



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

**Vícepodlažní budovy z křížem vrstveného dřeva**

**Multi-Storey Wooden Buildings from Cross Laminated Timber**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

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

**Bc. Marie Jírů**

---

**Praha 2016**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Jirů Jméno: Marie Osobní číslo: 380881  
Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vícepodlažní dřevostavby z křížem vrstveného dřeva  
Název diplomové práce anglicky: Multi-Storey Wooden Buildings from Cross Laminated Timber

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce bude obsahovat analýzu vícepodlažních dřevostaveb z křížem vrstveného dřeva včetně příkladu jejich aplikace.

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/tentis/>
- [5] ČSN EN 1995-1-1
- [6] Mayo, J.: Solid Wood

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

Datum zadání diplomové práce: 22.2.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2016

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“.*

22.2.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto magisterskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího doc. Ing. Petra Kuklíka, CSc.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 21. května 2016

.....

Marie Jírů

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych na tomto místě poděkovala vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Petru Kuklíkovi CSc. za všechnen čas, který mi věnoval a za cenné rady a pomoc, které mi při psaní této práce poskytl.

Tato práce vznikla v rámci projektu Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.

## **Anotace:**

Dřevo jako stavební materiál má velký potenciál. Jako obnovitelný a ekologický stavební materiál je považováno za materiál budoucnosti. Křížem vrstvené dřevo využívá potenciál dřeva a posouvá výstavbu dřevostaveb z jedno až dvou patrových dřevěných domků k vícepodlažním až výškovým budovám. Jedná se o prefabrikované systémy, proto je výstavba s křížem vrstveným dřevem velmi rychlá a efektivní. Bohužel použití křížem vrstveného dřeva není zastřešeno v Eurokódu 5 a výška dřevěných budov je ve většině zemí přísně omezena požárními normami. Tato práce se zabývá konstrukčními vlastnostmi křížem vrstveného dřeva, úskalími jeho použití ve vícepodlažních dřevostavbách a ukazuje praktické použití křížem vrstveného dřeva v návrhu vícepodlažní budovy.

**Klíčová slova:** *CLT, křížem vrstvené dřevo, vícepodlažní budovy z křížem vrstveného dřeva, dřevěné konstrukce*

**Abstract:**

Timber has great potential as a structural building material. As a renewable and environmental building material it is considered a building material of a future. Cross-Laminated Timber (CLT) utilizes the potential of timber and can now be used to build high-rise buildings, far beyond the historical limits of 1-2 storeys for standard timber structures. Prefabricated systems of CLT make construction fast and effective with minimal noise and vibration during construction. All these qualities are making cross-laminated timber a near perfect building material. Unfortunately cross-laminated timber is not yet included in the Eurocode 5 and in most countries the height of timber buildings is strictly limited due to fire safety. This diploma investigates the material properties of CLT and analyses the issues of multi-storey timber buildings. A comprehensive design of a CLT multi-storey building is also included.

**Keywords:** *CLT, cross-laminated timber, multi-storey buildings, timber structures*

<b>1.</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1	Dřevo a CO <sub>2</sub> .....	1
1.2	Proč CLT.....	2
1.3	Cíle diplomové práce.....	3
1.4	Obsah práce.....	3
<b>2.</b>	<b>Křížem vrstvené dřevo (CLT)</b> .....	<b>4</b>
2.1	Úvod.....	4
2.1.1	Historie .....	4
2.1.2	Definice CLT.....	4
2.2	Výroba CLT.....	5
2.2.1	Specifikace materiálu .....	5
2.2.2	Výroba .....	7
2.3	Vlastnosti materiálu .....	9
2.3.1	Mechanické vlastnosti .....	9
2.3.2	Chování stropních panelů .....	12
2.4	Analytické metody pro CLT prvky.....	14
2.4.1	Mechanicky spojované nosníky (Gamma metoda).....	14
2.4.2	Kompozitní teorie (k metoda) (3).....	16
2.4.3	Smyková analogie.....	19
2.5	Výpočet pomocí CLT Designeru (10).....	21
2.5.1	Popis programu.....	21
2.5.2	Jak program počítá.....	22
2.6	Porovnání výsledků předchozích metod a výsledků z CLTdesigneru ...	25
2.6.1	Vstupní hodnoty .....	25
2.6.2	Výsledky .....	27
<b>3.</b>	<b>Vícepodlažní dřevostavby z CLT</b> .....	<b>30</b>
3.1	Výška .....	30
3.1.1	Limity .....	32
3.2	Materiálové řešení.....	32
3.3	Konstrukční řešení .....	33

3.3.1	Dispozice .....	33
3.3.2	Příklady konstrukčních řešení (1).....	34
3.4	Spojení CLT panelů .....	36
3.4.1	Spojovací prostředky .....	36
3.4.2	Spojení panelů .....	37
3.4.3	Příklady realizovaných spojů (1).....	47
3.5	Požární odolnost CLT .....	49
3.5.1	Výpočet únosnosti konstrukčního prvku z CLT při požáru .....	49
3.5.2	Rychlost zuhelnatění CLT .....	50
3.5.3	Příklady z realizace.....	50
3.6	Požární bezpečnost .....	50
3.6.1	Rakousko .....	50
3.6.2	Německo .....	52
3.6.3	Švédsko.....	56
3.6.4	Finsko .....	59
3.6.5	Švýcarsko.....	61
3.6.6	Velká Británie.....	65
3.6.7	Norsko .....	67
3.7	Akustika .....	70
3.7.1	Požadavky v České Republice.....	70
3.7.2	Akustické vlastnosti CLT .....	71
3.7.3	Vylepšení akustických vlastností.....	72
3.7.4	Příklady z realizace.....	73
<b>4.</b>	<b>Návrh vícepodlažní dřevostavby s využitím CLT.....</b>	<b>75</b>
4.1	Skladby konstrukcí .....	75
4.2	Zatížení .....	76
4.2.1	Sníh.....	76
4.2.2	Zatížení na stropní panel.....	77
4.2.3	Zatížení na stěnu.....	78
4.2.4	Vítr.....	79



4.3	Návrh a posouzení nosných konstrukcí .....	82
4.3.1	Návrh a posouzení stropních panelů v 1. – 3. NP.....	82
4.3.2	Návrh a posouzení stropních panelů v 4. NP.....	88
4.3.3	Návrh a posouzení stěnového panelu .....	89
4.3.4	Návrh připojení stěnového panelu.....	90
4.4	Tepelně technické požadavky .....	93
4.4.1	Hodnoty v budově .....	93
<b>5.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>94</b>
<b>6.</b>	<b>Citovaná literatura .....</b>	<b>95</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>100</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>101</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>102</b>

# 1. ÚVOD

Diplomová práce se zabývá vícepodlažními dřevostavbami z poměrně nového dřevěného výrobku ze dřeva, křížem vrstveného dřeva. Tato kapitola vysvětluje, proč je tak důležité stavět ze dřeva, představuje hlavní výhody křížem vrstveného dřeva a uvádí cíle diplomové práce.

## 1.1 Dřevo a CO<sub>2</sub>

Svět si pomalu začíná uvědomovat, že změna klimatu je opravdu reálná a mnohem více lidí, ať jde přímo o architekty, projektanty atd. nebo o obyčejné lidi, vyhledává více „ekologické a udržitelné“ bydlení.

Stromy během svého růstu absorbují velké množství oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) a na rozdíl od dalších rostlin jsou schopné ho na dlouhou dobu uskladnit. Zhruba půlku suché hmotnosti dřeva tvoří oxid uhličitý, jeden strom může obsahovat i více než tunu oxidu uhličitého.

Z mnoha výzkumů vyplynulo, že při větším použití dřeva na úkor jiných stavebních materiálů by bylo možné přemístit velké množství CO<sub>2</sub> a potenciálně i stabilizovat nebo dokonce zmenšit množství CO<sub>2</sub> v atmosféře. (1)

Při výrobě ostatních, nepřirodních materiálů většinou oxid uhličitý vzniká a je vypouštěn do ovzduší. V následujícím přehledu je uvedeno, kolik kilogramů CO<sub>2</sub> je uvolněno při výrobě jednoho kilogramu daného materiálu (2):

- Hliník: 27,5 kg CO<sub>2</sub>/kg
- Ocel: 3,2 kg CO<sub>2</sub>/kg
- Beton: 1,25 kg CO<sub>2</sub>/kg
- Dřevo: 0,2 kg CO<sub>2</sub>/kg

Z předchozích údajů je jasné, že beton uvolní při svém zpracování až 6 krát víc CO<sub>2</sub> a ocel až 16 krát víc CO<sub>2</sub> než dřevo.

Použití dřeva pomáhá životnímu prostředí hned dvakrát, dřevo samo o sobě uchovává oxid uhličitý a použití dřeva místo jiného materiálu zabrání uvolnění dalšího množství oxidu uhličitého, které by vzniklo při výrobě daného materiálu.

## 1.2 Proč CLT

Vícepodlažní budovy z křížem vrstveného dřeva (CLT) mají mnoho výhod, proto lze očekávat, že se tento materiál bude v budoucnosti používat čím dál víc.

Mezi jeho hlavní výhody patří následující vlastnosti:

- **„Ekologický“ materiál**

Jak už bylo uvedeno v předchozí části, křížem vrstvené dřevo (CLT) je obnovitelný materiál a uskladňuje oxid uhličitý.

- **Nízká hmotnost**

Vícepodlažní budovy z křížem vrstveného dřeva (CLT) jsou mnohem lehčí, než budovy stejné výšky a dispozice postavené například ze železobetonu. Tyto budovy jsou vhodné do oblastí se špatnými základovými podmínkami, kde ušetří hodně financí jen na základech objektu.

- **Dobré tepelně technické vlastnosti**

Plně dřevěné CLT panely mají velmi dobré tepelně technické vlastnosti a hodí se pro nízkoenergetické stavby.

- **Rychlost a přesnost výstavby**

Toto je jedna z největších výhod staveb z křížem vrstveného dřeva. Panely se vyrobí s velkou přesností už v továrně a na stavbě je potřeba jenom správně provést spoje panelů. Výstavba je mnohem rychlejší, na stavbě je nutno znatelně méně pracovníků. Není vyžadována ani nějaká těžká technika pro instalaci panelů (žádný pevný jeřáb) a výstavba je také méně hlučná.

- **Prostorová tuhost**

Panely z křížem vrstveného dřeva dodají konstrukci potřebnou prostorovou tuhost, není už nutné navrhovat železobetonové jádro, tak jako je to nutné u vícepodlažních budov z lehkých dřevěných skeletů.

### **1.3 Cíle diplomové práce**

Cílem této diplomové práce je zjištění dostupných informací o křížem vrstveném dřevu, analýza těchto informací a následné praktické použití pro návrh vícepodlažní budovy z křížem vrstveného dřeva.

### **1.4 Obsah práce**

První kapitola ukazuje, proč je dřevo považováno za materiál budoucnosti.

Druhá kapitola se zabývá materiálem CLT jako takovým, zkoumá jeho mechanické vlastnosti a popisuje možné analytické metody pro jeho návrh. Dále zkoumá použitelnost těchto metod pro samotný výpočet momentové únosnosti a průhybu stropních CLT panelů.

Třetí kapitola popisuje problematiku vícepodlažních budov z CLT, zaměřuje se na všechny důležité aspekty návrhu a doplňuje je příklady z již postavených konstrukcí z CLT.

Čtvrtá kapitola se zabývá předběžným návrhem budovy z CLT.

## 2. KŘÍŽEM VRSTVENÉ DŘEVO (CLT)

V této kapitole jsou ve stručnosti popsány konstrukční vlastnosti křížem vrstveného dřeva a způsoby výpočtu únosnosti panelů z křížem vrstveného dřeva. Správnost analytických metod je ověřena praktickým výpočtem stropních panelů různých průřezů a rozpětí.

### 2.1 Úvod

#### 2.1.1 Historie

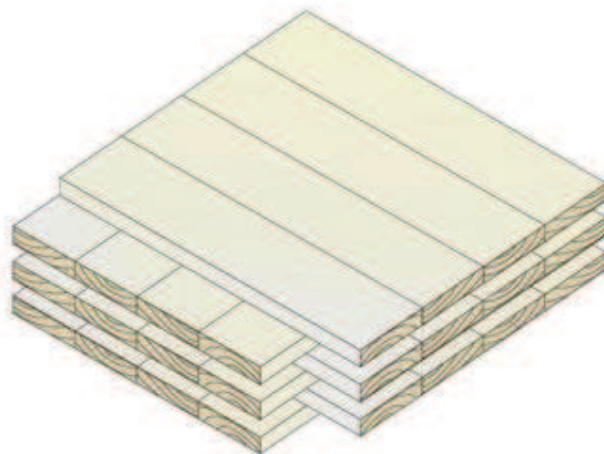
Křížem vrstvené dřevo bylo patentováno ve Francii v půlce 80. let 20. století. Větší prostor pro vývoj materiálu a zkoumání jeho chování dostal tento materiál až v 90. letech v Německu a v Rakousku. Prvotním účelem křížem vrstveného dřeva bylo zmenšení odpadu z pil. Odřezky z velkých trámů nebo lepeného lamelového dřeva byly nevyužity nebo byly určeny pro méně hodnotnou odnož výroby. Křížem vrstvené dřevo nejen využívá i lamely s menšími rozměry, ale vytvoří z nich panely s vyšší pevností. (1)

#### 2.1.2 Definice CLT

CLT desky se skládají z několika vrstev lamel (lichý počet). Lamely jsou na sebe naskládány křížem, to znamená, že každá vrstva je pootočena o 90 stupňů oproti předchozí vrstvě (Obrázek 1). Z tohoto důvodu křížem vrstvené dřevo působí prostorově a hodí se i na obousměrně pnuté stropní desky a na stěny (jak nosné tak i ztužující). Průřez je většinou symetrický. Výsledkem výrobního procesu je CLT (křížem vrstvené dřevo) jehož chování je ovlivněno jak samotným materiálem, tak i konstrukční anizotropií (různé vlastnosti v různých směrech).

Při vodorovném použití (desky) by vnější vrstvy měly mít vlákna ve směru většího rozpětí. Při svislém použití (stěny) by vnější vrstvy měly být orientované tak, že vlákna jsou svislá.

Křížem vrstvené dřevo se dělí podle povrchové úpravy na konstrukční (bude zakryto další vrstvou) a na pohledové (přiznané dřevo, finální povrch konstrukce)



Obrázek 1 - Vrstvení CLT (3)

## 2.2 Výroba CLT

### 2.2.1 Specifikace materiálu

- Lamely

Křížem vrstvené dřevo se skládá z lamel o tloušťce 12 až 45 mm. V rámci standardizace CLT je očekávána doporučená tloušťka vrstev 20, 30 nebo 40 mm (4).

Minimální šířka lamely  $w_b$  se rovná:

$$w_b \geq 4 \cdot t_b$$

Kde:

$t_b$  - tloušťka lamely

Maximální šířka lamely není nijak limitovaná.

Jako materiál se pro výrobu CLT používá většinou dřevo z jehličnanů (smrk ztepilý, jedle, modřín, douglaska). Používání listnatých dřevin (bříza bělokorá, topol, jasan) je také možné. Výroba CLT probíhá po celém světě, proto při výběru materiálu záleží na splnění minimálních mechanických vlastností a na dostatečné zásobě lamel potřebné kvality daného druhu dřeva.

Listnaté dřeviny se hodí hlavně na pohledové panely, avšak také vylepší některé mechanické vlastnosti panelu (zvýšení ohybové nebo smykové pevnosti).

- **Lepidlo**

Z větší části se používají stejná lepidla, která se používají i na výrobu lepených lamelových nosníků.

Mezi nejpoužívanější lepidla patří fenolické typy jako Fenol-resorcinol formaldehyd (dále jako PRF), emulzní polymer isokyanát (dále jako EPI) a také jednosložkový polyurethan (dále jako PUR).

Každé lepidlo má vlastní podmínky použití a mělo by být potvrzeno nezávislou institucí, zda lepidlo splňuje požadavky dané pevnostní třídy. EPI a PUR jsou světlé až bezbarvé, PRF má tmavě hnědou barvu. Lepidlo PUR nepotřebuje žádné rozpouštědlo ani formaldehyd, jediná podmínka použití je navlhčení materiálu před nanesením lepidla (PUR je reaktivní na vlhkost).

V tabulce (Tabulka 1) lze vidět vlastnosti těchto lepidel.

**Tabulka 1 - Lepidla (3)**

položka	jednotka	Lepidlo		
		PRF	EPI	PUR
Barva lepidla		tmavá	světlá	světlá
Konzistence		tekutá	tekutá	tekutá
Složky		2	2	1
Pevné částice	[%]	50	43	100
Vlhkost dřeva (MC)	[%]	6-15 %	6-15 %	>8 %
Množství lepidla	[g/m <sup>2</sup> ]	375-400	275-325	100-180
Čas možné manipulace	[min]	40	20	45
Lisování	[min]	420-540	60	120
Tlak lisování	[psi]	120	120	120-200
Tlak lisování*	[MPa]	0,83	0,83	0,83-1,38
Cena**	[\$/lb]	2,0	3,5	4,8
Cena***	[CZK/kg]	110	190	260

\* 7 psi = 6894,8 Pa

\*\*Cena se může časem měnit

\*\*\*1 USD = 24,08 CZK, 1 kg = 0,454 lb

Podle vlastností v tabulce (Tabulka 1) je vidět, že každé lepidlo má jisté výhody a nevýhody. Například lepidlo PRF se vyplatí jenom v provozovně s více lisů, jinak je díky dlouhému lisovacímu času ekonomicky nevýhodné.

## 2.2.2 Výroba

V následující sekci je popsán postup výroby CLT panelů krok po kroku (4). Některé části výroby CLT panelů se můžou lišit dle výroby.

### 1) Pevnostní třídění vysušených dřevěných desek

Lamely jsou vysušeny na vlhkost přibližně  $12 \pm 2$  %. Následně je materiál tříděn podle platné normy (v ČR je to ČSN 73 2824-1) do pevnostních tříd. Je nutné, aby lamely z jedné vrstvy byly vždy ze stejné pevnostní třídy. Nejčastější pevnostní třída pro CLT je C24.

### 2) Vyříznutí lokálních růstových vad dřeva, které nesplňují požadavky pevnostní třídy a znovuspojení lamel

Na základě výsledku třídění jsou růstové vady, které nesplňují požadavky dané pevnostní třídy, odstraněny. Po odstranění vad jsou lamely spojeny zubovitým spojem. Zubovitý spoj minimalizuje zkrácení lamely při nejvyšším možném spojovacím povrchu. Pro CLT se používá stejný zubovitý spoj, který se používá při výrobě lepených lamelových nosníků

### 3) Příprava a řezání lamel pro podélné i příčné vrstvy

Lamely jsou řezány na požadované délky. V případě, že lamely nemají dostatečně připravený povrch pro aplikaci lepidla, povrch lamel je ještě zbrúšen (2,5 až 3,8 mm). V některých případech dochází k rozčlenění panelu tak, aby lamely vyšší kvality byly umístěny v místech, kde je to žádoucí (oblast budoucího spoje atd.)

### 4) Lepení jednovrstvých panelů - nepovinné

Tento krok není nutnou součástí výroby CLT panelů. Vytvoření jednovrstvého panelu zmenšuje mezery mezi jednotlivými lamelami a tím zlepšuje chování desky (požární bezpečnost, vzduchotěsnost, zvuková izolace atd.). Tyto desky můžou být aplikovány pro všechny vrstvy CLT nebo jenom pro vnější vrstvy (hlavně pohledové panely).

### 5) Nanášení lepidla a vrstvení

Aplikace lepidla na lamely může probíhat dvěma způsoby. U prvního způsobu je lepidlo nanášeno na jednotlivé lamely v přístroji s pásovým provozem. U druhého způsobu dochází k nanášení lepidla až po poskládání lamel do jedné vrstvy. Po nanesení lepidla na první vrstvu se pokračuje k další vrstvě, až je panel hotový a připravený na lisování. První způsob je častější.



## **6) Lisování CLT**

Nejčastěji se používají tyto dva typy lisování: vakuové lisování a lisování pomocí hydraulického lisu. Pomocí vakuového lisování lze vytvořit tlak v rozmezí 0,02 až 0,10 MPa, pomocí hydraulického lisu tlak 0,1 až 1,0 MPa. Ideální tlak pro lepení CLT je předmětem zkoumání. Teoreticky není pro lepení potřeba žádný tlak (dokonale hladký povrch obou desek, stejně tlustá vrstva lepidla po celém povrchu desek atd.), avšak v realitě tyto podmínky nelze zaručit. Záleží také na typu lepidla, jelikož každé lepidlo vyžaduje jiné podmínky (jiný tlak, navlhčení panelů atd.). Požadavky nejpoužívanějších lepidel jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 1).

## **7) Úprava povrchu panelů**

Okraje panelů se zarovnají a povrch panelu se upraví podle budoucího použití. Finální úprava povrchu panelu závisí na jeho budoucí funkci. Úpravy se liší podle toho, zda se jedná o pohledový panel nebo konstrukční panel. U konstrukčních panelů závisí na vrstvě, která bude na panel v budoucnosti aplikována (SDK deska, OSB deska, izolace atd.).

## **8) Řezání a spojování panelů**

Po povrchové úpravě jsou panely dopraveny k řezacímu stroji, kde je panel upevněn a vycentrován. Poté je panel vyřezán do požadovaného tvaru (vyříznutí otvorů pro dveře a okna, profilování pro další spoje). Řezání probíhá s velkou přesností.

## **9) Označování, balení a transport panelů (3)**

Správné označení produktů je stěžejní informace pro projektanty i dodavatele stavby. Každý CLT panel by měl být označen a značka by měla obsahovat tyto informace:

- logo výroby nebo kód pily
- odkaz na normu, podle které byl panel zhotoven a jejíž požadavky splňuje
- třídu laminace
- druh a tloušťku lamel, aby bylo možno odhadnout únosnost panelu
- třída provozu lepidla (lepidlo odolné proti vysoké teplotě, vysoké vlhkosti atd.)
- logo firmy, která tuto výrobu akreditovala
- jedna z nejdůležitějších informací je, že na každém panelu by měl být naznačen směr zatížení panelu a místa budoucích spojů

## 2.3 Vlastnosti materiálu

Pro určení základních mechanických vlastností CLT byly použity různé metody. Některé byly čistě experimentální, jiné čistě analytické. Je logické, že analytické metody potvrzené zkoušením vzorků poskytují obecný a levnější způsob pro výpočet CLT prvků. Mezi nepoužívanější analytické metody patří: Mechanicky spojované nosníky, Kompozitní teorie nebo nejnovější metoda zvaná Smyková analogie.

Zatím nedošlo k tomu, že by jeden univerzální výpočet byl přijat plošně všemi výrobci. Při návrhu konstrukce ve většině případů rozhoduje mezní stav použitelnosti, proto se výrobci soustředí hlavně na určení tuhosti prvků a tím pádem i na předpovězení průhybu konstrukce.

Je však nutné zaručit i minimální pevnost panelu, proto je potřeba vyvinout metodu, která by určila jak tuhost, tak i pevnost CLT.

### 2.3.1 Mechanické vlastnosti

- **Pevnostní třída lamel**

Pevnost lamel v panelu se může lišit podle vrstev. Podélné vrstvy jsou většinou vizuální třídy S10 nebo S13, příčné vrstvy mohou mít menší pevnost, vizuální třída S7 až S13 (5). Většina panelů v Evropě je vyrobena z pevnostní třídy C24 (S10).

V následující tabulce (Tabulka 2) jsou uvedeny hodnoty různých pevností a modulů pružnosti pro dané pevnostní třídy.

