	3,055	549,92	2,627	639,51	5,682	295,67
3L-12	2,601	645,91	2,571	653,44	5,172	324,83
3L-13	2,858	587,82	2,001	839,58	4,859	345,75
3L-14	2,582	650,66	1,762	953,46	4,343	386,83
Průměr $K_{ser,m}$		671,48		797,78		362,34

Čím větší je hodnota K_{ser} , tím větší je tuhost spoje. Z tabulky si lze všimnout, že tuhost spodní spáry je o něco vyšší než tuhost horní spáry. Tento trend se ale při vyšším zatížení změní, pravděpodobně vlivem zpevnění spoje v otlacení hlavou vrutu a třením mezi jednotlivými vrstvami. Celková tuhost zkušebního tělesa je pak polovina průměru tuhostí obou spár. To vychází z teorie sčítání tuhostí.

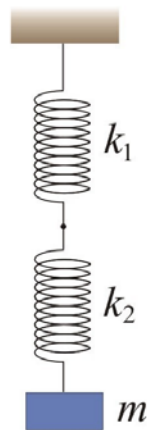
Sečtením tuhostí jednotlivých komponent lze ověřit správnost dosavadních úvah. Sčítání se provádí podle způsobu zapojení. Pro paralelní zapojení, které je zobrazené na obrázku č. 66, platí vztah (50). Pro sériové zapojení, které je zobrazené na obrázku č. 67, platí vztah (51). [29]



Obrázek 66: Ukázka paralelního zapojení soustavy pružin [29]

Tuhost paralelně zapojené soustavy:

$$k_c = k_1 + k_2 \quad (50)$$

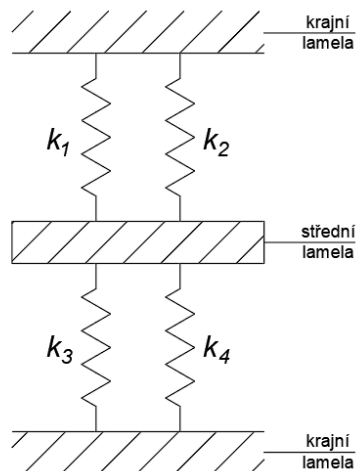


Obrázek 67: Ukázka sériového zapojení soustavy pružin [29]

Tuhost sériově zapojené soustavy:

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (51)$$

Zkušební těleso si lze představit jako soustavu pružin, která je kombinací paralelního a sériového zapojení. Schéma této soustavy je na obrázku č. 68. Pružiny představují vruty v místech jejich stříhu a jejich tuhosti. Břemeno uprostřed soustavy symbolizuje střední lamelu. Podpory představují krajní lamely.



Obrázek 68: Soustava pružin vystihující zkušební těleso

Vztah pro výpočet tuhosti této soustavy je tedy:

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{k_1 + k_2} + \frac{1}{k_3 + k_4} \quad (52)$$

Je uvažováno, že tuhosti k_1 až k_4 mají všechny stejnou hodnotu. Za celkovou tuhost k_c lze dosadit hodnotu celkového modulu prokluzu $K_{ser,m}$ vypočteného v tabulce č. 9, který je ekvivalentní k tuhosti.

Provede se úpravu vztahu:

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{k_1 + k_2} + \frac{1}{k_3 + k_4} = \frac{1}{k + k} + \frac{1}{k + k} = \frac{1}{2k} + \frac{1}{2k} = \frac{2}{2k} = \frac{1}{k}$$

Úpravou vztahu vznikne výraz:

$$k = k_c = 362,34 \text{ N/mm}$$

$$K_{ser,1} = 362,34 \text{ N/mm}$$

Modul prokluzu jednoho spojovacího prostředku v jednom stříhu je tedy $K_{ser,1} = 362,34$ N/mm. Má tedy stejnou hodnotu jako celkový modul prokluzu zkušební tělesa. Modul prokluzu jedné spáry se vypočte jako:

$$K_{ser,sp} = K_{ser,1} + K_{ser,1} = 724,68 \text{ N/mm}$$

Výsledný modul prokluzu stanovený experimentálně je tedy:

$$K_{ser} = K_{ser,1} = 362,34 \text{ N/mm}$$

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} = 241,56 \text{ N/mm}$$

Druhý způsob určení modulu prokluzu K_{ser} je na základě zjednodušených vztahů uvedených v normách. Jednotný postup je uveden v ČSN EN 1995-1-1- „Navrhování dřevěných konstrukcí-Část 1-1: Obecná pravidla-Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby“, v části 7.1 Prokluz spoje. Zde se modul prokluzu určuje na základě charakteristické průměrné objemové hmotnosti dřeva a průměru spojovacího prostředku. Vzorce pro jednotlivé spojovací prostředky jsou uvedeny na obrázku č. 69. [21]