Tabulka 2 - Pevnosti a moduly pružnosti pro dané třídy pevnosti (6)

		C20	C22	C24	C27
Ohyb $f_{m,k}$	[MPa]	20	22	24	27
Tah rovnoběžně s vlákny $f_{t,0,k}$	[MPa]	12	13	14	16
Tah kolmo k vláknům $f_{t,90,k}$	[MPa]	0,5	0,5	0,5	0,6
Tlak rovnoběžně s vlákny $f_{c,0,k}$	[MPa]	19	20	21	22
Tlak kolmo k vláknům $f_{c,90,k}$	[MPa]	2,3	2,4	2,5	2,6
Smyk $f_{v,k}$	[MPa]	2,2	2,4	2,5	2,8
Průměrná hodnoty modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny $E_{0,mean}$	[GPa]	9,5	10,0	11,0	11,5
Průměrná hodnoty modulu pružnosti kolmo k vláknům $E_{90,mean}$	[GPa]	0,32	0,33	0,37	0,38
Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku $G_{mean}$	[GPa]	0,59	0,63	0,69	0,72

- **Pevnost v ohybu**

Ve většině výpočtů se používá jako pevnost v ohybu pro CLT modifikovaná pevnost lepeného lamelového dřeva.

Pevnost v ohybu lepeného lamelového dřeva  $f_{m,g,k}$  se získává následovně (6):

$$f_{m,g,k} = k_h f_{m,k} \quad 1$$

$$k_h = \min \left( \left( \frac{600}{h} \right)^{0,1} ; 1,1 \right) \quad 2$$

Faktor  $k_h$  je faktor vlivu rozměru prvku na pevnost. Pro panel tloušťky 140 mm se  $k_h$  rovná:

$$k_h = \min \left( \left( \frac{600}{140} \right)^{0,1} ; 1,1 \right) = (1,157; 1,1) = 1,1$$

Při použití lamel pevnosti C24 se charakteristická hodnota ohybové tuhosti lepeného lamelového dřeva rovná:

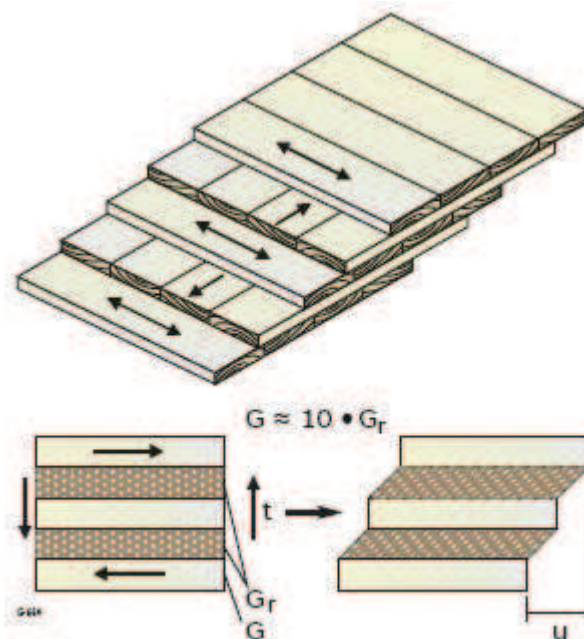
$$f_{m,g,k} = 1,1 \cdot 24 = 26,4 \text{ MPa}$$

Na rozdíl od lepeného lamelového dřeva, kde všechny lamely působí ve stejném směru, u CLT jsou vrstvy lamel i ve druhém směru, proto je nutné toto číslo upravit (zmenšit) korekčním součinitelem. Velikost tohoto součinitele je součástí výzkumného procesu týkajícího se CLT.

Podle (3) lze použít jako charakteristickou ohybovou pevnost CLT panelu  $f_{m,c,k}$  z lamel třídy C24 hodnotu 26,1 MPa.

- **Valivý smyk a smyková deformace**

Pevnost valivého smyku je pravděpodobně rozhodující veličina, která řídí návrh a chování CLT desek nebo stěn. Valivý smyk ve dřevě je definován jako smykové napětí v radiálně-tangenciální rovině kolmé na směr vláken (7). Deformace způsobená valivým smykem je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 2), kde  $G$  znamená modul pružnosti  $G_0$  a  $G_r$  modul pružnosti pro valivý smyk.



Obrázek 2 - Deformace valivým smykem CLT panelu (3)

U dřeva je valivý smyk  $f_{v,90,k}$  poměrně malý v porovnání s podélným smykovým napětím  $f_{v,0,k}$ , podle (7) je jeho charakteristická hodnota rovna 1,0 MPa a je nezávislá na pevnostní třídě dřeva. Podle Eurokódu 5 (8) je pevnost pro valivý smyk přibližně dvojnásobek pevnosti v tahu kolmo k vláknům.

$$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ MPa} \text{ pro třídy C20, C22, C24 (6)}$$

$$f_{v,90,k} = 2f_{t,90,k} = 1 \text{ MPa}$$

Rozsah efektivní ohybové tuhosti panelu a z něho vyplývající rozdělení napětí ve vrstvách závisí na modulu pružnosti pro valivý smyk křížem vrstveného průřezu. Bohužel informace o vlastnostech CLT panelů s ohledem na valivý smyk jsou mizivé.

Je známo, že modul pružnosti pro valivý smyk závisí na mnoha faktorech:

- Druh dřeva
- Hustota vrstev
- Tloušťka vrstvy lepidla
- Vlhkost dřeva
- Orientace letokruhů
- Velikost a geometrie panelu v řezu

V současnosti není žádná metoda, kterou by bylo možné zjistit modul pružnosti pro valivý smyk pro různé varianty panelů od různých výrobců. Metody testování převzaté ze standardizovaných testů pro deskové výrobky (překližka) jsou nevhodné, protože

jsou uzpůsobeny pro tenké vrstvy. V budoucnosti je nutné vyvinout metodu testování a vhodný výpočet pro získávání modulu pružnosti pro valivý smyk.

Je uvažováno, že modul pružnosti pro valivý smyk  $G_R$  se rovná přibližně 1/10 modulu pružnosti pro smyk  $G_0$  (3).

Podle pevnostní třídy C24 platí podle (6):

$$G_0 = 690 \text{ MPa}$$

$$G_R = \frac{1}{10} G_0 = 69 \text{ MPa}$$

Pro panely CLT podle CUAP 03.04/06 (Common Understanding of Assessment Procedure) je  $G_{90}=50 \text{ MPa}$  a  $G_0=500 \text{ MPa}$ .

- **Smyková deformace – zatížení kolmo na rovinu panelu**

Literatura se příliš neshoduje ve tvrzení, kdy je možné zanedbat smykovou deformaci. Některé zdroje tvrdí, že je možné zanedbat smykovou deformaci, když je poměr rozpětí/výška panelu větší než 20 (9). Jiné zdroje tvrdí, že smykovou deformaci je možné zanedbat, až když tento poměr překročí 30 (3).

Podle (10) platí následující podmínky:

$$\frac{L}{h} < 15 \quad - \text{ analytické řešení příčných vrstev je nutné}$$

$$\frac{L}{h} < 15 \quad - \text{ lze použít jednu z analytických metod, ale je nutné, aby daná metoda byla ve}$$

shodě s hodnocením tuhosti a pevnosti panelu zjištěném při testování

Tato hranice musí být podrobena výzkumu. Menší poměr rozpětí/výška průřezu znamená, že v konstrukci je mnohem větší vliv smykové deformace a tyto konstrukce se stávají neekonomické. Na druhou stranu větší poměr rozpětí/výška panelu znamená, že konstrukce vykazuje větší náchylnost k přenosu vibrací a deformaci způsobené dotvarováním.

### 2.3.2 Chování stropních panelů

Stropní deska může být jednosměrně i obousměrně pnutá, zaleží hlavně na geometrii (rozměry desky) a na způsobu podepření stropní desky.

Jestliže je podíl rozměrů  $a$  a  $b$  obdelníkové desky větší nebo rovný 2, deska se považuje víceméně za jednosměrně pnutou. Jestliže je poměr menší, deska by se měla počítat jako obousměrně pnutá.

Podpěření může být různé:

- Deska kloubově uložená na dvou paralelních stranách, další dvě strany jsou volné
- Deska kloubově uložená na 3 nebo 4 stranách
- Deska podepřená sloupy atd.

Je nutné zjistit, jak chování desky ovlivňují různé typy podpěření, je potřeba další výzkum.

- **Jednosměrně pnutá deska**

Jednosměrně pnutá deska bývá většinou podepřena na dvou rovnoběžných stranách (tam, kde je kratší rozpětí). Podpěření bývá ve většině případů kloubové. Deska může být brána jako jednoduchý nosník i spojitý nosník, vše záleží na spojení panelů.

- **Obousměrně pnutá deska**

Pro výpočet obousměrně pnuté desky se používá postup podobný výpočtu železobetonové obousměrně pnuté desky.

Výpočet ohybového momentu a průhybu obousměrně pnuté CLT desky je komplikovaný proces a mělo by být zvažováno mnoho parametrů (např. způsob uložení, tuhost podpor, tuhost příčných a podélných vrstev panelu, valivý smyk atd.).

Výpočet pomocí jednosměrně pnuté desky dá většinou konzervativní výsledek, avšak v některých případech je vhodné zvolit výpočet pomocí jednosměrně pnuté desky, právě kvůli složitosti a náročnosti výpočtu obousměrně pnuté desky.

## 2.4 Analytické metody pro CLT prvky

V této kapitole jsou popsány analytické metody pro výpočet stropních panelů z CLT.

### 2.4.1 Mechanicky spojované nosníky (Gamma metoda)

Tato metoda je uvedena v příloze B Eurokódu 5 (8). Metoda je založena na lineární pružnosti. Byla původně vyvinuta pro výpočet nosníků spojených mechanickým spojovacím prostředkem s modulem prokluzu  $K$  a s roztečí  $s$ . Podle této metody je tuhost nosníku definovaná jako účinná ohybová tuhost  $(EI_{eff})$ , která závisí na průřezových charakteristikách nosníku a účinnosti spojení  $\gamma$ . Faktor  $\gamma$  závisí na poměru  $s/K$  ( $\gamma = 0$  pro žádné spojení a  $\gamma = 1$  pro tuhé spojení jako je lepení).

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad 3$$

Maximální normálové napětí se rovná součtu  $\sigma_i$  ( $\sigma_{global}$  podle (3)) a  $\sigma_{m,i}$  ( $\sigma_{local}$  podle (3)).

$$\sigma_{max} = \sigma_i + \sigma_{m,i} \quad 4$$

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i A_i M}{(EI)_{ef}} \quad 5$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(EI)_{ef}} \quad 6$$

Maximální smyková pevnost se objevuje v místech, kde je nulové normálové napětí.

$$\tau_{2,max} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h_2^2}{b_2 (EI)_{ef}} V \quad 7$$

### Modifikace metody pro použití na CLT (3)

Tato metoda musela být modifikovaná za účelem výpočtu CLT. Smyková deformace podélné vrstvy je zanedbána. Hlavním předpokladem je, že jenom podélná vrstva CLT nese zatížení. Příčná vrstva tvoří imaginární spojovací prostředky, jejichž tuhost je tvořena deformací způsobenou valivým smykem této vrstvy. Proto je nutné poměr  $s/K$  nahradit smykovou deformací mezi vrstvami. Faktor  $\gamma$  se nachází většinou někde v rozmezí 0,85 a 0,99.

$$\frac{s}{K} = \frac{\bar{h}_i}{G_R \cdot b}$$

8

kde:

$G_R$  – modul pružnosti pro valivý smyk

$\bar{h}_i$  – tloušťka vrstvy příčné vrstvy

$b$  – šířka panelu (většinou 1 m)

Tato metoda je přesná pouze pro prostě podepřené nosníky a desky se spojitým nebo sinusoidním zatížením. Při testování na různých rozpětích, při použití různých typů zatížení (koncentrovaná síla uprostřed nebo ve třetině rozpětí) bylo zjištěno, že rozdíl je menší než 3 %.

Ohybový moment  $M_R$  se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$M_r = \phi f_{m,clt,d} \frac{I_{eff}}{(\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1)} \quad 9$$

kde:

$f_{m,c,d}$  – pevnost v ohybu CLT panelu

$\phi = 0,9$  podle (3)

Průhyb se stanoví z následujícího vzorce.

$$w = \frac{5(g+q)_k l^4}{384(EI)_{eff}} \quad 10$$

kde:

$(g+q)_k$  – charakteristická hodnota stálého a proměnného zatížení na panel

### Využití v praxi (3)

Většina výrobců v Evropě používá spojení analytických modelů s testováním výrobků. Výrobky jsou testovány podle existujících norem (EN, DIN) a používají certifikát Evropského technického posouzení CUAP 03.04/06 z roku 2005, který popisuje požadavky na plné dřevěné deskové elementy, používané jako nosný prvek v budovách.



Dokument CUAP 03.04/06 nařizuje, že ohybová pevnost desek musí být definována s použitím efektivního průřezového modul  $W_{eff}$ .

$$W_{ef} = \frac{2I_{ef}}{h_{tot}} \quad 11$$

Poté následují testy podle EN, DIN. Z testů se dostane hodnota momentu a následně se může vypočítat napětí.

Smyková pevnost se získává experimentálně, postup je stejný jako u lepeného lamelového dřeva. Testy probíhají podle EN 408 na prostě podepřených deskách, zatížení je aplikováno po celé šířce panelu v dostatečné blízkosti k podpoře, aby vzniklo smykové porušení panelu.

Smyková pevnost je pak vypočítána následujícím vztahem:

$$\tau = \frac{1,5V}{A_{gross}} \quad 12$$

kde:

$\tau$  – maximální smyková pevnost

$V$  – maximální posouvající síla (smyková síla)

$A$  – plocha panelu ( $b \cdot h_{tot}$ )

#### 2.4.2 Kompozitní teorie (k metoda) (3)

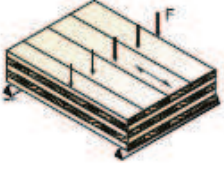
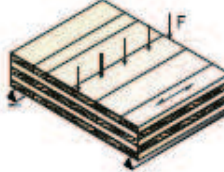
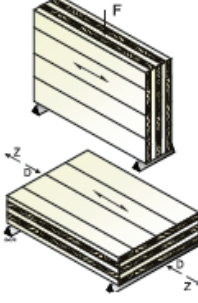
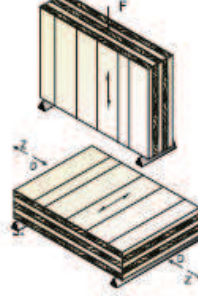
Tato metoda se používá hlavně pro výpočty dřevěných desek z překližky. Metoda úplně zanedbává pevnost a tuhost v ohybu křížem položených desek.

Předpoklady, které musí být dodrženy při použití této metody pro CLT:

- Lineární rozdělení napětí a přetvoření, Bernoulliho hypotéza
- Metoda je založena na pevnosti a tuhosti všech vrstev (tuhost křížem položené vrstvy se počítá jako  $E_{90} = \frac{E_0}{30}$ )
- Smyková deformace se nebere v úvahu, proto se tato metoda hodí hlavně pro panely s velkým poměrem rozpětí k výšce průřezu ( $\frac{l}{h} \geq 30$ )
- Faktor  $k$  je stanoven jen pro určité zatížení

V následující tabulce (Tabulka 3) lze vidět součinitel  $k$  pro různá zatížení a konfigurace panelu (stropní deska x stěna).

Tabulka 3 - Součinitel  $k$  pro různé situace (3)

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

Veličiny vyskytující se v předchozí tabulce:

$E_0$  – modul pružnosti rovnoběžně s vlákny

$E_{90}$  - modul pružnosti kolmo k vláknům

$a_i$  - tloušťka vrstvy

$m$  – celkový počet vstev

Příklad: pro panel s 5 vrstvami (27 + 17 + 27 + 17 + 27)

$a_m = a_5 = 27 + 17 + 27 + 17 + 27 = 115\text{mm}$

$$a_{m-2} = a_3 = 17 + 27 + 17 = 61\text{mm}$$

$$a_{m-4} = a_1 = 27\text{mm}$$

Pevnost a modul pružnosti se pak dostane vynásobením daného faktoru  $k$  s pevností dané veličiny pro surové dřevo (Tabulka 4).

**Tabulka 4 - Pevnosti a moduly pružnosti pro dané případy (3)**

Typ		Efektivní hodnoty pevnosti	Efektivní hodnoty modulu pružnosti
Zatížení kolmo na plochu			
Ohyb	Rovnoběžně	$f_{b,0,ef} = f_{b,0}k_1$	$E_{b,0,ef} = E_0k_1$
	Kolmo	$f_{b,90,ef} = f_{b,0}k_2 \frac{a_m}{a_{m-2}}$	$E_{b,90,ef} = E_0k_2$
Zatížení v rovině plochy			
Ohyb	Rovnoběžně	$f_{b,0,ef} = f_{b,0}k_3$	$E_{b,0,ef} = E_0k_3$
	Kolmo	$f_{b,90,ef} = f_{b,0}k_4$	$E_{b,90,ef} = E_0k_4$
Tah	Rovnoběžně	$f_{t,0,ef} = f_{t,0}k_3$	$E_{t,0,ef} = E_0k_3$
	Kolmo	$f_{t,90,ef} = f_{t,0}k_4$	$E_{t,90,ef} = E_0k_4$
Tlak	Rovnoběžně	$f_{c,0,ef} = f_{c,0}k_3$	$E_{t,0,ef} = E_0k_3$
	Kolmo	$f_{c,90,ef} = f_{c,0}k_4$	$E_{c,90,ef} = E_0k_4$

Maximální ohybová tuhost se rovná:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \quad 13$$

Maximální moment se potom dostane:

$$M_{\max} = f_{b,ef} W_{\text{gross}} \phi \quad 14$$

kde:

$f_{m,d}$  – pevnost v ohybu vnějších lamel

$\phi = 0,9$  podle (3)

Průhyb se stanoví z následujícího vzorce.

$$w = \frac{5(g+q)_k l^4}{384(EI)_{\text{eff}}} \quad 15$$

kde:

$(g+q)_k$  – charakteristická hodnota stálého a proměnného zatížení na panel

### 2.4.3 Smyková analogie

Tato metoda je nejpřesnější metoda po výpočet CLT. Metoda uvažuje rozdílné moduly pružnosti v ohybu a ve smyku pro každou vrstvu a je vhodná pro skoro všechny typy panelů (počet vrstev, rozpětí). Smykové deformace se započítávají.

Touto metodou bylo zjištěno, že při poměru  $l/h = 20$  je deformace způsobená smykem 22 % z celkové deformace, pro poměr  $l/h = 30$  je smyková deformace jenom 11 %.

#### Popis metody:

Panel je rozdělen do dvou virtuálních „nosníků“ A a B. Nosník A obsahuje vlastní ohybovou pevnost jednotlivých vrstev podél jejich neutrálních os. Nosník B dodává „Steinerovy doplňky“, smykovou pevnost panelu a pružnost spojení vrstev.

Nosníky A a B jsou spojeny nekonečně tuhými stojinami, oba dva nosníky se deformují stejně. Překrytím ohybového momentu a smykové síly obou nosníků vzniká plnohodnotný průřez.

Ohybová tuhost nosníku A se rovná součtu ohybových tuhostí všech vrstev.

$$(EI)_A = \sum_{i=1}^n E_i I_i = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} \quad 16$$

Ohybová tuhost nosníku B se rovná součtu Steinerových doplňků každé vrstvy.

$$(EI)_B = \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i \quad 17$$

Efektivní ohybová tuhost se rovná součtu jednotlivých tuhostí.

$$(EI)_{ef} = (EI)_A + (EI)_B \quad 18$$

Nosník B obsahuje také smykovou tuhost a tuhost spojení panelů (jestliže jsou spojovací prostředky přítomny).

$$\frac{1}{(GA)_B} = \frac{1}{a^2} \left[ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{k_i} + \frac{h_1}{2G_1 b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} + \frac{h_n}{2G_n b_n} \right] \quad 19$$

$$k_i = \frac{K_i}{s_i} \quad 20$$

kde:

$k_i$  - prokluz mezi „spojovacími prostředky“

Vnitřní síly v každé vrstvě se vypočítají podle následujících vzorců:

$$M_{A,i} = \frac{E_i I_i}{(EI)_A} M_A \quad 21$$

$$V_{A,i} = \frac{E_i I_i}{(EI)_A} V_A \quad 22$$

$$N_{B,i} = \frac{E_i A_i z_i}{(EI)_B} M_B \quad 23$$

kde:

$M_a, V_a$  – vnitřní síly na nosníku A

Ohybové a smykové napětí se počítá podle následujících vztahů:

$$\sigma_{A,i} = \pm \frac{M_{A,i}}{I_i} \frac{h_i}{2} \quad 24$$

$$\tau_{A,i} = \frac{E_i I_i}{(EI)_A} 1,5 \frac{V_A}{b h_i} \quad 25$$

$$\sigma_{B,i} = \frac{N_{b,i}}{b_i h_i} \quad 26$$

$$t_{B,i+1} = \frac{V_b}{(EI)_B} \sum_{j=i+1}^n E_j A_j z_j \quad 27$$

Průhyb uprostřed napětí může být stanoven podle následujícího vzorce:

$$u_{\max} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{(EI)_{ef}} + \frac{1}{8} \frac{qL^2k}{(GA)_{ef}} \quad 28$$

## 2.5 Výpočet pomocí CLT Designeru (10)

Analytické metody popsané v předchozí kapitole (2.4) lze použít pro výpočet CLT panelů, ale jsou časově náročné, a díky některým předpokladům se výpočet může částečně lišit od reálné situace.

Software CLT designer byl vyvinut na univerzitě v Grazu. Software je vyvinut tak, aby byl jednoduchý, snadno použitelný a jasný.

### 2.5.1 Popis programu

Program obsahuje tři základní moduly výpočtu pro stropní desky a jeden modul pro výpočet stěn. Lze vypočítat jakýkoliv CLT panel, který si uživatel sám definuje, navíc program obsahuje CLT panely od některých výrobců. Program počítá CLT panely za běžné teploty i za požáru.

- **Výpočet pro stropní desky**

#### 1. Continuous beam (spojitý nosník)

První modul se nazývá „continuous beam“, který posuzuje CLT panely podle EN 1995-1-1 a ON B 1995-1-1 (Rakouský národní dodatek k Eurokódu). Spojitý nosník může mít až 7 polí a konzoly na každé straně.

Nosník může být vystaven následujícím zatížením:

- Vlastní tíha panelu (vlastní tíha je definovaná přímo v programu)
- Stálé zatížení
- Úžitné zatížení
- Vítr
- Sníh

Program sám vytvoří možné kombinace zatížení podle EN 1995-1-1.

Mezní stav únosnosti (MSÚ) řeší ohybové i smykové napětí tlakové napětí kolmo k vláknům.

Mezní stav použitelnosti (MSP) řeší hlavně průhyb panelu a vibrace.

## 2. Internal forces (vnitřní síly)

Tento modul ověřuje příčný řez panelu na základě zadaných vnitřních sil, stejně jako stability průřezu.

## 3. Compression perpendicular to grain (tlak kolmo k vláknům)

Tento modul posuzuje panel na protlačení.

- **Výpočet pro stěny**

### 1. Plate loaded in plane (panel zatížený ve svojí rovině)

Tento modul posuzuje stěnu zatíženou spojitým zatížením  $n_{xy,d}$ . Návrhová metoda je založena na panelu šířky 150 mm.

Ověření probíhá podle 2 mechanismů, ověření na smyk a ověření na kroucení.

### 2.5.2 Jak program počítá

Metoda v tomto programu je založená na Timoshenkově nosníkové teorii (Timoshenko beam theory), která bere v úvahu příčný smyk pružného nosníku.

Při porovnání této metody s přesným řešením bylo zjištěno, že rozdíly mezi zjištěnými deformacemi jsou menší než rozdíly mezi zjištěnými napětími. Rozdíly ve výsledcích závisí na počtu vrstev, uspořádání vrstev a na poměru příčných a podélných vrstev  $t_{90}/t_0$ . Poměr  $t_{90}/t_0$  se pohybuje mezi 0,45 a 2,10, průměrná hodnota je rovna 1,00.

- **Ohybová tuhost**

Ohybová tuhost průřezu se počítá podle následujícího vzorce:

$$(EI)_{ct} = \sum (I_i E_i) + \sum (A_i e_i^2 E_i) \quad 29$$

kde:

$E$  – modul pružnosti pro ohyb, pro podélné vrstvy se počítá s hodnotou  $E_0$ , pro příčné vrstvy se bere hodnota  $E_{90}$

$I_i$  – moment setrvačnosti vrstvy  $i$

$A_i$  – plocha vrstvy  $i$

$e_i$  – vzdálenost mezi těžištěm plochy  $i$  a těžištěm celého průřezu

### Posouzení:

Po splnění podmínek únosnosti musí platit následující rovnice:

$$\frac{\sigma_{edge,d}}{f_{m,clt,d}} \leq 1,0 \quad 30$$

$$\sigma_{edge,d} = \frac{M_y}{I_{clt}} \frac{h}{2} \quad 31$$

$$f_{m,clt,d} = k_1 \frac{k_{mod} f_{m,gl,k}}{\gamma_m} \quad 32$$

$$k_1 = \min(1, 1 + 0,025n) \text{ pro } n > 1 \quad 33$$

kde:

$\sigma_{edge,d}$  – napětí na koncových vláknech, v případě souměrného průřezu

$k_1$  – faktor systémové pevnosti

$n$  – počet příčných vrstev v tahové oblasti

$f_{m,gl,k}$  – pevnost v ohybu pro lepené lamelové dřevo stejné třídy s referenční výškou 600 mm

- **Smyková tuhost**

Smyková tuhost  $G_{clt}$  se počítá podle následujícího vzorce.

$$G_{clt} = S_{ges} \kappa$$

$$S_{ges} = \sum (G_i A_i) \quad 34$$

$$\kappa = \frac{1}{S_{ges} \frac{1}{(EI)_{clt}^2} \int_h \frac{I^2(z, E(z))}{G(z) b(z)} dz} \quad 35$$

kde:

$S_{ges}$  – smyková tuhost průřezu bez deformace průřezové plochy



$G_i$  – modul pružnosti pro smyk, pro podélné vrstvy se používá  $G_0$ , pro příčné vrstvy se používá  $G_{90}$

$A_i$  – průřezová plocha vrstvy  $i$

$\kappa$  – korekční součinitel

$I^2(z, e(z))$  – moment setrvačnosti závislý na vzdálenosti  $z$

$G(z)$  – modul pružnosti pro smyk závislý na  $z$

$B(z)$  – šířka průřezu závislá na  $z$

### Posouzení:

Pro splnění podmínek únosnosti musí platit následující rovnice. První rovnice (Rovnice 36) se týká normálního smyku, druhá rovnice (Rovnice 37) posuzuje valivý smyk v příčných vrstvách.

$$\frac{\tau_{r,d}}{f_{r,g,d}} \leq 1,0 \quad 36$$

$$\frac{\tau_{r,d}}{f_{r,g,d}} \leq 1,0 \quad 37$$

$$\tau(z_0) = \frac{V_z \int E(z) z dA}{G_c b(z_0)} \quad 38$$

kde:

$F_{v,gl,t,d}$  – návrhová pevnost ve smyku pro lepené lamelové dřevo stejné pevnostní třídy

$F_{r,gl,t,d}$  – návrhová pevnost ve valivém smyku pro lepené lamelové dřevo stejné pevnostní třídy

### • Průhyb

Okamžitý průhyb od ohybového momentu a smykové síly se spočítá podle následující rovnice:

$$W_{ges} = \frac{1}{(EI)_{clt}} \int (M\bar{M}) dx + \frac{1}{G_{clt}} \int (V\bar{V}) dx \quad 39$$

Pro dlouhodobý účinek je nutné zohlednit deformační faktor  $k_{def}(11)$ .

- **Vibrace**

Vibrace jsou posuzovány podle EN 1995-1-1. Podle této normy musí konstrukce splňovat čtyři kritéria. Nejprve je spočítána vlastní frekvence konstrukce podle Morleigha. Následně je určeno kritérium tuhosti. Poté se ověří rychlost kmitání. Posledním kritériem je zrychlení vibrací.

## **2.6 Porovnání výsledků předchozích metod a výsledků z CLTdesigneru**

V předchozí kapitole bylo vzneseno několik dohadů ohledně poměru  $l/h$ . Dohady se týkaly závislosti smykové deformace a velikosti poměru  $l/h$  a od kdy je možné smykovou deformaci zanedbat. Dvě analytické metody (metoda mechanicky spojovaných nosníků (gamma metoda) a kompozitní metoda) nezapočítávají smykovou deformaci do výpočtu, zato smyková analogie i program CLTdesigner vliv smykové deformace nezanedbávají.

V následující kapitole jsou vyhodnoceny výsledky pro 3 rozpětí, tak aby se poměr  $l/h$  rovnal 15, 20 a 30.

Výpočet je proveden pro různé poměry  $t_{90}/t_0$ , celkem pro 6 typů panelů.

Výpočet 3 analytických metod proběhl podle postupů popsanych v předchozí kapitole.

### **2.6.1 Vstupní hodnoty**

Zatížení je jiné pro každou skupinu rozpětí podle poměru  $l/h$ , tak, aby došlo k víceméně ekonomickému návrhu.

$$g_{1,k}(l/h = 15) = 20kN/m^2$$

$$g_{1,k}(l/h = 20) = 10kN/m^2$$

$$g_{1,k}(l/h = 30) = 2,5kN/m^2$$

Vlastní tíha panelu je brána z programu CLTdesigner. Všechny výpočty jsou vztaženy na šířku 1 m. Celkové charakteristické a návrhové zatížení je ukázáno v tabulce (Tabulka 6)

Výpočet proběhl pro 6 různých panelů s různým složením vrstev tak, aby poměr  $t_{90}/t_0$  byl v intervalu 0,50 a 2,00. Typy panelů a jejich výrobci jsou ukázány v tabulce (Tabulka 5). Všechny panely jsou vyrobené z lamel pevnostní třídy C24.

$$f_{m,c,k} = 26,1 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$f_{m,c,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{m,c,k}}{\gamma_m}$$

40

$$k_{\text{mod}} = 0,6$$

$$\gamma_m = 1,25$$

Rozpětí každého panelu se trochu liší, je určené tak, aby se poměr  $l/h$  rovnal přesně 15, 20 nebo 30 (Tabulka 7).

**Tabulka 5 - Použité CLT panely**

	Vrstvy	Výrobce	tloušťka	$t_{90}/t_0$	$g_{k,clt}$
			[mm]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]
1	40+20+40+20+40	MM Kaufmann	160	0,50	0,880
2	41+19+30+19+41	Hasslacher	150	0,51	0,825
3	39+25+27+25+39	HMS	155	0,71	0,852
4	34+30+34+30+34	KLH	162	0,88	0,891
5	30+30+30+30+30	DERIX	150	1,00	0,825
6	20+40+20+40+20	binderholz	140	2,00	0,770

**Tabulka 6 - Zatížení**

	$\Sigma g_k (l/h=15)$	$\Sigma g_d (l/h=15)$	$\Sigma g_k (l/h=20)$	$\Sigma g_d (l/h=20)$	$\Sigma g_k (l/h=30)$	$\Sigma g_d (l/h=30)$
	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]
1	20,880	28,188	10,880	14,688	3,380	4,563
5	20,825	28,11375	10,825	14,61375	3,325	4,48875
2	20,852	28,1502	10,852	14,6502	3,352	4,5252
3	20,891	28,20285	10,891	14,70285	3,391	4,57785
4	20,825	28,11375	10,825	14,61375	3,325	4,48875
6	20,770	28,0395	10,770	14,5395	3,270	4,4145

**Tabulka 7 - Rozpětí**

	Vrstvy	Tloušťka	Rozpětí		
			$l/h=15$	$l/h=20$	$l/h=30$
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	40+20+40+20+40	160	2400,00	3200,00	4800,00
5	41+19+30+19+41	150	2250,00	3000,00	4500,00
2	39+25+27+25+39	155	2325,00	3100,00	4650,00
3	34+30+34+30+34	162	2430,00	3240,00	4860,00
4	30+30+30+30+30	150	2250,00	3000,00	4500,00
6	20+40+20+40+20	140	2100,00	2800,00	4200,00

## 2.6.2 Výsledky

Pro každou konfiguraci byly vypočítány momenty  $M_{ed}$ ,  $M_{rd}$  a průhyb nosníku (Tabulka 8). Výpočet proběhl třemi výpočetními metodami a programem CLTdesigner. Hodnota z programu CLTdesigner je brána jako ta „nejpřesnější“ a hodnoty získané analytickými metodami jsou s ním porovnávány. V tabulce (Tabulka 9) jsou hodnoty uvedeny v procentech, kde 100% je vždy hodnota z CLTdesigner.

- **Rozdíly mezi momenty  $M_{rd}$**

Pevnost v ohybu není ve většině případů stežejní pro návrh CLT stropu, rozhodující je mezní stav použitelnosti (průhyb, vibrace).

Při porovnání momentů získaných analytickými metodami a CLT designerem je vidět, že vypočítané hodnoty jsou pro všechny možnosti menší, pohybují se okolo 90 % hodnoty z výpočetního programu. Toto může být způsobeno korekčním součinitelem, kterým byl zjištěn na základě testování CLT panelů. Tento faktor je pravděpodobně zakonponován v CLTdesigner a mírně zvětšuje pevnost v ohybu CLT panelů.

Při porovnání 3 analytických metod se hodnoty získané kompozitní metodou a smykovou analogií liší minimálně, hodnoty získané gamma metodou jsou o cca 5 % menší. To je pravděpodobně způsobeno tím, že gamma metoda započítává nulou pevnost v ohybu pro příčné vrstvy panelu.

U ohybu nebyla nalezena žádná souvislost mezi momenty a poměry  $l/h$  nebo  $t_{90}/t_0$ .

- **Rozdíly mezi průhyby**

Průhyby spočítané pomocí kompozitní metody neodpovídají očekávaným průhybům ani v jednom případě, většinou se liší o 0,7 mm, proto není doporučeno použít tuto metodu pro výpočet průhybu u CLT panelů.

Metodu gamma lze bezpečně použít pro výpočet průhybů pro panely s poměrem  $l/h > 30$ . Jak je vidět v tabulkách (Tabulka 8 a Tabulka 9), téměř na všech panelech pro tento poměr vyšel očekávaný průhyb, jedinou výjimkou je panel 3 (39+25+27+25+39).

Metodou smykové analogie vyšly hodnoty velmi podobné průhybům z CLTdesigner. Z tabulek (Tabulka 8 a Tabulka 9) lze vyzorovat, že rozdíly výsledků pro různé poměry  $t_{90}/t_0$  se liší. Je potřeba podrobnější výzkum. Metodu smykové analogie lze použít pro všechny poměry  $l/h$ .

Tabulka 8 - Výsledky

č.	metoda	M <sub>ed</sub>	M <sub>rd</sub>	Δ <sub>L</sub>	M <sub>ed</sub>	M <sub>rd</sub>	Δ <sub>L</sub>	M <sub>ed</sub>	M <sub>rd</sub>	Δ <sub>L</sub>
		[kNm]	[kNm]	[mm]	[kNm]	[kNm]	[mm]	[kNm]	[kNm]	[mm]
1	Panel	40+20+40+20+40, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,50, h = 160 mm								
	Rozpětí	l=2,400 m, L/h = 15			l=3,200 m, L/h = 20			l=4,800 m, L/h = 30		
	Gamma metoda	20,30	41,10	3,25	18,80	41,84	4,96	13,14	42,49	7,35
	Kompozitní metoda	20,30	43,02	2,67	18,80	43,02	4,42	13,14	43,02	6,96
	Smyková analogie	20,30	43,02	3,56	18,80	43,02	5,23	13,14	43,02	7,52
	CLT designer	20,30	48,33	3,41	18,80	48,33	4,99	13,14	48,31	7,16
2	Panel	41+19+30+19+41, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,51, h = 150 mm								
	Rozpětí	l=2,250 m, L/h = 15			l=3,000 m, L/h = 20			l=4,500 m, L/h = 30		
	Gamma metoda	17,79	36,75	3,01	16,44	37,56	4,55	11,36	38,17	6,63
	Kompozitní metoda	17,79	39,31	2,42	16,44	39,31	3,97	11,36	39,31	6,17
	Smyková analogie	17,79	38,8	3,32	16,44	38,8	4,83	11,36	38,8	6,8
	CLT designer	17,79	43,6	3,17	16,44	43,61	4,60	11,36	43,52	6,47
3	Panel	39+25+27+25+39, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,71, h = 155 mm								
	Rozpětí	l=2,325 m, L/h = 15			l=3,100m, L/h = 20			l=4,650 m, L/h = 30		
	Gamma metoda	19,02	37,77	3,34	17,6	38,57	4,99	12,23	39,27	7,23
	Kompozitní metoda	19,02	40,49	2,59	17,6	40,49	4,26	12,23	40,49	6,67
	Smyková analogie	19,02	40,02	3,65	17,6	40,02	5,25	12,23	40,02	7,41
	CLT designer	19,02	44,96	3,67	17,6	45,01	5,28	12,23	44,96	7,42
4	Panel	34+30+34+30+34, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,88, h = 162 mm								
	Rozpětí	l=2,430 m, L/h = 15			l=3,240 m, L/h = 20			l=4,860 m, L/h = 30		
	Gamma metoda	20,82	38,32	3,77	19,29	39,09	5,65	13,52	39,67	8,27
	Kompozitní metoda	20,82	40,44	2,97	19,29	40,44	4,89	13,52	40,44	7,71
	Smyková analogie	20,82	40,44	4,06	19,29	40,44	5,9	13,52	40,44	8,42
	CLT designer	20,82	45,16	3,87	19,29	45,07	5,57	13,52	45,07	7,85
5	Panel	30+30+30+30+30, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 1,00, h = 150 mm								
	Rozpětí	l=2,250 m, L/h = 15			l=3,000 m, L/h = 20			l=4,500 m, L/h = 30		
	Gamma metoda	17,79	31,98	3,60	16,44	32,62	5,37	11,36	33,10	7,74
	Kompozitní metoda	17,79	33,78	2,81	16,44	33,78	4,62	11,36	33,78	7,18
	Smyková analogie	17,79	33,78	3,86	16,44	33,78	5,59	11,36	33,78	7,85
	CLT designer	17,79	37,93	3,77	16,44	37,97	5,4	11,36	37,99	7,52
6	Panel	20+40+20+40+20, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 2,00, h = 140 mm								
	Rozpětí	l=2,100 m, L/h = 15			l=2,800 m, L/h = 20			l=4,200 m, L/h = 30		
	Gamma metoda	15,46	22,68	4,19	14,25	23,04	6,22	9,73	23,30	8,83
	Kompozitní metoda	15,46	23,96	3,21	14,25	23,96	5,27	9,73	23,96	8,10
	Smyková analogie	15,46	23,96	4,38	14,25	23,96	6,34	9,73	23,96	8,83
	CLT designer	15,46	26,93	4,50	14,25	26,94	6,45	9,73	26,95	8,90

Tabulka 9 - Výsledky v procentech

č.	metoda	M <sub>rd</sub>	Δ <sub>L</sub>	M <sub>rd</sub>	Δ <sub>L</sub>	M <sub>rd</sub>	Δ <sub>L</sub>
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	Panel	40+20+40+20+40, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,50, h = 160 mm					
	Rozpětí	1		2		3	
	Gamma metoda	85,03	95,31	86,57	99,40	87,95	102,65
	Kompozitní metoda	89,01	78,30	89,01	88,58	89,05	97,21
	Smyková analogie	89,01	104,40	89,01	104,81	89,05	105,03
	CLT designer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Panel	41+19+30+19+41, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,51, h = 150 mm					
	Rozpětí	1		2		3	
	Gamma metoda	84,28	94,95	86,13	98,91	87,70	102,47
	Kompozitní metoda	90,15	76,34	90,15	86,30	90,32	95,36
	Smyková analogie	88,98	104,73	88,98	105,00	89,14	105,10
	CLT designer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Panel	39+25+27+25+39, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,71, h = 155 mm					
	Rozpětí	1		2		3	
	Gamma metoda	84,00	91,01	85,69	94,51	87,34	97,44
	Kompozitní metoda	90,05	70,57	89,95	80,68	90,05	89,89
	Smyková analogie	89,00	99,46	88,91	99,43	89,01	99,87
	CLT designer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4	Panel	34+30+34+30+34, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 0,88, h = 162 mm					
	Rozpětí	1		2		3	
	Gamma metoda	84,85	97,42	86,73	101,44	88,03	105,35
	Kompozitní metoda	89,54	76,74	89,73	87,79	89,73	98,22
	Smyková analogie	89,54	104,91	89,73	105,92	89,73	107,26
	CLT designer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
5	Panel	30+30+30+30+30, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 1,00, h = 150 mm					
	Rozpětí	1		2		3	
	Gamma metoda	84,31	95,49	85,92	99,44	87,12	102,93
	Kompozitní metoda	89,05	74,54	88,97	85,56	88,91	95,48
	Smyková analogie	89,05	102,39	88,97	103,52	88,91	104,39
	CLT designer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
6	Panel	20+40+20+40+20, t <sub>90</sub> /t <sub>0</sub> = 2,00, h = 140 mm					
	Rozpětí	1		2		3	
	Gamma metoda	84,21	93,11	85,53	96,43	86,45	99,21
	Kompozitní metoda	88,96	71,33	88,95	81,71	88,90	91,01
	Smyková analogie	88,96	97,33	88,95	98,29	88,90	99,21
	CLT designer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

### 3. VÍCEPDLAŽNÍ DŘEVOSTAVBY Z CLT

Tato kapitola se soustředí na problematiku vícepodlažních dřevostaveb z CLT.

#### 3.1 Výška

Zatím nejvyšší budova postavená z CLT je Forté (Melbourne), která má 10 pater (32,2 m). „Předlohou“ pro Forté byla stavba Graphite Apartments (Stadthaus) v Londýně, která má 9 pater (29,75 m).

##### **Graphite apartments**

Není překvapení, že první „moderní“ vícepodlažní dřevěná budova se objevila ve Velké Británii. Velká Británie se vyznačuje velmi unikátním přístupem ke dřevěným stavbám. Národní stavební kód nelimituje maximální výšku dřevěných budov a požární opatření platí stejné pro dřevo jako pro ostatní materiály. Projektant si může vybrat, zda chce navrhovat podle předepsaných pravidel nebo zvolit alternativní návrh. Alternativní návrh zahrnuje individuální dohodu mezi investorem, projektantem a stavebním úřadem. Tato možnost podporuje použití nových technologií pro řešení problémů. Když projektant dokáže, že materiál je bezpečný a splňuje požadavky, může být použit. (1)



Obrázek 3 - Graphite apartments v Londýně (12)

## Forté

Nynější nejvyšší rezidenční budova ze dřeva na světě je Forté v Melbourne. Budova se nachází v centru Melbourne v části Docklands, které v minulosti bylo „brownfield“, nevyužívané přístaviště. V posledních letech dochází v této lokalitě k velké výstavbě, jedná se hlavně o residenční a komerční budovy.

Jedna z největších firem v Austrálii, LendLease, plánuje v této oblasti výstavbu několika obytných budov a Forté je jejich pilotní projekt. V této oblasti je velmi špatná základová půda, a proto dřevo bylo vybráno jako hlavní konstrukční prvek. Forté je první z řady plánovaných budov vyrobených z CLT v této oblasti, jedná se o první CLT projekt v Austrálii.

V době návrhu nebylo možné postavit tak vysokou dřevěnou budovu bez podrobného výzkumu. V Austrálii norma umožňuje navrhovat podle schválených metod (deemed to satisfy) nebo podle alternativního návrhu, kdy ale použití nových materiálů a postupů musí být podpořeno vlastním testováním a výzkumem. Alternativní návrh musí splňovat stejnou míru bezpečnosti jako schválené metody. Firma LendLease toto vše udělala a plánuje poznatky získané při návrhu Forté použít u další výstavby, kterou plánuje v této oblasti.

Část experimentu firmy spočívalo také ve zjištění, zda jsou lidé ochotni vůbec bydlet ve „dřevěném“ domě. Některé vnitřní stěny v bytech zůstaly odhaleny, bez sádkartonového obkladu, aby bylo na první pohled zřejmé, že jde o dřevěnou konstrukci. Prodej bytových jednotek začal neobvykle až po dokončení stavby a po týdnu bylo vyprodáno.



Obrázek 4 - Forté budova v Melbourne (13)



### 3.1.1 Limity

Předpokládá se, že je možné stavět dřevěné budovy až do výšky 40 m (až 13 pater). Nyní je výška limitována mnoha faktory, které jsou dále podrobněji diskutovány v dalších částech této kapitoly.

- **Požární bezpečnost**

Výška dřevěných budov je limitována hlavně požární bezpečností stavby. Podle národního dodatku České Republiky k Eurokódu 5 je maximální požární výška budovy s nosnou konstrukcí z hořlavého materiálu 12 m (14).

- **Smršťování dřeva**

Mezi další faktor, který limituje maximální možnou výšku budovy navržené ze systému panelů CLT, patří smrštění dřeva kolmo k vláknům a rovnoběžně s vlákny. Smrštění rovnoběžné s vlákny je minimální, ale smrštění kolmo na vlákna je mnohem větší.

- **Spoje panelů**

Konstrukční účinnost stropního systému, která zajišťuje prostorovou tuhost a chová se jako membrána, závisí na účinnosti spojovacích prostředků a detailů spojení panelů s dalšími prvky konstrukce. (3) Podle pana Weisse a pana Linagara je možné s nyní dostupnými spojovacími prostředky postavit budovu z CLT až s 15 patry a v budoucnosti je možné dosáhnout až 45 pater (15).

### 3.2 Materiálové řešení

Je snaha o návrh celodřevěné konstrukce, ale v odůvodněných případech je nutné začlenit jiný materiál do nosné konstrukce budovy. Většinou se jedná o železobetonový prvek.

- **Železobetonové 1. NP**

V některých případech je vhodné navrhnout první nadzemní patro ze železobetonu. Jestliže se jedná o vyšší konstrukci, která se navíc nachází v oblasti s vysokým zatížením větrem (Forté, Austrálie), je vhodné konstrukci přitížit a řádně zakotvit proti ztrátě stability.

Železobetonové první patro také dělá konstrukci méně náchylnou k progresivnímu kolapsu, například v případě nárazu vozidla do prvního patra budovy (Graphite Apartments, Velká Británie).

V případě hotelu Alpen Ammerwald (Rakousko) jsou první dvě patra železobetonová, na nich jsou usazena tři patra modulových jednotek z CLT. Železobetonová patra jsou navržena hlavně kvůli sněhu, v zimě může v této oblasti dosahovat výšky až 2 metry.

(1)

- **Železobetonová výtahová šachta**

Železobetonové jádro slouží jako ztužení proti účinkům větru a také jako požární úniková cesta z nehořlavého materiálu.

Všeobecně je ale snaha nenavrhnout železobetonové jádra ve dřevěné konstrukci z CLT. Hlavní důvod je smrštění/expanze dřeva se změnou vlhkosti. V případě spojení dřevěné konstrukce s železobetonovým jádrem by se obě konstrukce pohybovaly rozdílně.

Někdy je železobetonové jádro požadované stavebním úřadem. V případě budovy H8 v Německu bylo nutné do projektu zapracovat železobetonové jádro/schodiště, které slouží jako požární úniková cesta. Jádro je umístěno mimo budovu, je otevřené a přístupné z každého bytu balkonem. (1)

### **3.3 Konstrukční řešení**

#### **3.3.1 Dispozice**

Dispozice může být jak stěnová tak i sloupová. U stěnové dispozice je použito stěnových CLT panelů a stropních desek z CLT. U sloupových systémů se používá většinou spojení CLT stropních desek s nosníky a sloupy z lepeného lamelového dřeva. Sloupy z lepeného lamelového dřeva mají 100% kapacitu pro vodorovné zatížení, protože dřevěná vlákna jsou účinná ve směru zatížení. CLT panely mají účinnost zhruba 50 % ve svislém směru díky vrstvení.

Stěnové dispozice mohou být jednosměrné i obousměrné, záleží na spojení panelu se stěnami a také na poměru stran. Jestliže je poměr stran uvažované obousměrně pnuté desky větší než 2, deska se uvažuje jako jednosměrně pnutá.

Stěny jsou většinou přes jedno patro, stěny pokračující přes více podlaží se mohou použít pouze u menších budov. Limitujícím faktorem je omezená velikost panelů (transport panelů).