Typ spojovacího prostředku	K_{ser}
Kolíky Svorníky s nebo bez vůle ^a Vruty Hřebíky (s předvrtáním)	$\rho_m^{1,5} d/23$
Hřebíky (bez předvrtání)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Sponky	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$
Prstencový hmoždík typu A podle EN 912 Taliřový hmoždík typu B podle EN 912	$\rho_m d/2$
Zazubené hmoždíky:	
– Hmoždíky typu C1 až C9 podle EN 912	$1,5\rho_m d/4$
– Hmoždíky typu C10 až C11 podle EN 912	$\rho_m d/2$
^a Vůle se má přidat k přetvoření odděleně.	

Obrázek 69: Vzorce pro stanovení K_{ser} dle ČSN EN 1995-1-1 [21]

V tomto případě se jedná hned o první vzorec v tabulce. Uvažovaná průměrná objemová hmotnost by měla být stanovena při standardních podmínkách, tj. 20 °C a 65 % relativní vlhkosti. V případě zkoušky se podmínky mírně lišily, avšak tento detail je zanedbatelný.

Prvně je třeba stanovit efektivní průměr vrutu d_{ef} dle vztahu:

$$d_{ef} = 0,7 * 1,1 * d = 3,85 \text{ mm} \quad (53)$$

kde: d průměr vrutu (včetně závitu)

Modul prokluzu K_{ser} dle ČSN EN 1995-1-1 je tedy:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \frac{d_{ef}}{23} = 1615,52 \text{ N/mm} \quad (54)$$

kde: ρ_m průměrná objemová hmotnost (stanovená v tabulce č. 7. je $\rho_m=435,3 \text{ kg/m}^3$)

Lze si všimnout, že hodnota vypočtená dle ČSN EN 1995-1-1 je několikrát větší než hodnota získaná z experimentu. Výsledky experimentu jsou nižší, hodnota stanovená normou je tedy na straně nebezpečné od hodnoty stanovené experimentálně. Zajímavé zjištění je také to, že vzorce uvedené v různých národních normách udávají taktéž rozdílné hodnoty modulu prokluzu. Jako příklad je zde uveden ještě výpočet dle německé národní normy DIN 1052:2008 a švýcarské národní normy SIA 265:2012.

Dle německé DIN 1052:2008 se K_{ser} pro hřebíkové a vrutové spoje bez předvrtání vypočítá dle vztahu: [28]

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \frac{d_{ef}^{0,8}}{25} = 1135,03 \text{ N/mm} \quad (55)$$

Dle švýcarské SIA 265:2015 se zanedbává objemová hmotnost dřeva. Bylo zjištěno, že u měkkého dřeva má tento parametr velmi malý vliv na výsledný modul prokluzu. Na druhou stranu ale tato norma zohledňuje směr působení zatížení. Podle toho, zda zatížení působí kolmo k vláknům, nebo rovnoběžně s vlákny, se následně do vzorce dosazuje hodnota 30 (kolmo) nebo 60 (rovnoběžně). K_{ser} pro hřebíkové a vrutové spoje bez předvrtání se vypočítá bezpečně dle vztahu: [28]

$$K_{ser} = 30d_{ef}^{1,7} = 296,76 \text{ N/mm} \quad (56)$$

Tato hodnota se lépe shoduje s hodnotou získanou z experimentálních zkoušek a jako jediná je na bezpečné straně.

3.2.9. Závěr experimentu

Průměrná hodnota smykové únosnosti vrutů Würth 5x80 používaných ve spojích třívrstvých CLT panelů stanovená ze zkoušek sedmi zkušebních těles je $V_r = 2,05 \text{ kN}$. Charakteristická hodnota smykové únosnosti těchto vrutů je $V_{r,k} = 1,57 \text{ kN}$. Tyto hodnoty platí pro jeden dvojstržný vrut.

Experimentálně získaný průměrný modul prokluzu jednoho spojovacího prostředku v jednom stříhu pro mezní stav použitelnosti je $K_{ser} = 362,34$ N/mm. Modul prokluzu jednoho spojovacího prostředku v jednom stříhu pro mezní stav únosnosti je $K_u = 241,56$ N/mm. Je zajímavé, s jakým rozdílem se rozchází výpočty dle jednotlivých norem navzájem i ve vztahu k experimentální analýze. Tato problematika by měla být podrobena hlubšímu výzkumu k nalezení optimálního řešení. Pro další výpočty je uvažována hodnota modulu prokluzu získaná experimentálně.

3.3. Výpočet třívrstvého stropního panelu z křížem vrstveného dřeva pomocí modifikované gama metody

Do následujícího výpočetního modelu je zahrnut zjištěný modul prokluzu K_u .

3.3.1. Vstupní materiálové charakteristiky výpočtu

Dřevo C24

$E_{mean} = 11,0$ GPa

$G_{mean} = 690$ MPa

$G_{R,mean} = 50$ MPa

$\rho_m = 435,3$ kg/m³

$K_u = 241,56$ N/mm

3.3.2. Geometrické vlastnosti zkušební tělesa

Celková šířka: $b = 1000$ mm

Šířka lamely: $b_{lam} = 200$ mm

Celková tloušťka: $h = 81$ mm

Tloušťka lamely: $h_{lam} = 27$ mm

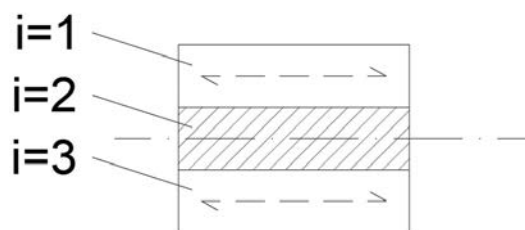
Celková délka: $L = 3300$ mm

Rozpětí panelu: $l = 3000$ mm

Vzdálenosti těžišť: $a_1 = 27$ mm

$a_2 = 0$ mm

$a_3 = 27$ mm



Obrázek 70: Rozložení jednotlivých vrstev vzorku

3.3.3. Výpočet

Tabulka 10: Přiřazení základních vlastností jednotlivým vrstvám průřezu

i	směr vláken [°]	šířka [mm]	výška [mm]	E_i [MPa]	G_i [MPa]	A_i [mm ²]	I_i [mm ⁴]
1	0	1000	27	11000	690	27000	1640250
2	90	1000	27	0	50	27000	1640250
3	0	1000	27	11000	690	27000	1640250

Výpočet součinitele γ :

Na jedno křížení lamel jsou použity dva spojovací prostředky, tj. $n_s = 2$.

Vzdálenost spojovacích prostředků:

$$s = \frac{b_{lam}}{\frac{b}{b_{lam}} * n_s} = \frac{200}{\frac{1000 * 2}{200}} = 20 \text{ mm}$$

Deformace příčné vrstvy je minimální a může být zanedbána.

$$\frac{s_{90,i}}{K_{90,i}} = 0 \text{ mm}^2/N$$

$$\gamma_1 = \left\{ 1 + \left[\pi^2 E_1 A_1 \left(\frac{s_{90,i}}{K_{90,i}} + \frac{s}{K_u} \right) \frac{1}{l^2} \right] \right\}^{-1} = 0,0358$$

$$\gamma_2 = \left\{ 1 + \left[\pi^2 E_2 A_2 \left(\frac{s_{90,i}}{K_{90,i}} + \frac{s}{K_u} \right) \frac{1}{l^2} \right] \right\}^{-1} = 1$$

$$\gamma_3 = \left\{ 1 + \left[\pi^2 E_3 A_3 \left(\frac{s_{90,i}}{K_{90,i}} + \frac{s}{K_u} \right) \frac{1}{l^2} \right] \right\}^{-1} = 0,0358$$

Výpočet ohybové tuhosti efektivního průřezu EI_{eff} :

$$EI_1 = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 = 2,578 * 10^{10} \text{ Nmm}^2$$

$$EI_2 = E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 = 0 \text{ Nmm}^2$$

$$EI_3 = E_3 I_3 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2 = 2,578 * 10^{10} \text{ Nmm}^2$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n EI_i = 5,157 * 10^{10} \text{ Nmm}^2$$

Zatížení a vnitřní síly:

Aby vycházely smysluplné výsledky, je třeba definovat hranici považovanou za mez únosnosti. Naměřené hodnoty zaznamenané do tabulky 3 znamenají maximální možné síly, které byl panel schopný přenést. Po překročení těchto únosností již působící zatížení začalo klesat vlivem poddajnosti porušeného panelu a zkouška mohla být ukončena. Ovšem v tuto chvíli již byla většina lamel při spodním povrchu panelu porušena, tzn. dávno za mezí únosnosti. Jako rozumnou mez únosnosti bych považoval okamžik, kdy začalo docházet k porušování lamel. Hodnoty zatížení v těchto situacích lze vyčíst z grafů na obrázcích č. 27 až č. 38, z datových záznamů a z videodokumentace průběhu zkoušek. Tyto hodnoty jsou zaznamenané v tabulce č. 11 a přepočítané na průměrnou charakteristickou hodnotu 5 % kvantilu dle postupu uvedeného v kapitole 3.1.7.