### 3.3.2 Příklady konstrukčních řešení (1)

- **Honeycomb**

System „honeycomb“ (plástev medu) se skládá pouze z nosných stěn. Hlavním svislým nosným prvkom jsou vnitřní stěny, konstrukce není závěšená do vnitřního jádra. Svislé stěny se chovají jako ztužující stěny. Další výhodou je možnost změny dispozice v průběhu životnosti budovy. Konstrukce je navržena tak, aby ji přesunutí nebo odstranění vnitřní nosné stěny nijak neohrozilo. Panely jsou předimenzovány s dostatečnou tuhostí, aby vydržely zdvojnásobené rozpětí nebo vykonzolování. V případě odstranění jedné stěny se stěna nad ní začne chovat jako stěnový nosník a vynáší zatížení od stropní desky. Tento typ konstrukce je také velmi výhodný vzhledem k „progresivnímu kolapsu“. Tento systém je použit u Graphite Apartments (Velká Británie) a Forté (Austrálie).

- **CLT panely jako konzoly a stěnové nosníky**

Jedna z nejvíce staticky inovativních budov s ohledem na nosné vlastnosti CLT je obytná budova Whitmore Road (Velká Británie). Jedná se o šesti patrovou budovu s prvním nadzemním patrem ze železobetonu. Stropní panely z CLT mají maximální rozpětí 9,5 x 20 m, na jedné straně jsou vykonzolované 2 m. Pro dosažení takového rozpětí se vnější stěny chovají jako stěnové nosníky a vnitřní stěny jako podpěrné trámy. Třetí patro má zdvojenou výšku.



Obrázek 5 - Whistleton Road (1)

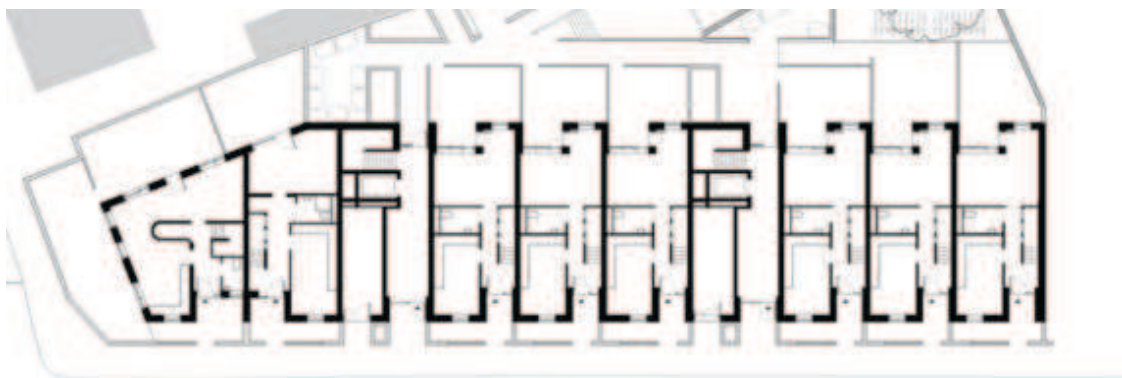
- **Změna konstrukčního systému**

Konstrukční systém „cross-wall construction“ je oblíbený systém pro budovy z CLT. V tomto typu konstrukce jsou nosné stěny umístěny v příčném směru. Tento nosný systém se často používá u obytných budov, jako jsou hotely, koleje pro studenty i rezidenční budovy. Používá se hlavně pro železobetonové prefabrikované konstrukce (16). Zajímavým příkladem je Bridgeport house (Velká Británie).

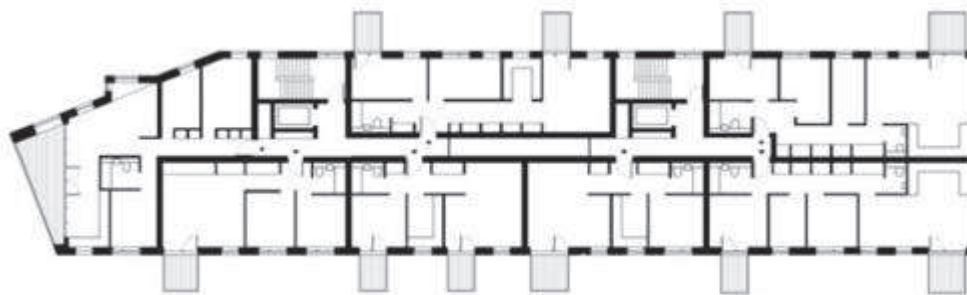
Tato stavba je velmi zajímavá svojí změnou konstrukčního systému. První dvě patra jsou navržena jako typická „cross-wall construction“, nachází se zde „mezonety“ (Obrázek 6). Horizontální síly jsou přenášeny do stěn pomocí stropních desek, které pak přenášejí vnitřní síly do základů.

V horních patrech se nacházejí bytové jednotky, konstrukční systém se změnil na podélný systém. Nosné stěny jsou v těchto patrech hlavně vnější a „chodbové“. Tento systém umožňuje určitou variabilitu bytových jednotek, dispozice bytu záleží na potřebách a přáních obyvatelů a není limitována nosnými (nepřemístitelnými) stěnami uvnitř bytových jednotek (Obrázek 7).

Stěny ve třetím patře (změna konstrukčního systému) se chovají jako nosníky, které jsou podepřeny stěnami v prvním a druhém patře. K bezproblémovému přenosu zatížení jsou v místech nosníku umístěny ocelové podložky (boty), které pomáhají roznášet zatížení do příčných stěn a zabraňují drcení CLT panelů.



Obrázek 6 - Bridgeport house - první a druhé patro (1)



Obrázek 7 - Bridgeport house - vyšší patra (1)

### 3.4 Spojení CLT panelů

#### 3.4.1 Spojovací prostředky

- **Samořezné šrouby**

Tyto šrouby jsou většinou doporučovány výrobcí a patří mezi nejpoužívanější produkty v Evropě. Jejich instalace je velmi jednoduchá a mají vysokou únosnost proti vytržení. Jsou dostupné v mnoha velikostech, s průměrem od 4 do 12 mm a délkou až 600 mm (5). Není nutné je předvrtávat. Při zjišťování únosnosti je nezbytné brát v úvahu nerovnoměrnost lepení (mezery, které nejsou vyplněny lepidlem) i další výskyt vad dřeva.



Obrázek 8 - Samořezné šrouby (3)

- **Kolíky a svorníky (3)**

Hřebíky s drážkami se nejčastěji používají s perforovanými ocelovými deskami, jsou instalovány na povrch CLT panelů. Většina norem nedovoluje použití těchto spojů na hrany panelů.

- **Klínové desky, kruhové záchytky (5)**

Jde o poměrně nově používané spojení panelů z CLT. Klíny (speciálně profilované) se kombinují s ocelovými úhelníky. Stejně jako u kolíku se svorníky není dovoleno je použít na hrany panelů.

- **Vlepované tyče a trubky (3)**

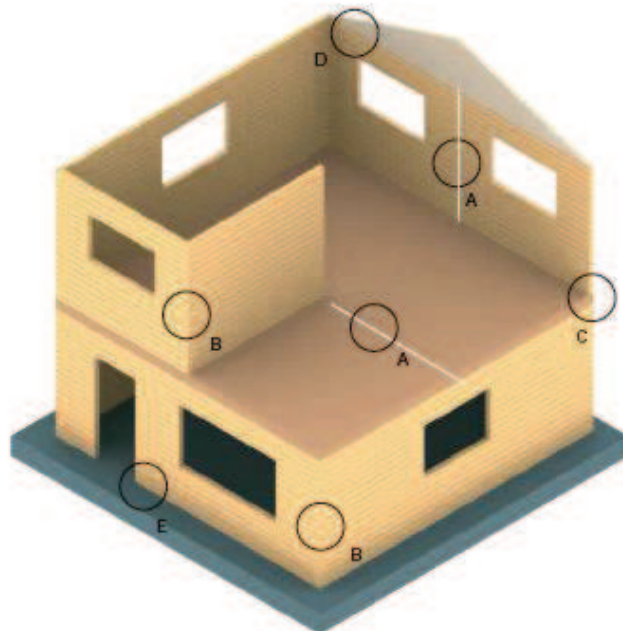
Na rozdíl od předchozích spojovacích prostředků vlepované tyče se používají ke spojení úzkých stran panelů a k přenosu velkých podélných a příčných sil, navíc redukuje možnost rozštěpení CLT panelů. Tyče jsou většinou profilované (závitové).

Vlepované trubky jsou v panelu zabudované už z výroby.

- **Ocelové úhelníky**

### 3.4.2 Spojení panelů

Tato podkapitola se zabývá rozborem nejčastějších spojení mezi CLT panely a stěnami. Mezi tyto spojení patří spojení mezi dvěma panely (A), rohové spojení dvou stěn (B), spojení panelu se stěnou (C) a spojení stěny se základem (E). Nyní si každý výrobce většinou specifikuje požadované spojení panelů a správné řešení detailů.



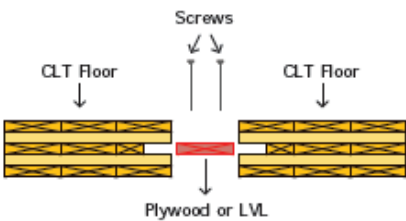
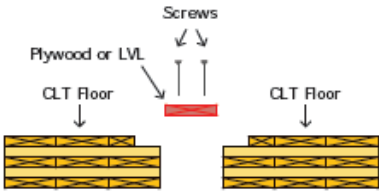
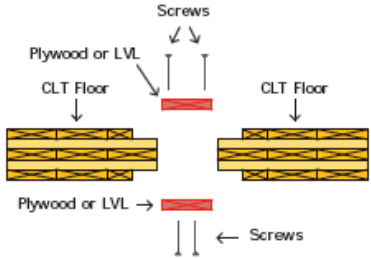
Obrázek 9 - Typy spojů CLT panelů (3)

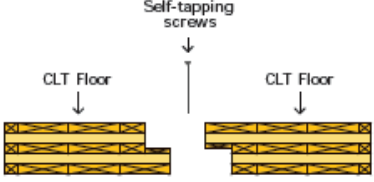
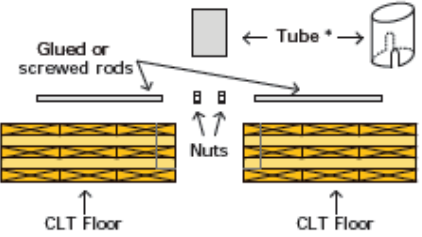
- **Spojení mezi dvěma panely**

Existuje několik typů spojení dvou panelů. Velmi záleží, zda spoj má přenášet ohybový moment nebo ne. Kvůli omezeným možnostem dopravy panelů jsou panely dopravovány po kusech a následující spojení probíhá až na stavbě. Spojení panelů by mělo být jednoduché a rychlé.

Jestliže se spojení panelů nachází nad/pod stěnou, musí být navrženo na smyk a ohybový moment kolmo k rovině. Když se spojení nachází u panelů, které fungují jako diafragma (ztužují konstrukci a přenášejí vodorovné síly), spojení musí být navrženo také na normálové síly. V následující tabulce (Tabulka 10) jsou ukázány různé typy spojů.

**Tabulka 10 - Spojení panel - panel (3)**

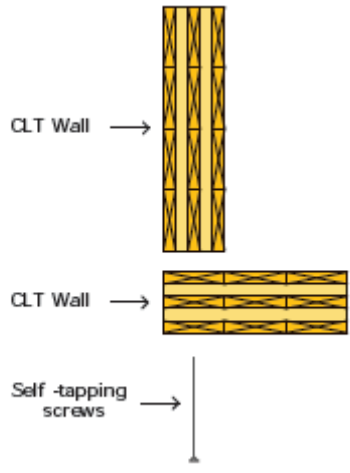
Spoj	Popis
	<p><b>Spojení pomocí vnitřní vložky</b></p> <p>V: Velmi výhodné pro smyk (dvojitě přenášení smyku), poskytuje dodatečnou únosnost pro normálové a momentové (kolmo k rovině) namáhání</p> <p>N: Panely musí být profilovány už v továrně, spojení náročné na přesnost</p> <p><i>Screws – šrouby, CLT floor – CLT stropní panel, Plywood or LVL – překližka nebo LVL</i></p>
	<p><b>Spojení pomocí horní vložky</b></p> <p>V: Jednoduché a rychle spojení</p> <p>N: Jednoduché přenášení smykových sil</p> <p><i>Screws – šrouby, CLT floor – CLT stropní panel, Plywood or LVL – překližka nebo LVL</i></p>
	<p><b>Spojení pomocí horního a dolního pruhu</b></p> <p>V: Zvýšená tuhost a únosnost pomocí přidání druhého pruhu</p> <p>N: Pracnější a časově náročnější spojení</p> <p><i>Screws – šrouby, CLT floor – CLT stropní panel, Plywood or LVL – překližka nebo LVL</i></p>

 <p>CLT Floor</p> <p>Self-tapping screws</p> <p>CLT Floor</p>	<p><b>Spojení na ozub</b>  V: Velmi rychlé  N: Nebezpečí rozštěpení průřezu (spojení nepřenáší moment)</p> <p><i>Self-tapping screws – samořezné šrouby,  CLT floor – CLT stropní panel,</i></p>
 <p>GLUED OR SCREWED RODS</p> <p>Tube *</p> <p>Nuts</p> <p>CLT Floor</p> <p>CLT Floor</p>	<p><b>Spojení pomocí ocelových tyčí a trubky</b>  V: Relativně rychlé a zatím spolehlivé spojení, stále probíhá výzkum</p> <p><i>CLT floor – CLT stropní panel,  Glued or screwed rods – lepené nebo šroubované tyče,  Tube – trubka,  Nuts - matice</i></p>

- **Rohový spoj mezi stěnami**

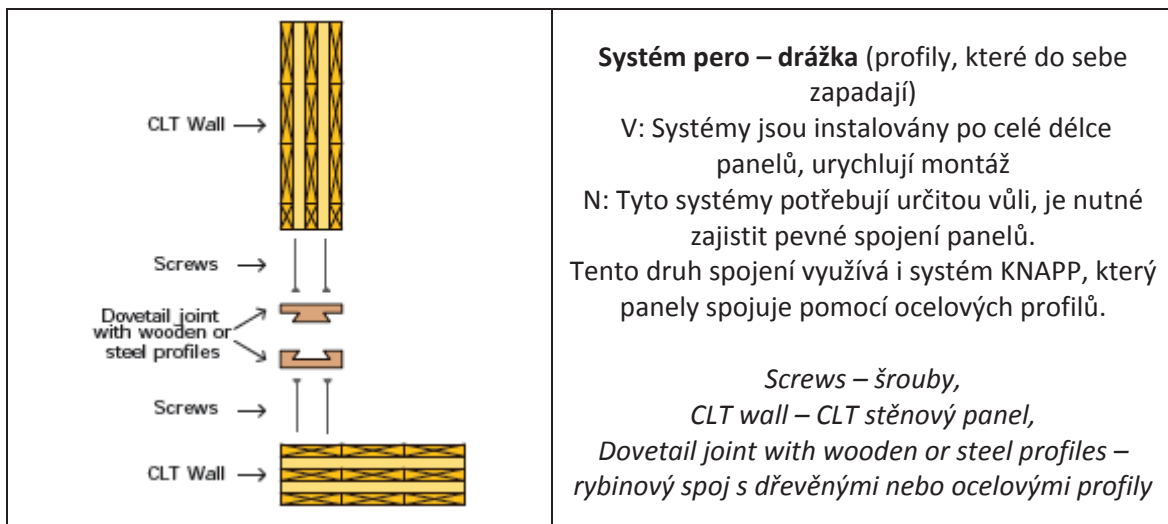
Toto spojení zahrnuje rohové spojení dvou nosných stěn, ale i spojení nosné stěny s příčkou. Různé typy spojů jsou ukázány v následující tabulce (Tabulka 11).

Tabulka 11 - Rohové spojení stěn (3)

Spoj	Popis
 <p>CLT Wall</p> <p>CLT Wall</p> <p>Self-tapping screws</p>	<p><b>Spojení pomocí samořezných šroubů:</b>  V: Nejjednodušší možný spoj  N: Šrouby jsou umístěny do koncové části průřezu, pro malá zatížení to není problém, ale toto spojení se nehodí pro stěny zatížené větrem nebo seismicitou. Únosnost šroubu se zvýší skloněním šroubu.  Na styku stěn je těsnící pás.</p> <p><i>Self-tapping screws – samořezné šrouby,  CLT wall – CLT stěnový panel,</i></p>



	<p><b>Spojení pomocí dřevěných profilů</b>  Toto je spojení samovrtnými šrouby.  V: Zlepšení únosnosti spoje přidáním více šroubů posilující přidáný dřevěný profil se stěnami. Dřevěný profil může být různě profilovaný, dále profil může sloužit jako ochrana hrany panelu.</p> <p><i>Self-tapping screws – samořezné šrouby,  CLT wall – CLT stěnový panel,  Wooden profile (hardwood, LVL or plywood) – dřevěný profil (tvrdé dřevo, LVL nebo překližka)</i></p>
	<p><b>Spojení pomocí ocelových úhelníků</b>  V: Jedno z nejjednodušších spojení, má velkou únosnost  N: Při použití CLT jako finální úpravy interiéru není toto spojení žádoucí, navíc má menší požární odolnost než skryté spoje  Na styku stěn je těsnící pás.</p> <p><i>Screws – šrouby,  CLT wall – CLT stěnový panel,  Metal bracket – ocelový úhelník</i></p>
	<p><b>Skrytý ocelový pás</b>  V: Je skrytý v interiéru, lepší chování při požáru  N: Složitější instalace už v CLT výrobě, přesné provrtání dřeva a ocelového pásu</p> <p><i>Screws – šrouby,  CLT wall – CLT stěnový panel,  Metal plate – ocelová deska,  Tight fit dowels, SFS dowels or bolts – těsně přiléhající hmoždinky, SFS hmoždinky nebo šrouby</i></p>

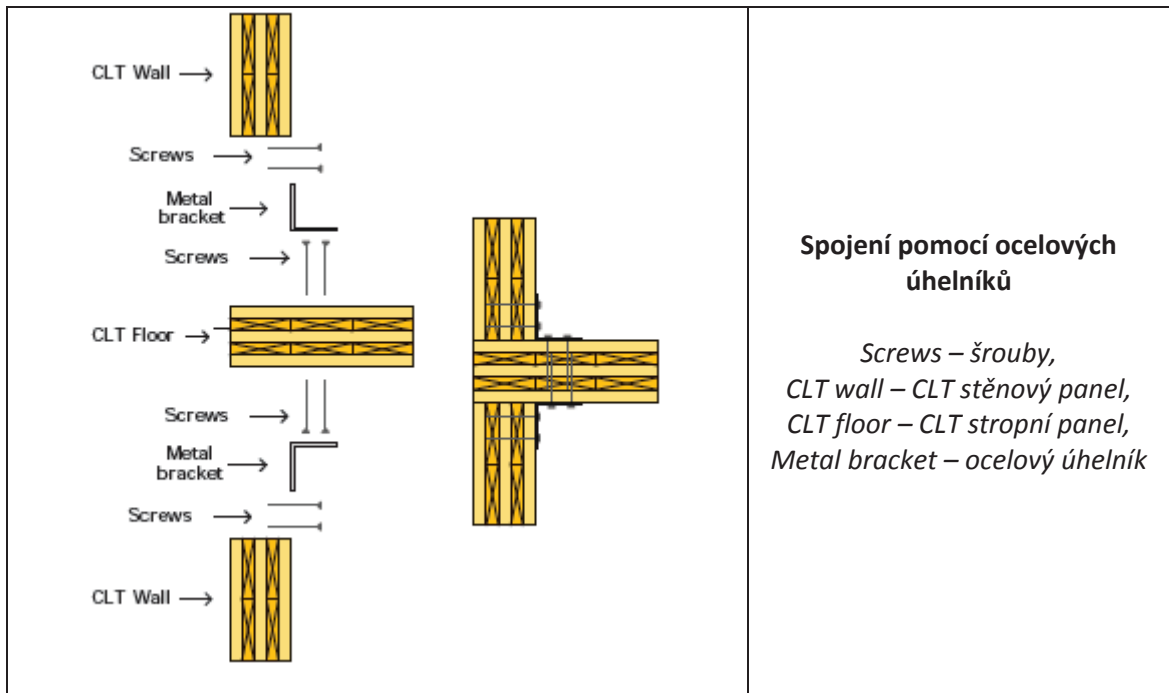


- **Spojení panelu se stěnou**

Při spojování stropní desky se stěnovým prvkem je nutné vyhnout se spojení s čelní stranou panelu.

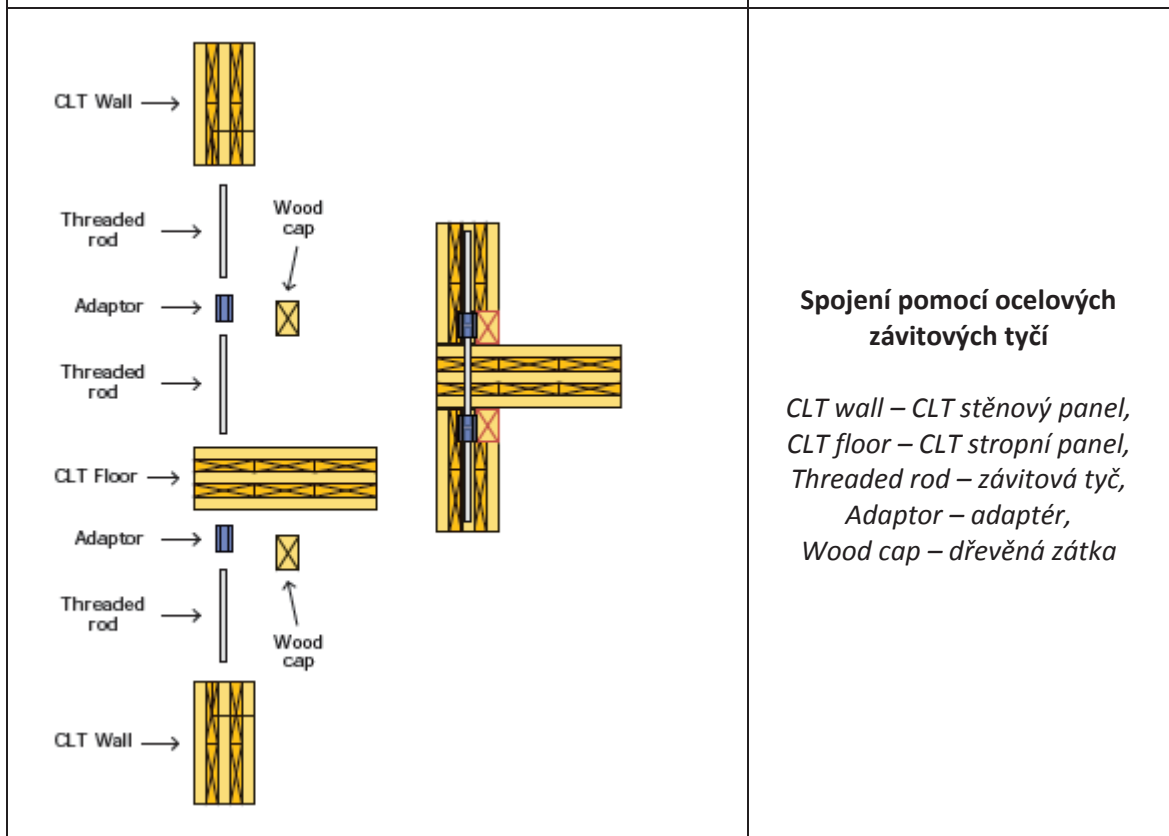
Tabulka 12 - Spojení panelu se stěnou (3)

Spoj	Popis
<p>CLT Wall →</p> <p>Self-tapping screws</p> <p>CLT Floor →</p> <p>CLT Wall →</p>	<p><b>Spojení samořeznými šrouby</b>  Nejjednodušší spojení</p> <p><i>Self-tapping screws – samořezné šrouby,</i>  <i>CLT wall – CLT stěnový panel,</i>  <i>CLT floor – CLT stropní panel</i></p>