Tabulka 11: Výpočet charakteristické hodnoty únosnosti 5 % kvantilu

Zkušební těleso	V_r [kN]	\bar{Y}	$(V_{r,i} - \bar{Y})^2$	S_y	k_s	$V_{r,k}$ [kN]
3L-02	131,31		807,70			
3L-03	67,46		1255,28			
3L-04	104,30	102,89	2,00	22,84	2,46	46,70
3L-05	107,36		20,03			
3L-06	104,01		1,25			

U zkušební tělesa 3L-01 nebylo možné zcela jasně určit hodnotu zatížení při MSÚ, proto bylo toto těleso ze statistiky vyloučeno. U zkušební tělesa 3L-03 je vidět výrazně nižší mez únosnosti. Jedna z pěti lamel na spodní straně byla prokazatelně nižší třídy pevnosti, v jejím nejslabším místě se nacházelo několik suků. Po porušení této lamely ale zatížení dále rostlo a zkušební těleso bylo nakonec schopné dosáhnout podobných maximálních zatížení, jako ostatní zkušební tělesa. Nicméně dosažení mezního stavu únosnosti se musí uvažovat v okamžiku porušení první lamely. Lamela a její porušení je vidět na obrázku č. 23.

Vlivem vysoké nehomogenity dřeva a množství jeho přirozených vad je výsledná hodnota pevnosti velmi snížena. Skutečná pevnost dřeva bez jeho přirozených vad je mnohem vyšší. Výpočtem 5 % kvantilu únosnosti zkušebních vzorků se získá charakteristická hodnota únosnosti. Při zatížení zkušební tělesa touto silou je možné získat napětí v průřezu podobné pevnosti materiálu dle způsobu namáhání. Zde se jedná o kombinaci tahu a ohybu. Pro přesné vyhodnocení této statistiky je zapotřebí větší množství vzorků. Je možné, že při aktuálním počtu vzorků $n=5$ není výsledek analýzy dostatečně přesný.

Vnitřní síly na průřezu:

Posouvající síla: $V = 46,7 \text{ kN}$

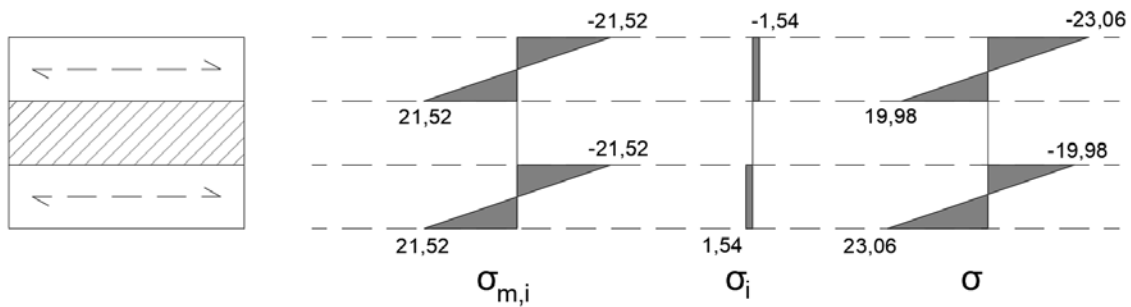
Ohybová moment: $M = 46,7 * 0,16 = 7,47 \text{ kNm}$

Maximální normálové napětí:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{E I_{eff}} = 1,54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,1,3} = \frac{0,5 E_i h_i M}{E I_{eff}} = 21,52 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \sigma_{1,3} + \sigma_{m,1,3} = 23,06 \text{ MPa}$$



Obrázek 71: Vypočtená normálová napětí na průřezu

Posouzení průřezu:

Posouzení průřezu se provede na kombinaci ohybu a tahu. Není třeba přepočítávat únosnosti do návrhových hodnot, řešíme charakteristickou únosnost.

Charakteristické hodnoty únosnosti:

V tahu: $f_{t,0,k} = 14 \text{ MPa}$

V ohybu: $f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma_i}{f_{t,0,k}} + \frac{\sigma_{m,i}}{f_{m,k}} \leq 1 \quad (57)$$

$$\frac{1,54}{14} + \frac{21,52}{24} = 1,006 \approx 1 - \text{ÚVAHA JE SPLNĚNA}$$

Výpočet průhybu zkušební tělesa:

Výpočet průhybu je možné provést pro maximální zatížení, které bylo zkušební těleso schopné přenést. Výpočet průhybu závisí na parametrech lokální ohybové tuhosti EI_{lok} a smykové tuhosti vyjádřené ve zlomku GA/β . Tyto vlastnosti byly pro třívrstvé panely vypočteny kapitole 3.1.8. a jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5. Výsledný průměrný průhyb se tedy získá ze vztahu:

$$w = \frac{F_1 a}{24EI_{lok}} (3l^2 - 4a^2) + F_1 a \left(\frac{GA}{\beta} \right)^{-1} = 224,99 \text{ mm}$$

Průměrná hodnota maximálního průhybu zkušebních těles naměřená pomocí snímačů WDS je uvedena v tabulce 12.