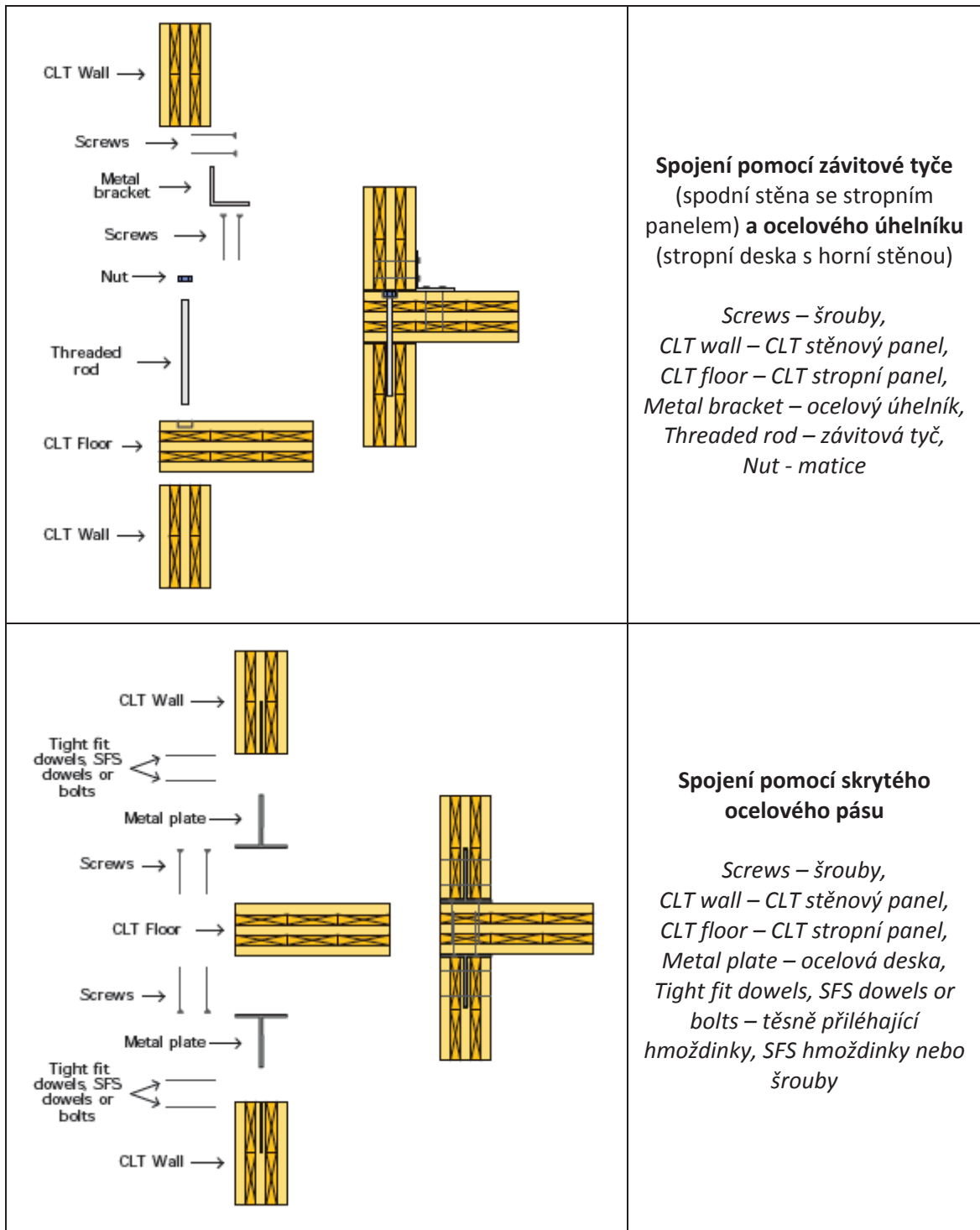
**Spojení pomocí ocelových úhelníků**

*Screws – šrouby,  
CLT wall – CLT stěnový panel,  
CLT floor – CLT stropní panel,  
Metal bracket – ocelový úhelník*



**Spojení pomocí ocelových závitových tyčí**

*CLT wall – CLT stěnový panel,  
CLT floor – CLT stropní panel,  
Threaded rod – závitová tyč,  
Adaptor – adaptér,  
Wood cap – dřevěná zátka*

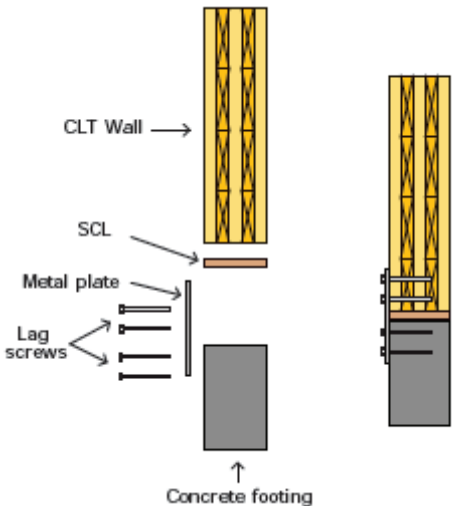
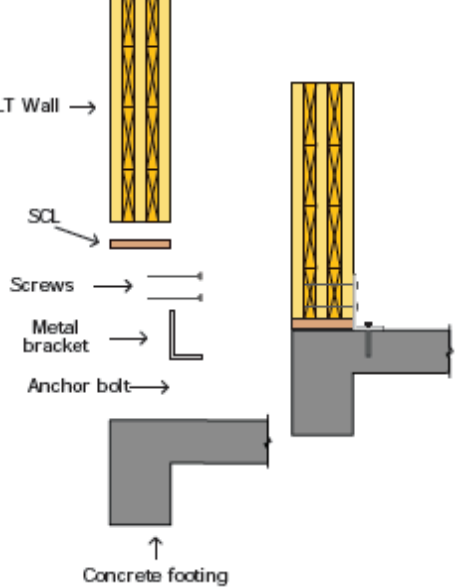


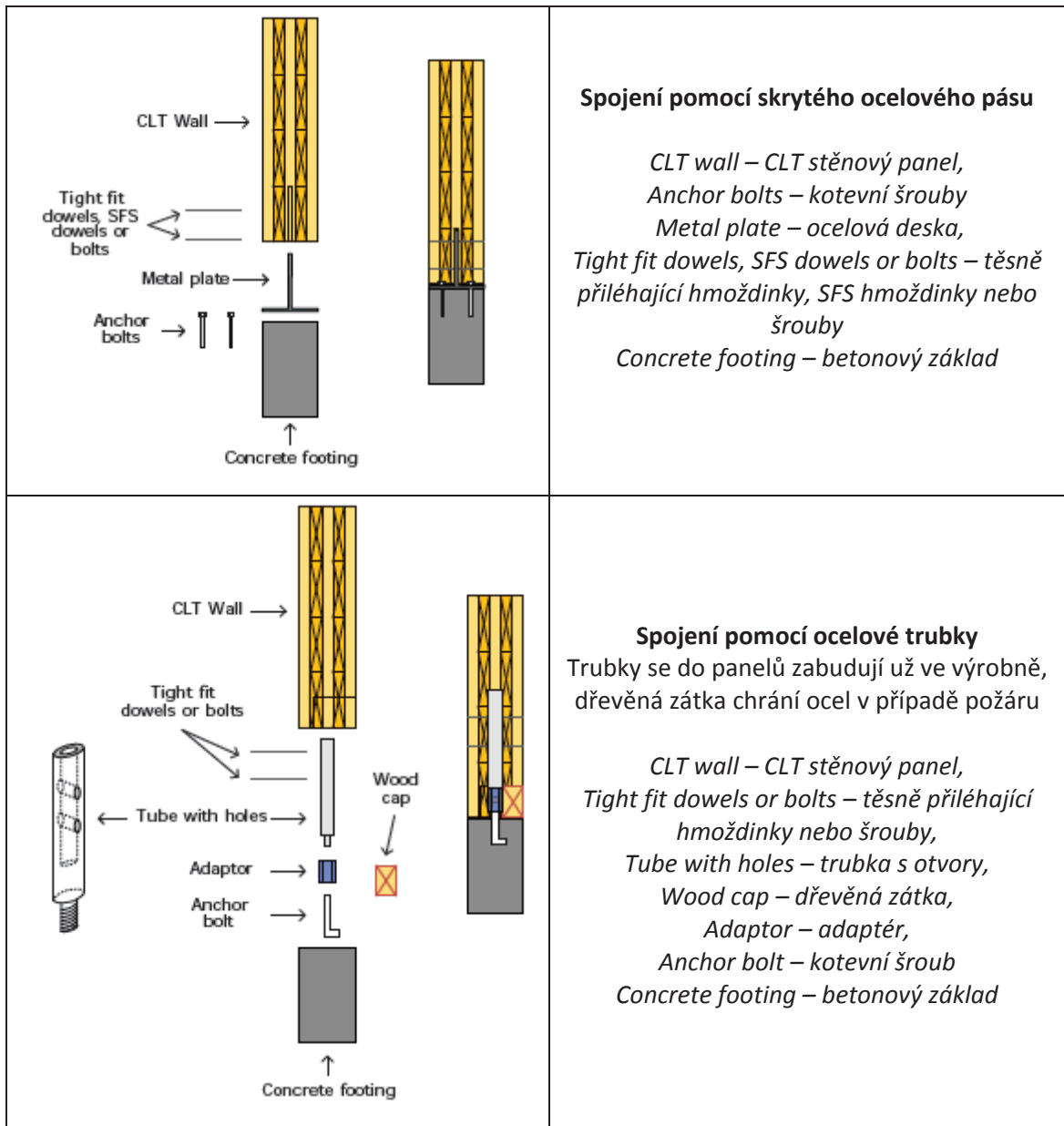
- **Spojení panelu se základem**

Spojení CLT panelu s železobetonovým základem probíhá většinou pomocí ocelového úhelníku nebo ocelové desky. Typická vzdálenost připojení je 1219 mm (3), záleží na zatížení.

Spojení může být provedeno jak z venku (ocelová deska), tak zevnitř (ocelový úhelník).

Tabulka 13 - Spoj panel - základ (3)

Spoj	Popis
	<p><b>Spojení pomocí ocelové desky (vnější)</b>  Dřevěná deska chrání dřevo před vlhkostí a pomáhá vyrovnávat případné nerovnosti povrchů.  Spoj je možné provést i bez dřevěné desky.</p> <p><i>CLT wall – CLT stěnový panel,  Metal plate – ocelová deska,  Lag screws – šrouby,  SCL – strukturální kompozitní dřevo,  Concrete footing – betonový základ</i></p>
	<p><b>Spojení pomocí ocelového úhelníku (vnitřní)</b></p> <p><i>CLT wall – CLT stěnový panel,  Metal bracket – ocelový úhelník,  Screws – šrouby,  SCL – strukturální kompozitní dřevo,  Concrete footing – betonový základ,  Anchor bolt – kotevní šroub</i></p>



<p>CLT Wall →</p> <p>Threaded rod →</p> <p>Adaptor →</p> <p>Anchor bolt →</p> <p>Concrete footing</p> <p>Wood cap</p>	<p><b>Spojení pomocí závitové tyče</b></p> <p><i>Screws – šrouby,</i>  <i>CLT wall – CLT stěnový panel,</i>  <i>Threaded rod – závitová tyč,</i>  <i>Wood cap – dřevěná zátka,</i>  <i>Adaptor – adaptér,</i>  <i>Anchor bolt – kotevní šroub</i>  <i>Concrete footing – betonový základ</i></p>
<p>CLT Wall →</p> <p>Wooden profile (hardwood, LVL or plywood) →</p> <p>Screws →</p> <p>Metal bracket →</p> <p>Anchor bolt →</p> <p>Concrete footing</p>	<p><b>Spojení pomocí dřevěných profilů</b>  V: Jednoduchá instalace</p> <p><i>CLT wall – CLT stěnový panel,</i>  <i>Metal bracket – ocelový úhelník,</i>  <i>Screws – šrouby,</i>  <i>Concrete footing – betonový základ,</i>  <i>Anchor bolt – kotevní šroub</i>  <i>Wooden profile (hardwood, LVL or plywood)</i>  – dřevěný profil (tvrdé dřevo, LVL nebo překližka)</p>

### 3.4.3 Příklady realizovaných spojů (1)

Většina realizovaných staveb používá spojení pomocí ocelových úhelníků po určitých vzdálenostech (Graphite apartments - Obrázek 10).



Obrázek 10 - Typický spoj (1)

V případě většího namáhání spojů lze použít spojení pomocí ocelových úhelníků po celé délce spoje (Whitmore road - Obrázek 11). Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole (3.3.2), vnitřní stěny se zde chovají jako podpěrné trámy a proto bylo nutné zajistit opravdu pevné a spojité spojení.



Obrázek 11 - Spojení po celé ploše (1)

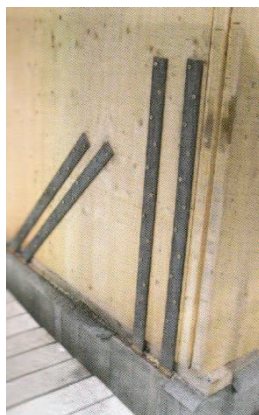


Pro vyloučení drcení dřeva ve styku stěna – panel – stěna byl vyvinut systém profilovaných stěn a panelů (Bridgeport house - Obrázek 12). V této budově je každá nosná stěna navržena jako profilovaná, tak aby se stěna dotýkala nosné stěny pod ní. Tento systém zvyšuje únosnost panelu, minimalizuje možnost drcení panelu a snižuje svislý pohyb konstrukce až o 40 %.



Obrázek 12 - Profilované stěny (1)

Jestliže se jedná o budovu relativně vysokou a dlouhou (Svartlamoen housing, Norsko), zatížení větrem je vysoké a budovu je nutné řádně zakotvit, v tomto případě k železobetonovému prvnímu patru. Panely s železobetonovou konstrukcí byly spojeny pomocí ocelových pásů, které jsou připojeny k železobetonové konstrukci a připevněny k CLT panelům až do výšky 1 m (Obrázek 13).



Obrázek 13 - Kotvení CLT panelů (1)

### 3.5 Požární odolnost CLT

CLT je schopné samo o sobě odolat požáru, není nutné ho obkládat. Když je dřevo přiznané, bez jakéhokoli obkladu, stačí přidat vrstvu (vrstvy) navíc a panel může dosáhnout požadované požární odolnosti (17).

V začátcích CLT bylo hodnocení požární odolnosti křížem vrstveného dřeva velmi přísné. Předpokládalo se, že když u stěny se třemi vrstvami odhoří první svíslá vrstva, druhá vodorovná vrstva nijak únosnosti nepomáhá, a proto by se nadále měla uvažovat jenom třetí svíslá vrstva. Testy ale ukázaly, že to není v žádném případě pravda.

V této kapitole je popsána metoda, kdy se příčná vrstva nezapočítává, méně konzervativní metoda nebyla ještě vyvinuta.

#### 3.5.1 Výpočet únosnosti konstrukčního prvku z CLT při požáru

Pro výpočet únosnosti konstrukčního prvku z CLT při požáru se dá použít metoda redukovaného průřezu, která se používá i pro ostatní dřevěné prvky při požáru. Podle (3) jsou potřeba začlenit do této metody jisté modifikace oproti metodě uvedené v ČSN EN 1995-1-2.

- **Metoda redukovaného průřezu**

Při použití této metody se redukuje konstrukční prvek o účinnou hloubku zuhelnatění  $d_{ef}$ . Do únosnosti se už nezapočítá zuhelnatěná část průřezu  $d_{char,n}$  a také prohřátá vrstva, které se říká „vrstva nulové pevnosti“  $d_0$ .

$$d_{ef} = d_{char,0} + k_0 d_0 \quad 41$$

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad 42$$

kde:

$\beta_0$  – míra zuhelnatění při jednosměrném vystavení požáru

$d_0$  – tloušťka vrstvy nulové pevnosti

Podle ČSN EN 1995-1-2 se tloušťka vrstvy  $d_0$  postupně zvětšuje a po 20 minutách se ustálí na tloušťce 7 mm (6).

Pro CLT by se podle (3) tloušťka vrstvy nulové pevnosti měla brát 10 mm, když je zahřátá část tažená (stropní panely) a 16 mm, když je zahřátá část tlačená (stěnové panely).

Podle (3) platí, že jakmile  $d_{ef}$  zasahuje do příčných vrstev, celá příčná vrstva se nezapočítává. Průřezové charakteristiky se pak dají vypočítat podle metod uvedených v kapitole 2.4.

### 3.5.2 Rychlost zuhelnatění CLT

Rychlost zuhelnatění  $\beta_0$  pro CLT je podle testů rovna 0,67 mm za minutu. Při testování panely prokázaly za 2 hodiny ztrátu 80 mm tloušťky panelu (1). Pro lepené lamelové dřevo měkké a tvrdé dřevo ( $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$ ) je  $\beta_0$  rovna 0,7 mm za minutu (5).

### 3.5.3 Příklady z realizace

V Graphite Apartments (Londýn) 35 % váhy křížem vrstveného dřeva slouží jenom jako požární ochrana. Pro dosažení požární odolnosti 120 minut byly stěny obloženy sádkartonovými deskami (požadovaná tloušťka panelu by byla cenově nevýhodná (1). Při návrhu budovy Forté (Melbourne) byl pro dosažení požární odolnosti 120 minut použit speciální CLT panel, který se skládá ze dvou CLT panelů a ze vzduchové dutiny mezi panely (1).

## 3.6 Požární bezpečnost

Dřevo patří mezi hořlavé materiály. V Evropské Unii platí soubor společných norem (eurokód) pro všechny členské státy. Tyto normy popisují, jak navrhovat a používat dané materiály a konstrukce. Každý stát si pak už sám reguluje požadavky na konstrukce. Mezi toto patří i požadavky na požární bezpečnost staveb. Tato kapitola popisuje, jak se požární bezpečnost dřevěných staveb řeší v různých státech v Evropě.

V České Republice řeší požární bezpečnost norma ČSN 730802. Podle této normy je možné postavit stavbu z hořlavých konstrukčních systémů do 12 m požární výšky (při výšce 3 m na jedno patro až 5ti podlažní objekt) za předpokladu, že bude dodrženo příslušné výpočtové požární zatížení, budou použity prvky aktivní požární ochrany (14).

### 3.6.1 Rakousko

- **Základní požadavky**

Ve směrnicih OIB Directive 2 (příručka pro návrh), ve spojení se směrnici Directive 2.1, 2.2 a 2.3, Rakouský Institut pro pozemní stavitelství (OIB) vypracoval požadavky na požární ochranu jako základ pro harmonizaci. V současné době spolkové země

Burgenland, Carinthia, Dolní Rakousko, Horní Rakousko, Tyrolsko, Vorarlbersko a Vídeň zahrnuly tyto požadavky do svých příslušných zemských stavebních předpisů. V zásadě OIB Directive umožňuje až čtyřpodlažní dřevěnou konstrukci, obecně s minimální požární odolností 60 minut (R 60) všech elementů. Konstrukce, které rozdělují požární úseky, musí mít minimálně R 90, konstrukce v nejvyšším patře musí mít minimálně R 30.

- **Požární úseky**

Pro efektivní omezení požáru a kouře v konstrukci, směrnice OIB Directive 2 definuje maximální plochu požárního úseku jako 1200 m<sup>2</sup> pro obytnou plochu a 1600 m<sup>2</sup> pro komerční účely pro nadzemní podlaží, při maximální šířce požárního úseku 60 m. Požární úseky nesmí zasahovat přes více jak 4 patra. Až do budov třídy 4 (maximální úroveň úniku 11 m, maximálně 4 nadzemní podlaží), prvky oddělující požární úseky mohou být ze dřeva s požární odolností 90 minut (R 90).

Otvory v obvodových stěnách, které jsou připojeny ke stěnám oddělující požární úseky, musí být minimálně 0,5 m od osy stěn požárních úseků. Jestliže není použito srovnatelné opatření proti šíření požáru, otvory ve střeše (střešní okna a vikýře u šikmých střech) musí být vzdáleny minimálně 1 m (vodorovná vzdálenost) od osy stěny oddělující požární úseky.

Jestliže není použito srovnatelné opatření proti šíření požáru, stěny oddělující požární úseky musí přesahovat nejméně 15 cm nad střechu.

Pro stropní konstrukce, které oddělují požární úseky, musí být proveden pruh výšky minimálně 1,2 m na obvodové stěně s požární odolností EI 90 nebo musí být stropní konstrukce prodloužena prvkem minimálně o 0,8 m s požární odolností EI 90.

- **Vyjímky**

V některých případech může dojít k odchýlení od požadavků zveřejněných v OIB směrnících. Jestliže je dané řešení ověřeno pomocí koncepce požární odolnosti, která ukazuje splnění všech cílů ochrany na stejné úrovni, jaká je uvedena v OIB Directive, lze ho použít. Koncepce požární odolnosti musí být vypracována podle OIB příručky. Je doporučeno v předstihu objasnit kompenzační opatření příslušnému orgánu. Koncepce požární ochrany může být vypracována pouze specialisty s odbornými znalostmi a zkušenostmi s požární ochranou. Kompenzační opatření můžou zahrnout zmenšení

požárního úseku, konstrukční opatření (např. zapouzdření dřevěných konstrukcí) a další ochranná opatření (systém detekce požáru, hasicí zařízení).

- **Blízká budoucnost**

Zrevidované směrnice Directive byly publikovány na začátku dubna 2015. Cílem této revize bylo snížit náklady na stavbu rezidenčních budov a zredukovat určitou diskriminaci některých stavebních materiálů. Je předpokládáno, že změnou směrnice byl navýšen počet podlaží v dřevěné konstrukci na 6 podlaží a byl zvětšen požární úsek pro rezidenční budovy.

- **Výzkum**

Výzkumné projekty v Rakousku se soustředily na několik oblastí týkajících se požární bezpečnosti dřevěných konstrukcí. Mezi tyto oblasti patřilo vyšetřování požární bezpečnosti výškových budov ze dřeva, technické řešení pro hybridní konstrukce, řešení fasád, průniků, studie proveditelnosti a demonstrační provedení staveb. Výsledky výzkumu jsou shrnuty ve dvou technických příručkách, které jsou zveřejněny v Holzforschung Austria (18) (19).

Někteří developpeři plánují výstavbu výškových rezidenčních budov ve Vídni. Jedna výšková budova by měla mít 24 pater s maximální výškou 84 m. Tato budova je zatím navržena jako hybridní konstrukce, kombinace dřeva s železobetonem. Budova by měla být postavena do roku 2018 (20).

### 3.6.2 Německo

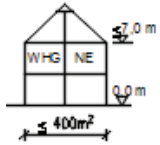
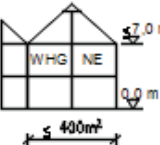
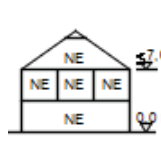
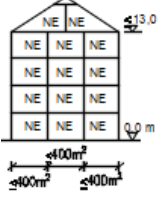
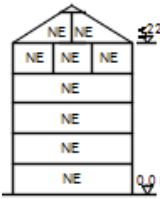
- **Základní požadavky**

Použití přírodních materiálů, jako je dřevo, sláma, ovčí vlna nebo rákos má v Německu dlouho tradici. Tyto materiály byly používány pro konstrukční prvky, izolace nebo zastřešení po staletí, ale byly nahrazeny průmyslově vyráběnými a na minerální bázi založenými materiály. V porovnání se zeměmi v Severní Evropě je v Německu použití přírodních materiálů celkem nízké. V průměru je v Německu pouze 15 % ze všech obytných budov a 20 % administrativních budov postaveno ze dřeva, pro vícepodlažní stavby je to méně než 1%. Takto malý počet dřevěných staveb je způsoben mnoha existujícími předsudky a znepokojením stavebních orgánů, společně s omezením ve stavebních normách a předpisech pro použití přírodních materiálů, z většiny týkajících se požární bezpečnosti.

Německo je federální země skládající se z 16 států, které si udržují omezenou suverenitu. Každý stát řeší stavební předpisy pro dané území, proto nejsou jednotné. Pro harmonizaci požadavků je dána modelová stavební norma sestavená na konferenci všech ministrů zastřešujících stavebnictví, která slouží jako průvodní dokument. Samotné stavební regulace jednotlivých států se významně liší.