Tabulka 12: Naměřené průhyby zkušebních těles při F_{max}

Zkušební těleso	$w_{glob,max}$ [mm]	$w_{glob,max,m}$ [mm]
3L-01	164,66	
3L-02	196,20	
3L-03	181,25	198,90
3L-04	194,49	
3L-05	226,70	
3L-06	230,08	

Rozdíl mezi výsledkem experimentu a výpočtu je tedy:

$$\Delta w = w - w_{glob,max,m} = 26,09 \text{ mm}$$

3.3.4. Závěr výpočetního modelu

Využití průřezu při zatížení o hodnotě charakteristické únosnosti se pohybuje na hodnotě 100,6 %, což je těsně nad hranicí únosnosti. Tohoto výsledku bylo zapotřebí dosáhnout, jelikož je počítán průřez právě na mezi únosnosti. Výpočet lze považovat za použitelný včetně modulu prokluzu vypočteného v kapitole 3.2.8.

Odchylka průhybu může být způsobena odchylkami během experimentů, jelikož i malé odchylky v řádu jednotek milimetrů při umístění zkušební tělesa, zatěžovacích sil apod. znamenají poměrně značný rozdíl ve výsledném průhybu zkušební tělesa.

4. ZÁVĚR

4.1. Přínos k řešené problematice

Cílem diplomové práce v první části bylo zpracovat dostupné informace o konstrukcích z křížem vrstveného dřeva a shrnout je tak, aby čtenář lehce pronikl do dané problematiky a dokázal se v navazující části diplomové práce orientovat. Závěrem této části jsou naznačeny možné postupy výpočtů těchto konstrukcí. Některé tyto postupy již vychází z eurokódu 5, jiné tam budou pravděpodobně postupně modifikovány a zahrnuty.

V úvodu experimentální části je prezentována jedna ze zkoušek prováděných právě na těchto CLT konstrukcích, včetně její vyhodnocení. Zároveň je u této zkoušky upozorněno na klíčový parametr – modul prokluzu spojovacího prostředku, pomocí kterého se provádí návrh mechanicky spojených CLT konstrukcí. Tento modul výrazně ovlivňuje prostorovou tuhost a únosnost těchto konstrukcí.

To vedlo k provedení další experimentální analýzy, kde byly vytvořeny vzorky simulující jeden mechanický spoj křížených lamel. Zatěžováním těchto vzorků byla získána potřebná data a byl proveden výpočet modulu prokluzu. Zajímavé bylo porovnání hodnot zjištěných experimentem a hodnot vypočtených dle různých norem. Rozdíly byly poměrně velké, a vzhledem k experimentu se hodnoty vypočtené z většiny norem pohybovaly na nebezpečné straně. V dalších výpočtech byl uvažován modul prokluzu zjištěný z experimentu. Dále bylo zjištěno, že při zatížení spoje dochází k vytvoření pouze jednoho plastického kloubu na spojovacím prostředku, a to ve spodní spáře. To je způsobeno pravděpodobně třením jednotlivých vrstev a zpevněním horní vrstvy v otažení vlivem velikosti hlavy vrutu. Toto chování vrutu lze potvrdit i z provedených zkoušek celých panelů, kde docházelo taktéž k vytvoření většinou pouze jednoho plastického kloubu na spojovacím prostředku. Dále byla určena maximální charakteristická hodnota smykové únosnosti spojovacího prostředku, tedy zatížení, při kterém dojde k vytvoření plastického kloubu.

V poslední části byly využity poznatky získané ohledně chování mechanického spoje aplikováním při výpočtu zkoušeného panelu gama metodou. Byl stanoven součinitel tuhosti spojení vrstev γ , pomocí kterého byla vypočtena efektivní ohybová tuhost průřezu. Mezní stav únosnosti byl určen jako moment porušení první lamely zkušebního tělesa. Jelikož z experimentální analýzy existují veškerá data potřebná k výpočtu, bylo ověřeno napětí na průřezu při stanoveném mezním stavu únosnosti. Toto napětí se pohybovalo na mezi pevnosti při 5 % kvantilu.

4.2. Námět pro další výzkum

Námětem pro další výzkum je jednoznačně problematika modulu prokluzu. Velmi se liší hodnoty získané podle výpočtů z jednotlivých národních norem, ale i globálně tyto hodnoty od hodnoty získané experimentálně. Nejlepší shody bylo dosaženo při porovnání se

švýcarskou národní normou SIA 265:2015. Tuto problematiku je nicméně nutné podrobit hlubšímu průzkumu a zjistit, které řešení nejvíce odpovídá realitě.

Dalším námětem na výzkum je modifikování vzorce (11) na výpočet zatížení spojovacího prostředku. Tento vztah je převzatý z přílohy B.2 Eurokódu 5. Při jeho použití na výpočet CLT konstrukcí však vychází zatížení na spojovací prostředek přibližně 2-3x větší, než je spojovací prostředek schopný přenést. Pro představu, tento vzorec uvažuje zatížení spojovacího prostředku v závislosti na posouvající síle na zkušební tělese. Při čtyřbodové ohybové zkoušce je průběh posouvajících sil mezi podporou a zatěžovací silou konstantní, a následně mezi jednotlivými zatěžovacími silami nulový. To by podle uvedeného vzorce znamenalo, že zatížení všech spojovacích prostředků v krajních částech vzorku je stejné, a zatížení všech spojovacích prostředků ve střední části je nulové. Realita je ovšem taková, že velikost zatížení spojovacího prostředku se rovná smykové síle vyvozené velikostí prokluzu mezi jednotlivými vrstvami. Prokluz uprostřed rozpětí zkušební tělesa je nulový, ale od tohoto bodu se směrem ke kraji lineárně zvětšuje. Nejvíce zatížená řada spojovacích prostředků je tedy první řada od kraje zkušební tělesa. Tuto myšlenku je třeba promítnout do modifikace zmíněného vzorce. Pokud bude nalezen použitelný vztah, bylo by vhodné do posouzení mezního stavu únosnosti zanechat posudek této krajní řady spojovacích prostředků. Omezujícími podmínkami by bylo překročení smykové únosnosti této řady spojovacích prostředků či překročení maximální limitní deformace 15 mm v této řadě (dle ČSN EN 26891).

5. LITERATURA

- [1] PAVLAS, Marek. *Dřevostavby z vrstvených masivních panelů: technologie CLT*. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-271-0055-2.
- [2] Skleníkové plyny: emise podle zemí a odvětví. *Zpravodajství - Evropský parlament* [online]. 2021, 28.10.2021 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20180301STO98928/sklenikove-plyny-emise-podle-zemi-a-odvetvi-infografika>
- [3] Kolik kg CO₂ absorbuje za svůj průměrný život jeden strom?. *Veronica - ekologický institut* [online]. ZO ČSOP Veronica, 2010, 05.08.2010 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.veronica.cz/otazky?i=337>
- [4] Jakou roli hrají emise CO₂ z výroby cementu v klimatické změně?. *Fakta o klimatu* [online]. Ondráš Příbyla, 2021, 13.02.2021 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/emise-vyroba-cementu>
- [5] Uhlíková stopa. *Wikipedie* [online]. 2022, 13.12.2022 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhlíková_stopa
- [6] CLT Panels USA. *NC State University* [online]. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://sites.cnr.ncsu.edu/clt-panels/history-of-cross-laminated-timber/>

- [7] Křížem lepené dřevo pro vícepodlažní stavby (část 2). *TZB Info* [online]. 2012, [cit. 2023-01-08]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9349-krizem-lepene-drevo-pro-vicepodlazni-stavby-cast-2>
- [8] Mass Timber Products: Innovative Wood-Based Building Materials. *NC State Extension* [online]. 2018 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://content.ces.ncsu.edu/mass-timber-products-innovative-wood-based-building-materials>
- [9] ČSN 73 0802. *Požární bezpečnost staveb: Nevýrobní objekty*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [10] ING. JÍRŮ, Marie. *Vícepodlažní budovy z křížem vrstveného dřeva* [online]. Praha, 2016 [cit. 2023-01-08]. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.
- [11] Ing. Lukáš VELEBIL Ph.D. *Únosnost a tuhost výztužných stěn z mechanicky spojovaného křížem vrstveného dřeva* [online]. Praha, 2020 [cit. 2023-01-08]. Disertační práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.
- [12] Normové hodnoty součinitele prostupu tepla UN,20 jednotlivých konstrukcí dle ČSN 73 0540-2:2011 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. *TZB Info* [online]. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/136-normove-hodnoty-soucinitele-prostupu-tepla-un-20-jednotlivych-konstrukci-dle-csn-73-0540-2-2011-tepelna-ochrana-budov-cast-2-pozadavky>
- [13] BC. MATĚJKA, Šimon. *Křížem vrstvené dřevo* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-01-08]. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.
- [14] Pokročilé metody pro navrhování konstrukcí z CLT. *Dřevo-stavby* [online]. Praha: doc. Ing. Petr Kuklík, CSc., Ing. arch. Bc. Anna Gregorová, Ing. Lenka Melzerová, Ph.D., 2013, 9.9.2013 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/5853-masivni-drevo-clt-panelu-material-pro-stavby-budoucnosti>
- [15] Konstrukce dřevostaveb. *Dřevo-stavby* [online]. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/5853-masivni-drevo-clt-panelu-material-pro-stavby-budoucnosti>
- [16] X-Rad connection system. *Rothoblaas* [online]. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/x-rad/x-rad>
- [17] ČSN EN 408+A1. *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo: Stanovení některých fyzikálních a mechanických hodnot*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [18] Mechanické vlastnosti dřeva domácích dřevin. *Dřevostavitel* [online]. Dřevostavitel, Ing. Petr Novák, 2013, 03.0.5.2013 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/mechanicke-vlastnosti-dreva-domacich-drevin>
- [19] ČSN 73 2824-1. *Třídění dřeva podle pevnosti: Část 1: Jehličnaté dřevo*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [20] ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo: Třídy pevnosti*. Praha: ÚNMZ, 2016.