Existující modelová stavební norma (MBO), která byla představena v roce 2002, uvažuje 5 tříd rezidenčních, administrativních budov a budov pro speciální účely (montážní budovy, nemocnice, hotely, průmyslové budovy, sklady aj.), norma také definuje požadavky na požární bezpečnost pro dané třídy. Tyto požadavky jsou na bázi nařízení a jsou rozšířena o informace týkající se obecných požadavků na požární bezpečnost a také pro povolení pokročilého konstruování návrhem založeným na užitných vlastnostech. Souhrn požadavků pro stavební prvky a materiály uvedené v modelové stavební normě zaměřené na přírodní stavební prvky je ukázán v následující tabulce (Tabulka 14).

Tabulka 14 - Požadavky na požární bezpečnost v Německu

Třída/ požadavky	1	2	3	4	5
					
Hrana podlahy nejvyššího patra	≤ 7 m	≤ 7 m	≤ 7 m	≤ 13 m	≤ 22 m
Celková plocha	≤ 400 m <sup>2</sup>	≤ 400 m <sup>2</sup>	-	-	-
Maximální velikost bytové jednotky	-	-	-	≤ 400 m <sup>2</sup>	-
Maximální počet bytových jednotek	≤ 2	≤ 2	-	-	-
Záchranné vybavení pro hasiče	Skládací žebřík			Otočný žebřík na hasícím autě	

Nosné prvky	-	R 30	R 30	R 60/K <sub>2</sub> 60 <sup>a</sup>	R 90 <sup>b</sup>
Oddělovací prvky	-	EI 30	EI 30	EI 60/ K <sub>2</sub> 60 <sup>a,d</sup>	EI 90 <sup>b</sup>
Stěny okolo schodiště	-	-	EI 30	EI 60 M/K <sub>2</sub> 60 <sup>a</sup>	REI 90 M <sup>b</sup>
Požární stěny	-	REI 60/K <sub>2</sub> 60 <sup>a</sup> nebo REI 90 <sub>0→1</sub> /REI 30 <sub>1→0</sub>		REI 60 M/K <sub>2</sub> /60 <sup>a</sup>	REI 90 M <sup>b</sup>
Obvodové stěny (nenosné)	-	-	-	Nehořlavý materiál nebo EI30	
Fasáda	-	-	-	Obtížně hořlavý materiál <sup>c</sup>	
Úniková cesta	EI 30 + nehořlavé obložení				

<sup>a</sup> – uzavřít nehořlavým opláštěním

<sup>b</sup> – nehořlavý materiál

<sup>c</sup> – podle klasifikace normy DIN 4102-1 a E DIN 4102-20

<sup>d</sup> – nehořlavá izolace dutin

Jak je vidět v předchozí tabulce (Tabulka 14), použití konstrukčního dřeva je omezeno, dřevo je možné použít pouze v budově do 4 podlaží bez speciálního povolení stavební dozоровé kanceláře. Díky nehořlavému opláštění (K<sub>2</sub>60) ve třídě 4 se tyto budovy chovají v požadované době stejně jako konstrukce z materiálu na minerální bázi. Pro budovy s hranou podlahy nejvyššího patra výše než 13 m (do 5 podlaží), nosná konstrukce musí být z nehořlavých stavebních materiálů.

Navíc regulace a příručky, týkající se budov pro speciální účely, obsahují další omezení pro použití produktů a prvků z materiálů na přírodní bázi.

Nicméně v jednotlivých případech je možné obdržet schválení pro budovu, která se odlišuje od předepsaných požadavků, skrz návrh založený na užitných vlastnostech. Povolení je možné obdržet pouze v případě, že míra bezpečnosti je dosažena použitím jiných opatření, jako je návrh sprinklerů nebo přidáním další únikové cesty.

Je potřeba zmínit skutečnost, že návrh založený na užitných vlastnostech vyžaduje vysokou úroveň vzdělanosti společně se znalostmi chování materiálů na bázi přírodních látek při požáru. Požadované znalosti bohužel nejsou v současnosti v Německou plně poskytovány.

- **Výzkum**

Pro vyplnění těchto mezer byly provedeny (nebo se stále provádějí) následující výzkumné projekty:

- Optimalizace výstavby a výrobního procesu budovy třídy 4 z dřevěných rámových prvků (2012-2013) (21)

Doporučení pro optimalizaci návrhu dřevěných rámových konstrukcí a jejich prvků s požární odolností REI 60/K<sub>2</sub>60 jsou výstupem tohoto výzkumu. Navíc byl zkoumán vliv spojovacích prostředků na rané zapálení obložených dřevěných nosných prvků a vliv montážního systému na selhání obložení.

- Zkušební zařízení pro zkoumání doutnání / doutnající hoření izolačních materiálů (2012-2014) (22)

Metody testování byly hodnoceny pro rozlišení materiálů v jejich vyrobitelnosti, nezávislosti na druhu materiálu a objektivnosti podle jejich doutnání. Byly identifikovány a definovány jejich reakce při zahájení doutnání.

- Chování při požáru velkoformátových střešních konstrukcí ze dřeva (2012-2014) (23)

Prvky, detaily a penetrační systémy pro dřevěné rámové střešní konstrukce z přírodních materiálů s minerální izolací byly vyvinuty tak, aby se zabránilo šíření plamene na střeše a znemožnilo se žhavé spalování uvnitř dřevěných rámových konstrukcí v průmyslových budovách. Přirozené požární testy s hranicemi dřeva podle DIN 18234 byly provedeny.

- Katalog detailů pro více podlažní budovy ze dřeva (2012-2014) (23)

Byl vytvořen katalog prvků a detailů byl. Tento katalog obsahuje právně a technicky bezchybné, bez problému použitelné dřevěné prvky a související konstrukční detaily s požární klasifikací REI 60/K<sub>2</sub>60. Tato řešení rozšiřují existující modelovou příručku s ochrannými požárními požadavky pro vícepodlažní budovy ze dřeva.



- Spoj primárního a sekundárního nosníku v dřevěných konstrukcích při požáru a jeho chování (2013-2015) (23)

Chování při požáru a nosnost spojů se zavěšenými trámy (spojení pomocí párových zkřížených celozávitových šroubů) bylo zkoumáno při trvání požáru 30 a 60 minut. Z testů byla následně odvozena doporučení pro návrh, tak aby bylo dosaženo klasifikace požární bezpečnosti. Navíc bylo vytvořeno obecné hodnocení metod pro celozávitové šrouby s přepracováním Eurokódu 1995-1-2.

- Požární bezpečnost budov se styčnickovými deskami (2013-2015) (23)

Byla vytvořena příručka pro preventivní a ochranná požární opatření pro střešní konstrukce se styčnickovými deskami.

- Standardizovaný koncept požární bezpečnosti pro vícepodlažní dřevěné budovy, které nedosahují výšky vysokopodlažních budov (2013-2016) (23)

Tento výzkum stále probíhá. Jeho primárním cílem je vývoj alternativních řešení a náhradních metod pro vytvoření přijatelného standardizovaného řešení požární bezpečnosti pro vícepodlažní budovy.

- Kapacita požární ochrany izolačních materiálů na přírodní bázi pro dřevěné rámové konstrukce (2015-2017) (23)

Tento výzkum stále probíhá. Výzkum se soustředí na posouzení kapacity požární ochrany izolačních materiálů na přírodní bázi, jako jsou například dřevěná a celulózová vlákna, dřevěné obložení. Výsledkem bude poskytnutí informací pro rozšíření normativních výpočtových metod podle Eurokódu 1995-1-2 pro separaci a nosnou funkci dřevěných rámových konstrukcí.

### 3.6.3 Švédsko

- **Začátek v devadesátých letech**

Vícepodlažní budovy ze dřeva byly ve Švédsku poprvé představeny v roce 1994, kdy byl přijat nový národní předpis založený na návrhu na užité vlastnosti konstrukce. Do té doby byly více jak dvoupodlažní budovy ve Švédsku zakázány, tento zákaz trval více než 100 let. Vývoj daného předpisu byl urychlen přijetím Evropské Směrnice o stavebních výrobcích (CPD – European Construction Products Directive, nyní CPR –

Construction Products Regulative) v roce 1988. Požadavky pro návrh založený na užitných vlastnostech jsou zvlášt vytvořeny pro tradiční nařízení týkající se požáru. Konstrukční pravidla ohledně hořlavých produktů byly shromážděny ve švédské příručce Brandsäkra Trähus, která definuje standard kvality pro mnoho stavebních projektů. V současnosti byla publikovaná verze 3. Evropská příručka Požární bezpečnost ve dřevěných budovách (24) založená na evropském projektu „Požár ve dřevu“ (Fire in Timber) byla také vydaná.

- **Nové možnosti v navrhování**

Bylo vyvinuto mnoho nových možností pro pokročilejší návrhy dřevěných konstrukcí. Nyní jsou k dispozici modely pro nosné a nenosné konstrukce. Správné řešení detailů v konstrukci je velmi důležité.

V roce 2012 vstoupily v platnost nové švédské předpisy požární bezpečnosti s nejobsáhlejšími změnami od devadesátých let 20. století. Hlavním cílem této změny bylo vytvořit požadavky na požární bezpečnost, které by definovaly správnou výkonnostní úroveň s jasnými účely (25).

- **Struktura stavebních předpisů**

Struktura švédských stavebních předpisů je vytvořena pomocí použití tří prvků rozdílných úrovní. Na nejvyšší úrovni je to parlament a vláda, kteří specifikují povinné funkční požadavky, pod ní je národní rada pro bydlení, budovy a plánování, která specifikuje závazná ustanovení a přijatelnou úroveň bezpečnosti/užitných vlastností, na nejnižší úrovni jsou příručky pro návrh od třetích stran. Návrh založený na užitných vlastnostech (PBD - performance based design) musí být aplikován všude tam, kde se vyskytnou odchylky od definovaných přijatelných řešení. PBD může být použit a zpracován dvěma způsoby, za prvé jako analytický návrh podle předepsaných nařízení nebo za druhé jako 100% analytický návrh.

PBD by měl obsahovat následující kroky.

- Nosné konstrukce

Dřevěné vícepodlažní budovy mají typickou výšku do 8 podlaží. Zatímco jednotlivé domy (1 až 2 podlaží) musí dosáhnout požární odolnosti R30, budovy do 4 podlaží musí dosáhnout požární odolnosti R60 a 5 až 8 podlažní budovy musí dosáhnout požární odolnosti R60 pro vodorovné a R90 pro svislé nosné prvky. Budovy, které mají více jak

16 pater musí být navrženy analyticky, tento návrh může obsahovat sprinklery. Byla vydána Severská technická specifikace (Nordic Technical Specification) pro ověření návrhu na požární bezpečnost.

- **Řešené problémy**

- Detaily

Správné vyřešení detailů je základní předpoklad pro návrh budovy, který neohrožuje pasivní ochranu konstrukčních prvků proti požáru. Zvláštní pozornost musí být věnována požárním zábranám, střešním ventilacím (typické švédské domy mají větranou atiku), požární oddělení v atice (nepovinné pro budovy < 400 m<sup>2</sup>). Nejdůležitější je pravděpodobně použití požárních zábran pro vyhnutí se plíživým požárům v konstrukci. Tento typ požáru se objevil v mnoha starších dřevěných budovách a v současnosti i v moderních, modulových typech dřevěných vícepodlažních dřevěných budov.

- Dřevěné fasády

Ve Švédsku, stejně jako v dalších státech, existují omezení pro použití dřeva jako venkovní obklad na fasádu. Tato omezení jsou zavedena hlavně kvůli nebezpečí vzestupného šíření plamene, proto je požadován ověřovací test v plném měřítku (SP Fire 105). Jestliže dřevo ošetřené zpomalovací hoření splní test, potom je požadovaný doplňkový dlouhodobý test úžitných vlastností. Vícepodlažní budovy (více než 2 podlaží) se dřevěnou fasádou, bez ohledu na konstrukci, většinou vyžadují sprinklery uvnitř budovy, aby se zabránilo nebezpečí svislého šíření plamene.

- Izolace a obložení z hořlavých materiálů

Hořlavé izolační materiály se stávají čím dál více populární. Nicméně nedávno navržené omezení amonné soli v celé Evropě kvůli snížení doutnání znamená velkou výzvu pro budoucnost těchto izolačních produktů. Ve švédských stavebních předpisech musí být materiály s Evropskou třídou nižší než D-s2 chráněny tak, aby dosáhly alespoň této třídy. Materiál, který je třeba chránit, je například hořlavá izolace. V závislosti na třídě budovy by obložení mělo splnit požadavky K<sub>2</sub>10/B-s1. To znamená, že neošetřený dřevěný povrch má omezené použití ve vyšších a větších budovách, jestliže nejsou instalovány sprinklery.

### 3.6.4 Finsko

Požární předpisy jsou založeny na funkčních (základních) požadavcích požární bezpečnosti ve vztahu k nosným prvkům, vzniku a rozšíření požáru a kouře, bezpečnosti obyvatel a záchraných týmů. Požadavky uvedené v předpisech jsou povinné a nemohou být zpochybněny bez schválení místního stavebního úřadu.

- **Požární předpisy**

Existují dva způsoby, kterými je možné ověřit dodržení požadavků na požární bezpečnost:

- Požadavky na požární bezpečnost jsou považované za vyhovující, když je budova navržena a postavena v souladu s požární třídou a numerickým kritériem specifikovaným v předpisech a příručkách.
- Požadavky na požární bezpečnost jsou považovány za vyhovující, jestliže je budova navržena a postavena v souladu s požárními scénáři, které musí pokrýt podmínky, jenž by mohly nastat v dané budově. Splnění požadavků se řeší případ od případu a bere v úvahu vlastnosti a účel budovy.

Funkční principy regulací nelimitují použití konkrétních stavebních materiálů, ani materiálů na přírodní bázi. Nicméně regulace založené na užitných vlastnostech týkající se nosnosti uvádějí, že když je návrh nosných konstrukcí založený na požárním konceptu, budova je považována za dostatečně požárně bezpečnou, když splňuje následující body:

- Budovy o více než dvou podlaží se obecně nezhroutí během požáru nebo chladnutí.
- Budovy o maximálně 2 podlažích se nezhroutí během času potřebného k zajištění evakuace, záchranné akce a k ovládnutí požáru.

V části předpisů, které jsou považovány za vyhovující, tyto požadavky odpovídají například následujícím požadavkům:

- Použití nosných prvků, které nesplňují minimální třídu A2-s1 je dovoleno maximálně v 8 podlažní budově s použitím sprinklerů, nebo ve 2 podlažní budově bez použití sprinklerů.

Podle hrubého návrhu (deemed to satisfy) povrch vnitřních stěn a stropu může být z produktů, které splňují třídu D-2s, d2 (jako jsou produkty na bázi dřeva) v následujících budovách nebo jejich částích:

- Byty a kanceláře (kromě východů), montážní a obchodní prostory s požárním zatížením menším než 600 MJ/m<sup>2</sup> a plochu menší než 300 m<sup>2</sup>

Podlahy třídy D<sub>FL</sub>- s<sub>1</sub> (dřevo) mohou být použity skoro ve všech typech budov nebo jejich částí.

Vnější použití produktů, které splňují požární třídu D-s2, d2 jsou považována za vyhovující v následujících případech:

- Rezidenční a administrativní budovy do 8 podlaží při použití sprinklerů, nebo do 2 až 4 podlaží bez použití sprinklerů, v závislosti na třídě dané budovy

- **Výzkum a vývoj**

Hlavní zainteresované strany ve vývoji a výzkumu chování za požáru a požární bezpečnosti jsou následující subjekty:

- VTT Technické výzkumné centrum Finska Ltd (Research Centre of Finland), které reprezentuje státní neziskovou výzkumnou organizaci
- Aalto University a Tampere University of Technology, které reprezentují vysoké školy
- KK-Palokonsultti OY a Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy reprezentuje soukromý sektor a praktickou aplikaci inženýrství požární bezpečnosti

Dále jsou uvedeny některé příklady současných výzkumných projektů ve Finsku:

- Požární bezpečnost ve dřevěných budovách – Technická příručka pro Evropu (26)
- Rozvoj zázemí pro revizi finských požárních předpisů (27)
- Požární bezpečnost dřevěných balkónů, fasád a říms (28)
- Návod pro návrh založený na užitných vlastnostech (performance based design) dřevěných vícepodlažních budov ze dřeva se připravuje

- **Dřevěné konstrukce ve Finsku**

Inženýrství požární bezpečnosti se pravidelně využívá pro návrh vícepodlažních budov z dřevěných rámových konstrukcí. Hlavními důvody jsou, že skoro vždy se některé detaily liší od předepsaných pravidel nebo koncept přesahuje limity specifikované požárními třídami nebo numerickými analýzami.

Ve Finsku je dřevo jasná jednička na trhu pro jedno nebo dvoupodlažní budovy. Pro vícepodlažní budovy (> 2 podlaží) je podíl dřevěných budov na trhu pouze 5 % po poslední změně požárních předpisů. S ohledem na všechny nové budovy je 50 % všech fasád a 42 % nosných prvků v současnosti ze dřeva.

Hlavní výzvou budoucnosti pro širší použití dřeva a dalších přírodních materiálů je jejich přijetí také v jiných typech budov, než jsou obytné a administrativní budovy podle předepsaných pravidel. Nové produkty, které dosahují třídy reakce na oheň vyšší než D-s2, d2 a ukazují dlouhodobou trvanlivost ve venkovních podmínkách, jsou připraveny pro širší použití.

### 3.6.5 Švýcarsko

- **Předpisy požární bezpečnosti**

Prvního ledna 2015 se ve Švýcarsku změnilo předpisy požární bezpečnosti. Nové předpisy přinesly výrazné výhody v mnoha oblastech. Například nyní je možné použít konstrukční dřevo i pro výškové budovy při návrhu podle speciálních pravidel. Další změny zahrnují zjednodušení zatřídění budov (nizkopodlažní budova, vícepodlažní budova a výšková budova) a použití, které jasně přiděluje požadavky na požární bezpečnost. Předpisy požární bezpečnosti chrání osoby a majetek proti nebezpečí a vzniku požáru. Cílí na majitele a uživatele budov, zařízení a vybavení, plus na všechny osoby, které se zabývají plánováním, stavbou, obsluhou nebo údržbou daných prostor.

Dřevo jako konstrukční materiál může být použito ve všech kategoriích budov. Pokud jde o požadavky na požární bezpečnost, není žádný rozdíl mezi hořlavými a nehořlavými konstrukčními prvky. Konstrukční prvky ze dřeva nyní mohou mít větší požární odolnost než je R60 (60 minut). Obytné, administrativní budovy a školy, stejně jako průmyslové a komerční budovy mohou být navrženy jako dřevěné konstrukce až do výšky 30 m (nizkopodlažní a vícepodlažní budovy). Pro výškové budovy je použití dřevěné konstrukce možné za určitých podmínek (zapouzdření).

Pro požární návrh dřevěných budov publikoval Lignum (švýcarský dřevozpracující průmysl) rozsáhlou dokumentaci, která je považována požárními autoritami jako současný stav poznání. Tato dokumentace o požární bezpečnosti dřevěných budov reprezentuje důležitý nástroj plánování, návrh, provedení projektů pro architekty, inženýry, požární autority a dodavatele.

Požární návrh konstrukčních prvků ze dřeva může být proveden podle následujících možností:

- Použití produktů nebo dílů, které jsou dány v registru švýcarské požární bezpečnosti (Swiss Fire Safety Register)
- Použití standardizovaných komponentů, například podle Lignum dokumentace požární bezpečnosti, publikace 4.1, komponenty ze dřeva – desky, stěny a obložení s požární odolností
- Ověření pomocí výpočtů použitím uznaných výpočtových metod, například podle Lignum dokumentace požární bezpečnosti, publikace 3.1, „požární návrh konstrukčních prvků a spojů“

Stupeň zaručení kvality požární bezpečnosti je definován pro každou budovu v jednom ze čtyř stupňů kvality, které definují odpovídající požadavky a odpovědnost osob zapojených v procesu. Dřevěné budovy, které jsou přiděleny do kategorie nízkopodlažních budov, patří do systému zaručení kvality 1 (QSS 1), budovy z kategorie vícepodlažních budov patří do systému zaručení kvality 2 (QSS 2). Dřevěné budovy z QSS 2 požadují účast experta, který je zodpovědný za zaručení kvality návrhu požární bezpečnosti.

- **Výzkum**

Chování dřevěných konstrukcí při požáru jsou zkoumány ve Švýcarsku hlavně v Institutu pozemního stavitelství (IBK) na ETH Zurich. Hotové a právě probíhající výzkumné projekty jsou ukázány v tabulce (Tabulka 15).

Tabulka 15 - Výzkumné projekty v Švýcarsku

Výzkumný projekt	Typ zkoušky	Doba trvání požární zkoušky
Požární odolnost kompozitní desky dřevo – beton (29)	Ve velkém měřítku, ISO požár	60 až 90 minut
Požární odolnost dřevěných desek tvořených dutými prvky (30)	Ve velkém měřítku, ISO požár	60 až 105 minut
Požární odolnost stěnové sestavy lehkého dřevěného skeletu (31)	Ve velkém měřítku, ISO požár	60 minut
Požární odolnost stěn z dřevěných bloků (32)	Ve velkém měřítku, ISO požár	30 až 90 minut
Požární odolnost panelů z křížem vrstveného dřeva (33)	Ve velkém měřítku, ISO požár	30 až 70 minut
Požární odolnost mnohonásobných smykových spojení ocel – dřevo (34)	Ve velkém měřítku, ISO požár	30 až 70 minut
Požární odolnost smykového spoje nosník – sloup (35)	Ve velkém měřítku, ISO požár	30 až 80 minut
Požární odolnost lepených dřevěných konstrukčních prvků (36) (37)	Ve velkém měřítku, ISO požár	20 až 70 minut
Chování za požáru hotelů z dřevěných modulových jednotek (38)	Ve skutečné velikosti, přírodní požární podmínky	4 minuty až do vyhoření

Nové výpočetní modely pro dřevěné desky, stěny a spojení byly vytvořeny na základě zásadní experimentální a numerické analýzy. Tyto studie povolily revizi švýcarských požárních předpisů, které nyní dovolují rezidenční dřevěné budovy až do výšky 6 podlaží. Tato změna výrazně zvýšila počet dřevěných budov. Institut pozemního stavitelství v ETH Zurich má rozsáhlé zkušenosti v provádění experimentů zahrnujících komplexní požární zkoušky zatížených konstrukčních prvků, částí a spojů. Požární zkoušky konstrukčních prvků malého měřítka, středního měřítka nebo skutečné velikosti jsou většinou zkoušeny v Požární laboratoři ve švýcarských federálních laboratořích pro vědu o materiálech a techniku (Empa) v Dubendorfu, který se nachází kousek od Zurichu. Požární laboratoř má 3 rozdílné pece:

- Velká vodorovná pec s otvorem zhruba 3 x 5 m
- Vodorovná pec pro zmenšené modely s otvorem zhruba 1 x 0,8 m
- Velká svislá pec s otvorem zhruba 3 x 3 m



- **Budoucí výzvy**

Budoucí výzvy pro požární odolnost dřevěných konstrukcí ve Švýcarsku jsou indikovány ve zprávě pro Národní institut pro normy a techniku od Buchanana a dalších (39).