- [21] ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla: Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- [22] ČSN EN 1912. *Konstrukční dřevo - třídy pevnosti: Přiřazení vizuálních tříd a dřevin*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [23] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov: Část 2: Požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [24] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: ČNI, 2004.
- [25] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení: Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: ČNI, 2004.
- [26] ČSN EN 14358. *Dřevěné konstrukce: Výpočet a ověřování charakteristických hodnot*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [27] ČSN EN 26891. *Dřevěné konstrukce - SPOJE S MECHANICKÝMI SPOJOVACÍMI PROSTŘEDKY: Všeobecné zásady pro zjišťování charakteristik únosnosti a přetvoření*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1994.
- [28] *Design of Connections in Timber Structures* [online]. Německo: COST, 2018 [cit. 2023-01-08]. ISBN 978-3-8440-6144-4.
- [29] *Náhradní soustředěná hmota, Tuhost a poddajnost konstrukce, Skládání tuhostí* [online]. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/koubova/cv_2_ZDK.pdf

Seznam použitého softwaru

- Autodesk AutoCAD 2021
- SCIA Engineer 22.0
- Microsoft office Excel

Seznam tabulek

Tabulka 1: Součinitele tepelné vodivosti vybraných materiálů	9
Tabulka 2: Základní mechanické vlastnosti dřeva dle ČSN 73 2824-1 [19].....	17
Tabulka 3: Vyhodnocení char. hodnoty smykové únosnosti třívrstevných panelů.....	47
Tabulka 4: Vyhodnocení char. hodnoty smykové únosnosti pětivrstevných panelů	47
Tabulka 5: Vyhodnocení char. hodnoty smykových tuhostí třívrstevných panelů	49
Tabulka 6: Vyhodnocení char. hodnoty smykových tuhostí pětivrstevných panelů.....	49
Tabulka 7: Objemové a vlhkostní parametry zkušebních těles	53
Tabulka 8: Vyhodnocení charakteristické hodnoty smykové únosnosti jednoho spojovacího prostředku	63
Tabulka 9: Hodnoty K_{ser} získané na základě experimentů	67
Tabulka 10: Přiřazení základních vlastností jednotlivým vrstvám průřezu	72
Tabulka 11: Výpočet charakteristické hodnoty únosnosti 5 % kvantilu	73
Tabulka 12: Naměřené průhyby zkušebních těles při F_{max}	75