Ačkoli v minulých letech bylo získáno mnoho důležitých poznatků o konstrukčním chování dřevěných prvků, stále zbývá několik mezer ve znalostech. Tyto mezery jsou například v následujících oblastech:

- Data pro skutečné požáry: K dispozici je nedostatek statistických informací o chování požáru reálných dřevěných budov. Tyto informace chybí ve většině zemí. Aby se mohly vyvinout pravděpodobnostní návrhové metody, je nutné mít k dispozici data o počtu a závažnosti požárů, efektivitě automatických a ručních hasicích prostředků.
- Experimenty na konstrukcích skutečné velikosti: Pro zjištění informací o požární závažnosti je potřeba více testů na konstrukcích skutečné velikosti. Kvůli zvyšujícímu se trendu vícepodlažních dřevěných budov je důležité opatrně adresovat vliv hořlavých materiálů na požární závažnost, zejména když v konstrukci není žádné zapouzdření ani sprinklery.
- Experimenty v malém měřítku: Více experimentů na zmenšených modelech je potřeba pro ohodnocení míry zuhelnatění různých typů dřeva a dřevěných výrobků při přírodních podmínkách pro požár, pro ohodnocení samohasících vlastností různých typů dřeva a dřevěných vlastností při různých stupních vystavení požáru, pro ohodnocení různých typů požárních zárážek, pro ohodnocení chování různých typů spojů atd.
- Modelování: Existující požární modely musí být rozšířeny tak, aby mohly zahrnout změny ve ventilačních podmínkách při rozvoji požáru a přesunu požáru ve velkých prostorech. Kvůli dřevěným konstrukcím musí být do modelů zahrnut přínos hořlavých materiálů. Jednoduché tepelné modely mohou být použity pro návrh velkých dřevěných konstrukcí, pokud je známa rychlost zuhelnatění dřeva pro různé teploty požáru. Rychlost zuhelnatění dřeva je dobře známa u vystavení dřeva standardnímu požáru, ale je nutné znát změny

v rychlosti zuhelnatění u vystavení dřeva více reálnějšímu požáru. Více výzkumu, který zahrnuje i experimenty ve velkém měřítku, je požadováno pro zjištění rychlosti zuhelnatění potřebné pro jednoduché výpočtové modely aplikované na více realistické požáry. Pokročilé tepelné modelování může být provedeno použitím metody konečných prvků (FEM). Tyto pokročilé metody jsou důležité pro vývoj jednoduchých modelů zuhelnatění, ale nejsou obvykle požadovány pro návrh. Hlavním problémem pro vývoj pokročilejších tepelných výpočtových modelů je získání přesných časově závislých a teplotně závislých tepelných vlastností materiálů. Kompletní požární modelování konstrukce pomocí FEM požaduje spojení tepelné a mechanické analýzy. Tato analýza je velmi složitě dosažitelná kvůli velkému počtu neznámých vstupních hodnot. Pro standardní vystavení ISO požáru bylo dosaženo obrovské zlepšení (40). Nicméně stále mnoho věcí musí být zjištěno pro získání přesných vstupních hodnot tak, aby chování dřevěné konstrukce vystavené skutečnému požáru mohlo být předpovězeno pravdivě.

- Návrh na užitné vlastnosti konstrukce: Mezinárodní dohoda je potřeba pro celkovou koncepci návrhu na užitné vlastnosti pro požární bezpečnost (a požární odolnost), konzistentní pro všechny materiály. Měla by být založena na požárním návrhu pro různé typy a velikosti budov a osazenstva. Toto musí být zahrnuto pro vývoj pravděpodobnostních nebo semi-pravděpodobnostních návrhových metod pro požární bezpečnost, tak aby byl povzbuzen návrh budov, který splňuje cíle pro pravděpodobnost kolapsu konstrukce specifikovanou v moderních normách.

### **3.6.6 Velká Británie**

Dřevěné konstrukce a použití materiálů na přírodní bázi zažívá ve Velké Británii něco jako renesanci. Použití lehkého dřevěného skeletu a masivních dřevěných konstrukcí pro vícepodlažní budovy se znásobilo v posledních letech hlavně kvůli změnám v předpisech a výsledcích výzkumných projektů financovaných vládou a dřevařským průmyslem. Mezi další důvody patří i udržitelnost a snaha snížení emisí oxidu uhličitého spolu s ekonomickými výhodami a snahou o podporu výstavby částečně mimo staveniště.

- **Historický kontext**

Velký londýnský požár v roce 1666 vedl k přísným stavebním předpisům ve Velké Británii, které vážně omezily široké použití dřeva jako konstrukčního materiálu. Odstranění „stavebního zákona“ (Building Act) posunulo Velkou Británii směrem k funkčním předpisům, teoreticky povolilo budovy ze dřeva, i když jenom nízkopodlažní budovy (maximálně 4 podlaží).

- **Změny v předpisech**

Současné změny ve stavebních předpisech (41) ve Velké Británii kombinované z vysoce profilovými výzkumnými projekty (42) vedly okolo přelomu tisíciletí k uvolnění, které znovu podpořilo použití lehkých a těžkých skeletových i dřevěných konstrukcí z rostlého dřeva pro vícepodlažní dřevěné konstrukce. Toto vedlo ke dvěma výzvám, které jsou v současnosti často citovány v bristkém stavebním průmyslu:

- Zvýšení koncentrace vysokopodlažních rezidenčních budov v městských centrech
- Rostoucí trend budov z dřevěných skeletových konstrukcí, lepených lamelových prvků a prvků z křížem vrstveného dřeva (CLT) (43)

Stavba budov v Anglii a Walesu je řízena stavebními předpisy (Building Regulation), které jsou podpořeny sadou „schválených dokumentů“ (Approved Documents). Tyto dokumenty nabízejí praktické příručky, jak vyhovět mnoha funkčním požadavkům a stanovují minimální požární odolnost po různé části budovy. Mají poskytnout vedení pro obvyklé konstrukční situace. Poskytují také vedení pro použití různých typů obkladů a obložení, které se můžou použít podle účelu budovy, výšky budovy atd. Nicméně alternativní způsoby k dosažení dodržení předpisů jsou povoleny a neexistuje žádná výslovná povinnost přijmout konkrétní řešení. Toto povzbuzuje inovace v návrhu a konstrukcích v porovnání s více nařizujícím systémem.

- **Požáry na staveništích a výsledné dodatečné výzkumy/příručky**

Navzdory vzkvétajícímu použití dřeva ve stavebním sektoru, z jistého pohledu již schválené dokumenty (Approved Documents) nedrží tempo s inovacemi ve stavebním sektoru (43). Je to ovlivněno počtem významných požárů u dřevěných rámových konstrukcí a konstrukcí z lepeného lamelového dřeva, ať už v hotových budovách nebo v budovách ve výstavbě. Tyto požáry vyústily ve značné úsilí ve výzkumu, které

zahrnuje i projekt TF2000 (42) v 90. letech 20. století a produkci celé řady pokynů pro dřevěné rámové konstrukce i masivní dřevěné konstrukce ve výstavbě (44), (45).

Avšak značné neshody zůstávají mezi stavebnictvím a pojišťovacím odvětvím ohledně rizik a výhod dřevěných konstrukcí různých typů, další výzkum je nutný pro podporu správného rozhodování.

- **Lepené lamelové dřevo, křížem vrstvené dřevo a hybridní budovy**

Křížem vrstvené dřevo (CLT), někdy ve spojení s lepeným lamelovým dřevem nebo s hybridními ocelovými či železobetonovými konstrukčními prvky, se rychle rozvíjí ve Velké Británii jako rychlejší, „zelenější“ alternativa ocelových nebo železobetonových rámových konstrukcí. Za poslední 2 roky se trh zvýšil o 300% (46) a výšky 9 až 10 podlaží jsou čím dál častější. Tento vývoj vedl k několika právě probíhajícím výzkumných projektům na chování konstrukčních systémů z CLT za požáru, jeden například probíhá v BRE Centru pro inženýrství požární bezpečnosti (BRE Centre for Fire Safety Engineering) na Univerzitě v Edinburghu.

- **Další problémy**

Existují i další materiály na přírodní bázi, u kterých lze pozorovat nárůst používání ve Velké Británii. U těchto materiálů byly vyjádřeny jisté obavy s ohledem na jejich chování při požáru. Mezi tyto materiály patří například následující materiály:

- Konstrukční izolační panely (SIPS)
- Konstrukce ze slámy
- Mechanicky vrstvené dřevo pomocí dřevěných kolíků
- Kompozitní panely z biopolymeru (například jako obklady)
- Izolace na přírodní bázi (například vlna)

### 3.6.7 Norsko

- **Stavební předpisy**

Poslední verze Norského územního a stavebního zákona byla vydána v roce 2010 ministerstvem místní samosprávy a regionálního rozvoje. Technické předpisy podle tohoto zákona jsou rozvíjeny a udržovány norskými stavebními autoritami (DiBK). Tyto technické předpisy, pojmenované TEK10, jsou založené na užitečných vlastnostech a popisují stupeň bezpečnosti, ale specifické požadavky poskytují jenom v omezené

míře. Pokyny k technickým předpisům (VTEK10) poskytují několik postupů, které splňují požadavky technických předpisů (TEK10). Konkrétní řešení, která jsou považována jako východiska a plní požadavky, mohou být nalezeny v mnoha uznaných zdrojích. Některé ze zdrojů jsou uvedeny v technických předpisech. Jedním ze zdrojů je například SINTEF Budovy a Infrastruktury, který publikoval sérii stavebně výzkumných příruček pro návrhování, které patří mezi jeden ze zdrojů takzvaných před dokumentačních řešení detailů (pre-documented detail solutions). Kapitola 11 v technických předpisech pokrývá bezpečnost v případě požáru a je, jako v mnoha dalších zemích, jedna z nejvíce obsáhlých kapitol předpisů.

Návrh požární bezpečnosti budov může být zdokumentován dvěma způsoby:

- Podle pokynů k technickým předpisům
- Analýzou a inženýrstvím požární bezpečnosti

Předpisy nejsou použitelné pro složitější budovy, je požadován návrh založený na analýze. Severské země mají dlouhou tradici spolupráce na předpisech požární bezpečnosti budov. Proto filozofie požárních předpisů v různých severských zemích je podobná, detaily a nařízení jsou v některých případech identické, v jiných případech se mohou lišit. Národní technické osvědčení může splňovat požadavky v jedné severské zemi, ale nemusí být platné v další zemi.

- **Výzkum požární bezpečnosti**

SP požární výzkum AS (bývalý SINTEF NBL – Norská požární laboratoř) v Tronheimu je hlavní institucí pro požární výzkum v Norsku. Tuto instituci vlastní ze 70% SP ve Švédsku a z 30% SINTEF v Norsku. V dubnu 2015 měl institut 35 zaměstnanců. Hlavní výzkumné aktivity jsou spojené s chováním různých materiálů a stavebních prvků při požáru, chování hasicích systému pro různé použití a široké spektrum dalších témat (od fyziky a matematiky k psychologii a ekonomice). SP požární výzkum AS často spolupracuje s partnery z jiných norských institucí, jako je Sintef, univerzity atd..

Některé příklady nedávných výzkumných projektů s významem pro FD1404:

- Požární bezpečnost stavebních výrobků z polymerů (2011-2014)
- Inženýrství požární bezpečnosti pro inovativní a udržitelné řešení budov (severský projekt vedený SP požárním výzkumem ve Švédsku, 2014-2017)
- EMRIS (podrobnosti jsou uvedeny níže, 2015-2017)
- Požární bezpečnost v energeticky úsporných a „zelených“ budovách (2015)

Vysoká škola StordHaugesund (HSH) vzdělává inženýry zaměřené na požární bezpečnost a do určité míry také provádí výzkum požární bezpečnosti. Projekt nazvaný EMRIS (Emerging Risks from Smouldering Fires – rozvíjející se rizika z doutnajících požárů) začal v lednu 2015 a bude trvat 3 roky.

SP požární výzkum AS je součástí projektu EMRIS a následující testy spolu s EMRIS budou provedeny dalšími norskými institucemi:

- Gexcon v Bergenu, který provádí výzkum a vývoj spojený s požárem a explozí související hlavně s ropným průmyslem
- PFI v Trondheimu (Paper and Fibre Research Institut – Výzkumný institut papíru a celulózy), který provádí výzkum na požární bezpečnost izolačních materiálů na bázi celulózy

SINTEF Budovy a Infrastruktura provádí výzkum budoucích technologií pro použití materiálů, návrhu požární bezpečnosti, architektury a stavební fyziky, adaptací na změny klimatu, energetické účinnosti a infrastruktury. SINTEF se soustředí na komunikační know-how pro stavební průmysl a společnost jako celek pomocí publikací v různých časopisech, veřejných zdrojů a stavebně výzkumných příruček pro navrhování. Výzkum se soustředí na správné a bezpečné použití materiálů a produktů v praxi a také na vývoj metod pro navrhování. Navíc, SINTEF vydává technické osvědčení pro produkty a konstrukční systémy podle norských stavebních předpisů TEK10.

Některé významné příklady:

- SmartTES – Inovace v dřevěných konstrukcích pro modernizaci obvodových plášťů (2010-2013) (47)
- SUSREF- Udržitelné rekonstrukce obvodových stěn a fasád (2009-2012) (48)

- **Budoucí výzvy**

Vícepodlažní dřevěné budovy – Jak dosáhneme dostatečné požární bezpečnosti pro tento typ budov v městských i příměstských oblastech? Jaká jsou správná kritéria/požadavky a opatření pro zabránění šíření požáru?

Energeticky úsporné budovy – Jak ovlivní požární bezpečnost nové materiály a konstrukční metody?

Hořlavé konstrukční a izolační materiály – Požárně bezpečné použití a správné testovací metody s vhodnými kritérii testů. Jaká ochrana těchto materiálů je považována za dostatečnou?

Hořlavý povrch materiálů: Jak ovlivňují vznik a rozšíření požáru? Jak je jimi ovlivněna požární odolnost?

Fasády: Jak ovlivňují různé typy fasádních obkladů a větrných bariér rozšíření požáru na fasádě? Opatření proti rozšíření požáru.

Hašení požáru: Jak ovlivňují materiály na přírodní bázi hašení požáru v porovnání s jinými materiály? Jaké metody se nejvíce hodí na hašení těchto materiálů?

### 3.7 Akustika

Existují dva typy přenosu zvuku. Prvním typem je přenos zvuku vzduchem. Veličina, která ho popisuje, se jmenuje vzduchová neprůzvučnost. Zvuková neprůzvučnost konstrukce  $R_w$  ukazuje rozdíl hladin zvuku mezi vysílací a přijímací místností.

Druhým typem přenosu je přenos konstrukcí. Kročejový zvuk vzniká chůzí po podlaze nebo nárazy na konstrukci. Popisuje ho kročejová neprůzvučnost  $L_{nw}$ . (49)

#### 3.7.1 Požadavky v České Republice

Požadavky na zvukovou izolaci pro obytnou budovu jsou uvedeny v ČSN 73 0532 (50).

##### 1) Vzduchová neprůzvučnost

Vzduchová neprůzvučnost mezi místnostmi je dostačující, pokud platí následující podmínka:

$$R'_w \geq R'_{w,pož} \quad 43$$

Mezi váženou stavební neprůzvučností a váženou laboratorní neprůzvučností platí následující vztah:

$$R'_w = R_w - k \quad 44$$

$k$  - korekce, závislá na vedlejších cestách šíření zvuku, pro složitější konstrukce se  $k$  určuje individuálně.

## 2) Kročejová neprůzvučnost

Kročejová neprůzvučnost mezi místnostmi je dostačující, pokud platí následující vztah:

$$L'_{nw} \leq L'_{nw, pož} \quad 45$$

Pro dané části budovy platí následující limitní hodnoty:

**Tabulka 16 - Limitní hodnoty pro akustiku**

Chráněný prostor (přijímací)				
Hlučný prostor (vysílací)	Požadavky na zvukovou izolaci			
	Stropy		Stěny	Dveře
	$R'_{w}, D_{nT,w}$ [dB]	$L'_{n,w}$ [dB]	$R'_{w}, D_{nT,w}$ [dB]	$R_w$ [dB]
Ostatní místnosti téhož bytu, pokud nejsou funkční součástí chráněného prostoru	47	63	42	27
Všechny místnosti druhých bytů, včetně příslušenství	53	55	53	-
Veřejně používané prostory domu (schodiště, vestibuly, chodby)	52	55	52	32

### 3.7.2 Akustické vlastnosti CLT

Konstrukce s větší objemovou hmotností mají většinou lepší akustické vlastnosti než lehčí konstrukce. Objemová vlastnost panelů z CLT se pohybuje kolem  $550 \text{ kg/m}^3$ , objemová hmotnost surového dřeva se může pohybovat mezi 470 (smrk) až  $690 \text{ kg/m}^3$  (dub) při vlhkosti 15 %. CLT panely mají lepší akustické vlastnosti než lehké dřevěné konstrukce.

V následující tabulce (Tabulka 17) jsou uvedeny zjištěné hodnoty vzduchové neprůzvučnosti  $R_w$  a kročejové neprůzvučnosti  $L_{nw}$  stropních a stěnových panelů o rozdílných tloušťkách.

**Tabulka 17 - Akustické vlastnosti CLT (3)**

Výsledky testů CLT		
Tloušťka	$R_w$	$L_{nw}$
[mm]	[dB]	[dB]
135 (5 vrstev)	$\leq 39$	$\leq 23$
146 (5 vrstev)	39	24
95 – 115 (3 vrstvy)	32 – 34	-



### 3.7.3 Vylepšení akustických vlastností

Sendvičové konstrukce prokazují lepší vzduchovou neprůzvučnost  $R_w$  než konstrukce masivní. Požadované hodnoty se dosáhne správným výběrem materiálů a skladbou konstrukce. Dalším důležitým faktorem je správné vyřešení detailů.

Větší problém je s kročejovou neprůzvučností, která více závisí na hmotnosti stropní konstrukce.

Podle (49) závisí správné řešení akustiky na následujících čtyřech parametrech:

- Vlastnosti jednotlivých vrstev
- Způsob spojení jednotlivých vrstev dohromady
- Provedení dutého prostoru mezi vrstvami
- Vrchní vrstva položená na nosné stropní konstrukci (platí pro kročejovou neprůzvučnost  $L_{nw}$ )

V následující tabulce (Tabulka 18) je ukázáno zlepšení akustických vlastností stropů při správném použití vrstev. Některé skladby jsou uvedeny bez konečné (pochozí vrstvy). V tabulce je vidět, jak se akustické vlastnosti mění přidáním podlahy, podhledu nebo obojího.

V další tabulce (Tabulka 19) je to samé ukázáno pro stěny.

**Tabulka 18 - Výsledky testů CLT stropních panelů s různými vrstvami (3)**

Vrstvy [-]	$R_w$ [dB]	$L_{nw}$ [dB]
CLT panel 135 mm	$\leq 39$	$\leq 23$
CLT panel 146 mm	39	24
Sádrovláknitá deska 25 mm EPS 20 mm 2 x Akustická izolace 30 mm CLT panel 135 mm (5 vrstev)	$\leq 62$	$\leq 59$
CLT panel (5 vrstev) Podpory pro zavěšení podhledu 100 mm Zvuková izolace 100 mm 2 x sádrokartonová deska 13 mm	64	59
Laminátová podlaha 7 mm Dřevovláknitá deska 5 mm CLT panel 146 mm (5 vrstev) Podpory po zavěšení podhledu 100 mm Zvuková izolace 100 mm 2 x sádrokartonová deska 13 mm	62	$\geq 63$

Tabulka 19 - Výsledky testů CLT stěn s různými vrstvami (3)

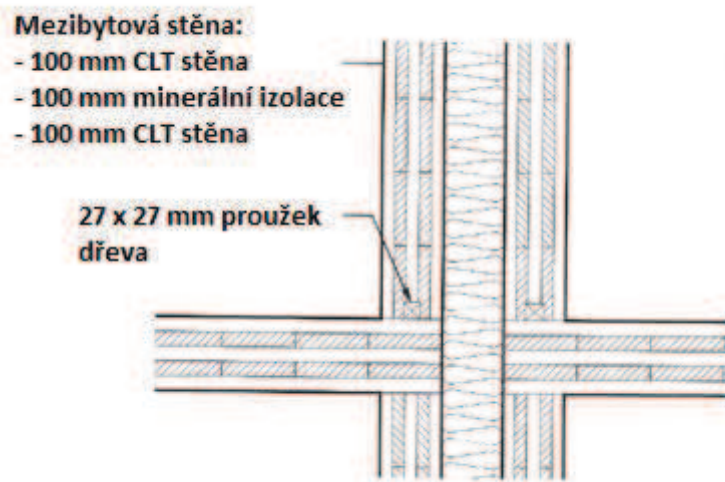
Vrstvy	$R_w$
[-]	[dB]
CLT stěna 95 - 115 mm (3 vrstvy)	$\leq 32 - 34$
Sádrokartonová deska 15 mm CLT stěna 95 - 115 mm (3 vrstvy) Sádrokartonová deska 15 mm	$\leq 36 - 38$
Sádrokartonová deska 15 mm Minerální vlna 60 mm (mezi dřevěnými hranoly) CLT stěna 95 - 115 mm (3 vrstvy) Minerální vlna 60 mm (mezi dřevěnými hranoly) Sádrokartonová deska 15 mm	$\leq 58$
CLT stěna 95 - 115 mm Minerální vlna 30 mm CLT stěna 95 - 115 mm	$\leq 48 - 50$
Sádrokartonová deska 15 mm CLT stěna 95 - 115 mm Minerální vlna 30 mm CLT stěna 95 - 115 mm Sádrokartonová deska 15 mm	$\leq 55$

### 3.7.4 Příklady z realizace

V každé zemi se liší požadavky na akustické vlastnosti konstrukcí. Ve většině staveb z CLT bylo pro docílení dostatečné kročejové neprůzvučnosti u stropů použito plovoucí podlahy (Svartlamoen housing) v kombinaci se zavěšeným podhledem (Graphite apartments, Forté).

Typickou skladbou podlahy v budově Forté je CLT panel zakrytý parozábranou, cementový potěr tl. 75 mm a dřevěná pochozí vrstva. Při výstavbě budovy bylo použito cementového potěru jedním z mála mokrých procesů. Aplikace cementového potěru byla komplikovaná a při dalších projektech se firma LendLease (investor, projektant a hlavní dodavatel stavby) bude chtít vyhnout mokrému procesu a bude hledat jinou alternativu k docílení požadované kročejové neprůzvučnosti.

Pro dosažení požadované vzduchové neprůzvučnosti u mezibytových stěn bylo většinou použito zdvojení CLT panely s mezerou mezi panely vyplněnou minerální vlnou (nebo jinou akustickou izolací). Toto řešení bylo použito například u stavby Svartlamoen housing, Svalbard housing (Obrázek 14) a Egenes park.

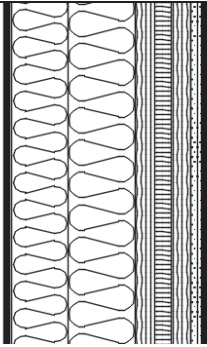
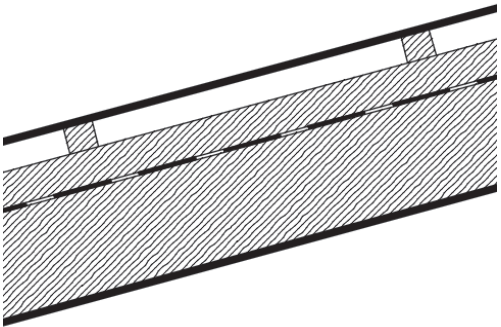
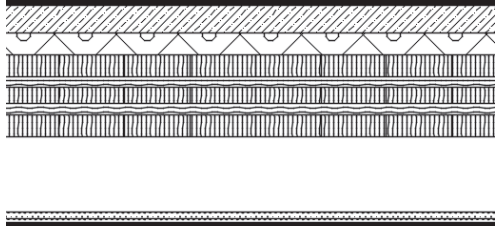


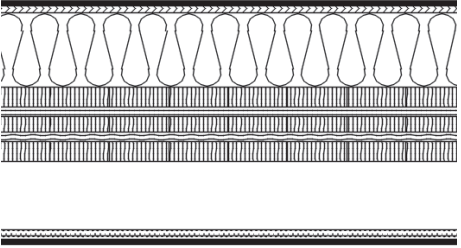
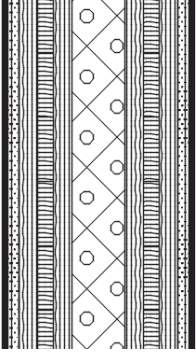
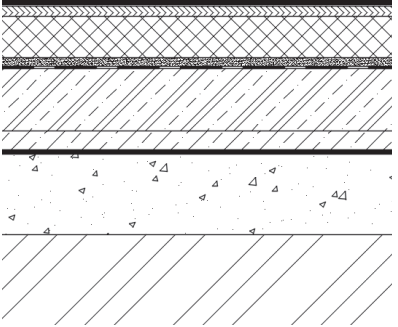
Obrázek 14 - Zdvojení mezibytové stěny (1)

## 4. NÁVRH VÍCEPDLAŽNÍ DŘEVOSTAVBY S VYUŽITÍM CLT

Tato část obsahuje studii vícepodlažní budovy z CLT. Jedná se o čtyřpatrovou rezidenční budovu. Výkresy 1. a 2. nadzemního podlaží, řez konstrukcí, skladby a některé detaily jsou přiloženy k diplomové práci jako přílohy.