Seznam obrázků

Obrázek 1: Graf růstu produkce CLT v Evropě od roku 1995 v metrech krychlových [7] ..	3
Obrázek 2: Typická skladba CLT panelu [8]	4
Obrázek 3: Možnosti sestavení lamel v rámci jedné vrstvy [7]	8
Obrázek 4: Požadavky na součinitel prostupu tepla U pro vnější stěnu [12;23].....	9
Obrázek 5: Součinitele prostupu tepla U pro typické tloušťky CLT panelů [1]	10
Obrázek 6: Parametry ovlivňující valivý smyk [14]	12
Obrázek 7: Uspořádání experimentu na valivý smyk [14].....	12
Obrázek 8: Vícevrstvý stropní panel Novatop Element [15]	14
Obrázek 9: Spřažený žebrový stropní panel [1]	14
Obrázek 10: Varianty napojení stropních panelů [1]	15
Obrázek 11: Přípoj pomocí zadlabaných háků [1]	16
Obrázek 12: Výše přípoj závitových tyčí a trubek [1], níže systém Rothoblaas [16].....	16
Obrázek 13: Průběh normálových napětí v efektivním průřezu v závislosti na tuhosti spojení efektivních vrstev	20
Obrázek 14: Náhradní konstrukce složená z nosníků A a B	21
Obrázek 15: Statická schémata s přiřazením jednotlivých koeficientů k_i [10].....	24
Obrázek 16: Schéma geometrie zkušebních těles	26
Obrázek 17: Zatěžovací schéma zkušebních těles	27
Obrázek 18: Schéma rozložení zkoušky	28
Obrázek 19: Uspořádání zkoušky v laboratoři	29
Obrázek 20: Umístění podpor a TR snímačů měřících prokluz vrstev a otláčení podpory	29
Obrázek 21: Umístění WDS snímačů měřících svislý průhyb zkušebního tělesa	30
Obrázek 22: Prokluz jednotlivých vrstev a jeho měření pomocí TR snímačů.....	32
Obrázek 23: Ukázka porušení třívrstvého panelu	33
Obrázek 24: Ukázka porušení třívrstvého panelu	33
Obrázek 25: Ukázka porušení pětivrstvého panelu.....	34
Obrázek 26: Ukázka porušení pětivrstvého panelu.....	34
Obrázek 27: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-01 (snímače S1 – S6) .	35
Obrázek 28: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-01 (snímače S7 – S10)	35
Obrázek 29: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-02 (snímače S1 – S6) .	36
Obrázek 30: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-02 (snímače S7 – S14)	36
Obrázek 31: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-03 (snímače S1 – S6) .	37
Obrázek 32: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-03 (snímače S7 – S14)	37
Obrázek 33: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-04 (snímače S1 – S6) .	38
Obrázek 34: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-04 (snímače S7 – S14)	38
Obrázek 35: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-05 (snímače S1 – S6) .	39
Obrázek 36: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-05 (snímače S7 – S14)	39
Obrázek 37: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-06 (snímače S1 – S6) .	40
Obrázek 38: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 3L-06 (snímače S7 – S14)	40
Obrázek 39: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-01 (snímače S1 – S6) .	41
Obrázek 40: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-01 (snímače S7 – S18)	41
Obrázek 41: Závislost deformace a zatížení zkušebního tělesa 5L-02 (snímače S1 – S6) .	42

Obrázek 42: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-02 (snímače S7 – S18)	42
Obrázek 43: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-03 (snímače S1 – S6)	43
Obrázek 44: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-03 (snímače S7 – S18)	43
Obrázek 45: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-04 (snímače S1 – S6)	44
Obrázek 46: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-04 (snímače S7 – S18)	44
Obrázek 47: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-05 (snímače S1 – S6)	45
Obrázek 48: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-05 (snímače S7 – S18)	45
Obrázek 49: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-06 (snímače S1 – S6)	46
Obrázek 50: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 5L-06 (snímače S7 – S18)	46
Obrázek 51: Schéma geometrie zkušebních těles	53
Obrázek 52: Zatěžovací diagram zkušebních těles	54
Obrázek 53: Schéma rozložení zkoušky	55
Obrázek 54: Uspořádání zkoušky v laboratoři	56
Obrázek 55: Porušený vzorek	58
Obrázek 56: Rozebraný porušený vzorek	59
Obrázek 57: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-09 (snímače S1 – S4)	60
Obrázek 58: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-10 (snímače S1 – S4)	60
Obrázek 59: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-11 (snímače S1 – S4)	61
Obrázek 60: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-12 (snímače S1 – S4)	61
Obrázek 61: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-13 (snímače S1 – S4)	62
Obrázek 62: Závislost deformace a zatížení zkušební tělesa 3L-14 (snímače S1 – S4)	62
Obrázek 63: Pracovní diagram spojovacího prostředku a vztah mezi K_{ser} a K_u . [28]	65
Obrázek 64: Idealizovaný diagram zatížení [27]	66
Obrázek 65: a – typická zkouška prokluzu spojovacího prostředku; b – modifikovaná zkouška prokluzu spojovacího prostředku platná pro zkoumaná zkušební tělesa	66
Obrázek 66: Ukázka paralelního zapojení soustavy pružin [29]	67
Obrázek 67: Ukázka sériového zapojení soustavy pružin [29]	68
Obrázek 68: Soustava pružin vystihující zkušební těleso	68
Obrázek 69: Vzorce pro stanovení K_{ser} dle ČSN EN 1995-1-1 [21]	69
Obrázek 70: Rozložení jednotlivých vrstev vzorku	71
Obrázek 71: Vypočtená normálová napětí na průřezu	74