### 4.1 Skladby konstrukcí

<p style="text-align: center;"><b>Obvodová stěna</b> 8 mm systémová fasádní omítka 220 mm minerální izolace (ISOVER ORSEK) CLT panel 2x 12,5 mm SDK deska</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Střecha</b> Krytina – profilované plechové pásy 50 mm střešní latě 50/50 60 mm kontralatě 60/60 Difuzní fólie Krokev 100/240 po 1,2 m</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Strop nad 1. – 3. NP</b> 8 mm podlahová krytina 50 mm betonové dlaždice (90 kg/m<sup>2</sup>) 40 mm (Orsil N) 150 mm CLT panel 150 mm vzduchová mezera 12,5 mm SDK deska</p>	

<p style="text-align: center;"><b>Strop nad 4. NP</b>  18 mm OSB deska  150 mm minerální izolace mezi hranoly  150 mm CLT panel  150 mm vzduchová mezera  12,5 mm SDK deska</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Vnitřní nosná stěna (mezi byty)</b>  12,5 mm SDK deska  100 mm CLT stěna  100 mm zvuková izolace  100 mm CLT stěna  12,5 mm SDK deska</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Podlaha přízemí</b>  8 mm podlahová krytina  25 mm podlahový dílec (nebo 2 x DTD)  100 mm EPS  20 mm suchý podsyp  PE fólie  150 mm úložná deska  50 mm podkladový beton  200 mm štěrkový podsyp  zemina</p>	

## 4.2 Zatížení

### 4.2.1 Sníh

- Zatížení sněhem

Výpočet podle ČSN EN 1991-1-3, 2002

Zatížení sněhem se vypočítá podle vzorce:

$$s \quad L \quad \% \quad \% \quad O$$

kde  $\mu_i$  – tvarový součinitel

$C_e$  – součinitel expozice, obvykle se rovná 1,0

$C_t$  – součinitel teploty, obvykle se rovná 1,0

$s_k$  – charakteristická hodnota

Jedná se o sedlovou střechu, s  $\alpha = 15^\circ$ , proto  $\mu_i = 0,8$ .

Pro Prahu je součinitel  $s_k = 0,7$  kPa.

$$s = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 0,7$$

$$s = 0,56 \text{ kN/m}^2$$

#### 4.2.2 Zatížení na stropní panel

V následujících tabulkách je vypočítáno charakteristické i návrhové zatížení stropních desek a střechy. Tabulka 20 ukazuje zatížení na stropní desku v 1. až 3. NP. Tabulka 21 ukazuje zatížení na stropní desku v 4. NP. Tabulka 22 ukazuje zatížení od střešní konstrukce.

**Tabulka 20 - Zatížení na stropní desku 1. až 3. NP**

	Floušťka	Objemová hmotnost	$g_k$	$\gamma_f$	$g_d$
	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Dřevěná plovoucí podlaha	8	580	0,087	1,35	0,117
Betonové dlaždice	50	2200	1,100	1,35	1,485
Akustická izolace (Isover N)	40	100	0,040	1,35	0,054
$\Sigma$			1,227		1,656
Přemístitelné příčky	-	-	1,200	1,5	1,800
Užitné zatížení	-	-	1,500	1,5	2,250
$\Sigma$			2,700		4,050

**Tabulka 21 - Zatížení na stropní desku, 4. NP**

	Floušťka	Objemová hmotnost	$g_k$	$\gamma_f$	$g_d$
	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]
OSB deska	18	650	0,117	1,35	0,158
Minerální vata	200	100	0,200	1,35	0,270
Dřevěné hranoly	-	600	0,240	1,35	0,324
$\Sigma$	-	-	0,557	-	0,752
Užitné zatížení	-	-	0,750	1,5	1,125
$\Sigma$	218	-	0,750	-	1,125

**Tabulka 22 - Zatížení od střešní konstrukce**

	Tloušťka	Objemová hmotnost	$g_k$	$\gamma_f$	$g_d$
	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]
Profilované plechové pásy	0,5	7850	0,039	1,35	0,053
Střešní latě 50/50	-	600	0,045	1,35	0,061
Kontralatě 60/60	-	600	0,065	1,35	0,087
Krokev 100/240	-	600	0,144	1,35	0,194
$\Sigma$	-	-	0,149	-	0,201
Užitné zatížení nebo	-	-	0,75	1,5	1,125
Sníh	-	-	0,56	1,5	0,84
$\Sigma$			0,750		1,125

#### 4.2.3 Zatížení na stěnu

Vlastní tíha stěny včetně všech vrstev je uvedena v tabulce (Tabulka 23).

**Tabulka 23 - Zatížení od obvodové stěny**

	Tloušťka	Objemová hmotnost	$g_k$	$\gamma_f$	$g_d$
	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Systémová omítka	8	1053	0,084	1,35	0,114
Mínérální izolace	220	100	0,220	1,35	0,297
CLT stěna	100	550	0,550	1,35	0,743
SDK desky	25	18,4	0,005	1,35	0,006
$\Sigma$	-	-	0,859		1,159

Byla navržena stěna na podélné straně budovy v 1. NP. Zatížení na tuto stěnu je ukázáno v tabulce (Tabulka 24). Zatěžovací šířka stropní konstrukce této stěny je rovna 2,63 m.

**Tabulka 24 - Zatížení na stěnu v 1. NP**

	$(g+q)_k$	$(g+q)_d$
	[kN/m]	[kN/m]
Střecha	2,36	3,49
Strop 4. NP	5,61	7,87
Stěna 4. NP	2,40	3,25
Strop 3. NP	12,50	17,94
Stěna 3. NP	2,40	3,25
Strop 2. NP	12,50	17,94
Stěna 2. NP	2,40	3,25
Strop 1. NP	12,50	17,94
$\Sigma$	52,679	74,90

#### 4.2.4 Vítr

Bylo spočítáno zatížení na stěnu od větru, které by mohlo způsobit ztrátu stability konstrukce.

Výpočet proběhl podle ČSN EN 1991-1-4 (51).

Tlak větru  $w_e$  působící na vnější povrchy konstrukce se získá z výrazu:

$$w_e(z) = q_p(z_e)c_{pe} \quad 47$$

$$q_p(z_e) = c_e(z)q_b \quad 48$$

$$q_b = \frac{1}{2}\rho v_b^2 \quad 49$$

kde:

$q_p(z_e)$  – maximální dynamický tlak

$z_e$  – referenční výška pro vnější tlak

$c_{pe}$  – součinitel vnějšího tlaku

$c_e(z)$  – součinitel expozice

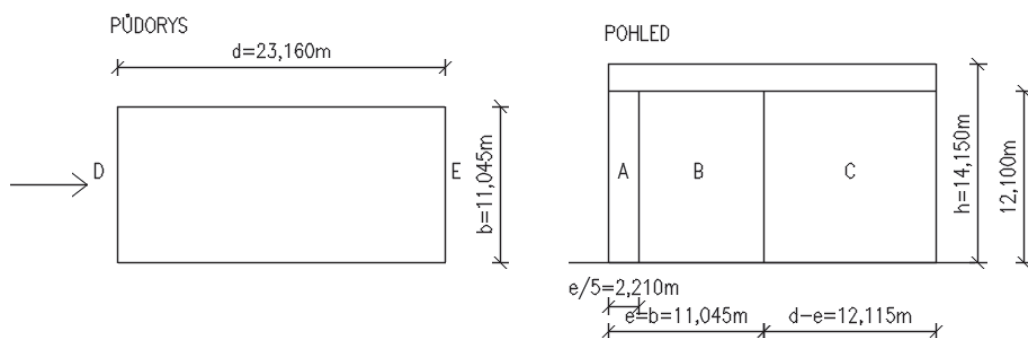
$\rho$  – měrná hmotnost vzduchu,  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

$v_b$  – základní rychlost větru, po Prahu  $v_b = 22,5 \text{ m/s}$

$$q_b = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 22,5^2 = 0,316 \text{ kN / m}^2$$



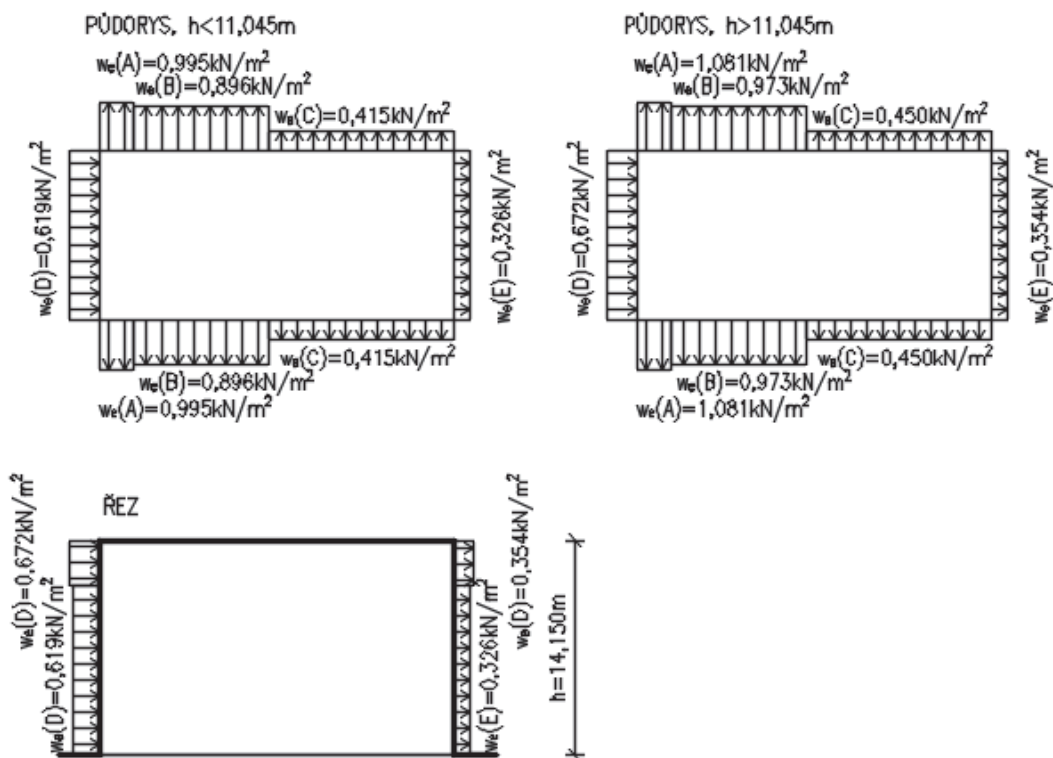
- **Zatížení, vítr kolmo na štítovou stěnu**



Obrázek 15 - Zatížení na štítovou stěnu

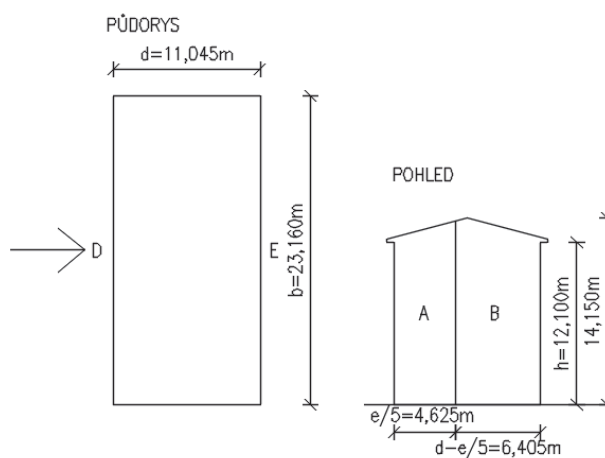
Tabulka 25 - Zatížení, vítr kolmo na štítovou stěnu

h/d=0,61							
Oblast	$c_{pe,10}$	$c_e(11,045)$	$w_{e,k}(11,045)$	$w_{e,d}(11,045)$	$c_e(14,150)$	$w_{e,k}(14,150)$	$w_{e,d}(14,150)$
	[-]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]
A	-1,20	1,75	-0,664	-0,995	1,90	-0,720	-1,081
B	-1,08	1,75	-0,597	-0,896	1,90	-0,648	-0,973
C	-0,50	1,75	-0,277	-0,415	1,90	-0,300	-0,450
D	0,75	1,75	0,413	0,619	1,90	0,448	0,672
E	-0,39	1,75	-0,218	-0,326	1,90	-0,236	-0,354



Obrázek 16 - Zatížení, vítr kolmo na štítovou stěnu

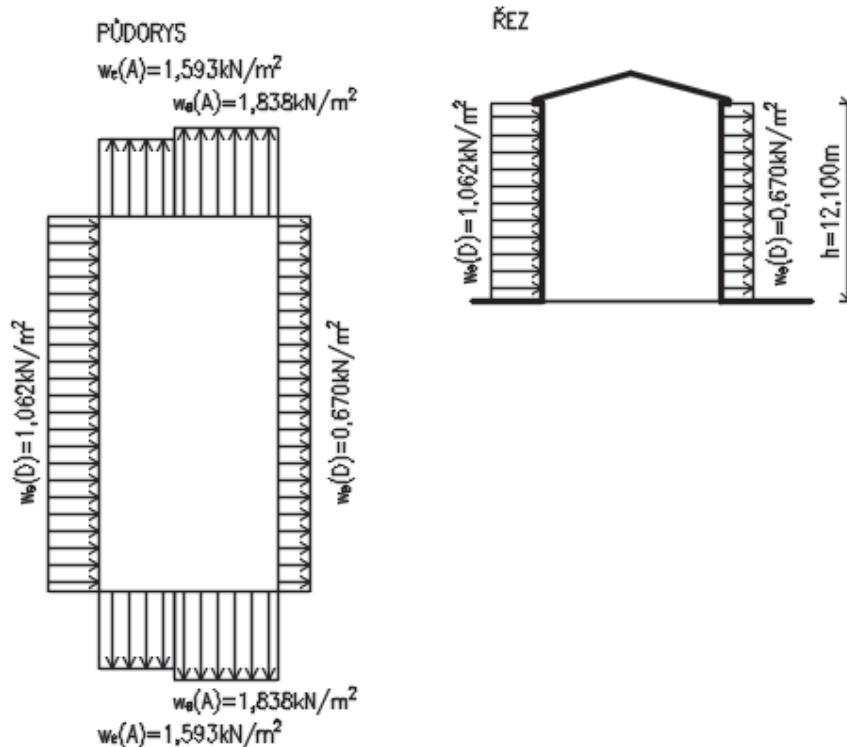
- **Zatížení na podélnou stěnu**



**Obrázek 17 - Zatížení na podélnou stěnu**

**Tabulka 26 - Zatížení, vítr kolmo na podélnou stěnu**

h/d=1,10				
oblast	$c_{pe,10}$	$c_e(12,100)$	$w_{e,k}(12,100)$	$w_{e,d}(12,100)$
	[-]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]
A	-1,20	2,80	-1,062	-1,593
B	-1,39	2,80	-1,225	-1,838
C	-0,50	2,80	-0,442	-0,664
D	0,80	2,80	0,708	1,062
E	-0,51	2,80	-0,447	-0,670



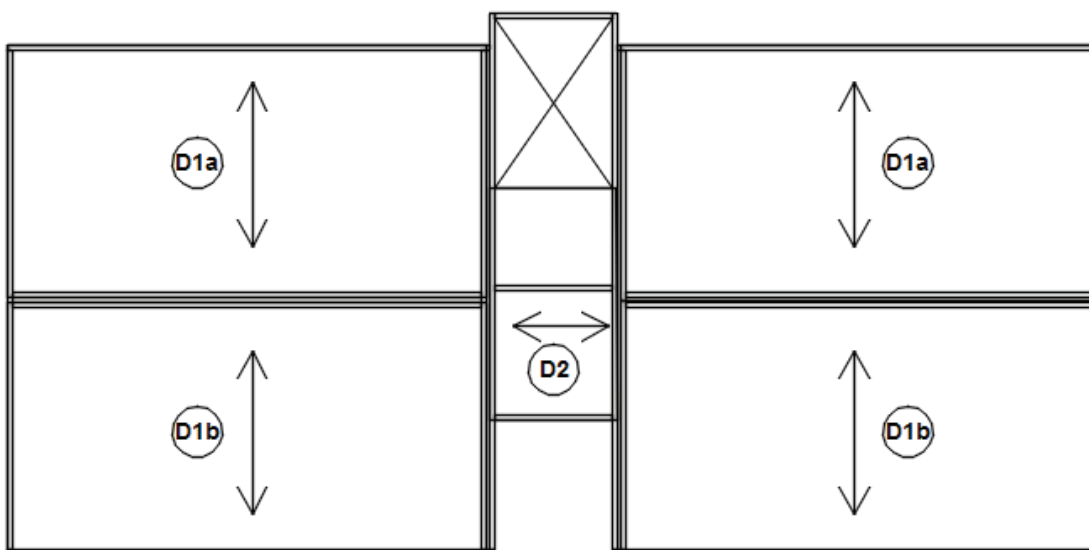
Obrázek 18 - Zatížení, vítr kolmo na podélnou stěnu

## 4.3 Návrh a posouzení nosných konstrukcí

### 4.3.1 Návrh a posouzení stropních panelů v 1. – 3. NP

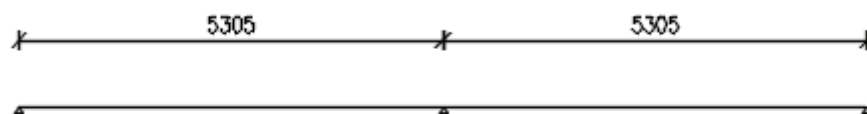
Zatížení na stropní panely se liší pouze ve 4. NP, v dalších patrech je zatížení shodné. Schéma pnutí panelů v konstrukci je ukázáno na obrázku (Obrázek 19).

Na obrázku (Obrázek 20) jsou vidět schémata stropních panelů. Stropní panely jsou kloubově uloženy, desky D1a a D1b jsou vypočítané ve dvou variantách. První varianta uvažuje momentové spojení obou desek, takže působí jako spojitý nosník. Další možností by bylo uvažovat panel přes obě pole. Jeho délka by byla 10,6 m, i tento rozměr by se dal dopravit na staveniště. Druhá varianta uvažuje desky D1a a D2a jako jednoduché nosníky, toto řešení je lepší pro akustiku.

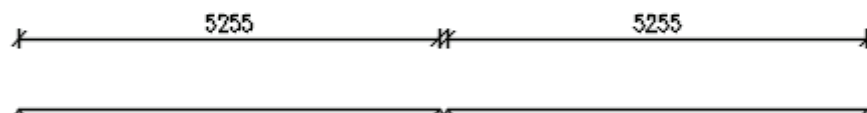


Obrázek 19 - Schéma pnutí konstrukce

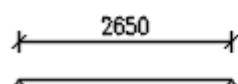
### D1a + D1b



### D1a; D1b



### D2



Obrázek 20 - Schéma stropních desek

Posouzení desek proběhlo v programu CLTdesigner. Návrh proběhl na šířku panelu 1 m.

- **Posouzení spojitých desek D1a + D1b**

Navržený panel:

150–5s (40+20+30+20+40) (Obrázek 21)

$$\frac{l}{h} = \frac{5305}{150} = 35,4$$



Obrázek 21 - Řez panelem 150-5s

Zatížení:

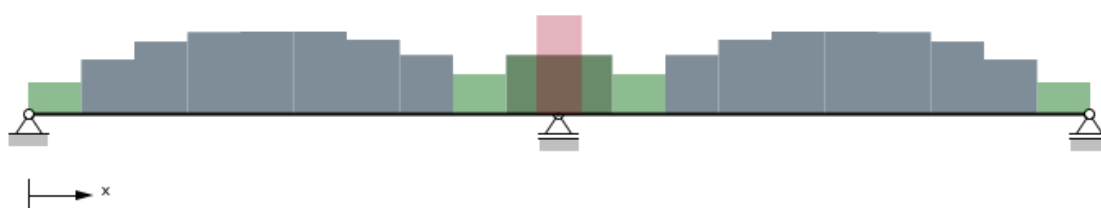
Vlastní tíha panelu  $g_{0,k} = 0,825kN / m$

Tíha podlahy  $g_{0,k} = 1,227kN / m^2$

Proměnné zatížení  $g_{1,k} = 2,7kN / m^2$

Posouzení:

Obrázek 22 znázorňuje poměr využití průřezu a dále ukazuje, ve kterých částech konstrukce rozhoduje smyk (zelená barva) a ve kterých rozhoduje průhyb. Červená barva označuje místo, kde se přesně řešení může lišit od výsledku z CLTdesigneru.



Obrázek 22 - Poměr využití

Obrázek 23 ukazuje samotné posouzení průřezu na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Samotné posouzení je rozepsáno pod obrázkem.

MSÚ					
Ohyb	$\eta_M$	54.4 %	$k_{mod}$	0.8	$x = 5.3 \text{ m}$
Smyk	$\eta_V$	43.6 %	$k_{mod}$	0.8	$x = 5.3 \text{ m}$
MSP					
Průhyb	$\eta_w$	76.2 %	$k_{def}$	0.85	$x = 2.65 \text{ m}$
Vibrace	<p><b>Posouzení podle DIN 1052 splněno</b>  <b>Podle EN 1995-1-1 je potřeba přesnější posouzení</b></p>				

Obrázek 23 - Posouzení spojitého nosníku D1a + D1b

- Moment

Rozhodující kombinace:  $1,35 \times g_{0,k} + 1,35 \times g_{1,k} + 1,50 \times 1,00 \times q_k$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

$$43,24kNm \geq 23,52kNm$$

- Smyk

Rozhodující kombinace:  $1,35 \times g_{0,k} + 1,35 \times g_{1,k} + 1,50 \times 1,00 \times q_k$

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

$$51,65kN \geq 22,52kN$$

- Průhyb

Rozhodující průhyb:

$$w_{net,fin} = \infty; g_{0,k} + (g_{0,k})_{creep} + g_{1,k} + (g_{1,k})_{creep} + 1,00 \times q_k + (0,30 \times q_k)_{creep}$$

$$w_{limit} = \frac{l}{250} \geq w_{net,fin}$$

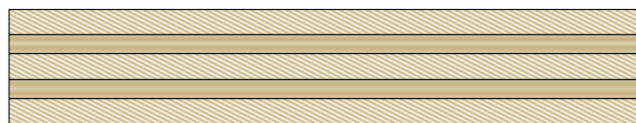
$$21,22mm \geq 16,18mm$$

- **Posouzení jednoduchých nosníků D1a = D1b**

Navržený panel:

180–5s (40+30+40+30+40) dřevěné lamely C24 (Obrázek 24)

$$\frac{l}{h} = \frac{5255}{180} = 29,2$$



Obrázek 24 - Řez panelem 180-5s

Zatížení:

Vlastní tíha panelu  $g_{0,k} = 0,99kN / m$

Tíha podlahy  $g_{0,k} = 1,227kN / m^2$

Proměnné zatížení  $g_{1,k} = 2,7kN / m^2$

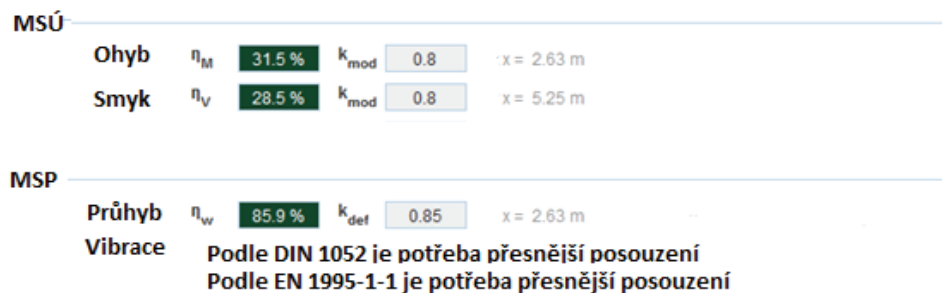
### Posouzení:

Obrázek 25 znázorňuje poměr využití průřezu a dále ukazuje, ve kterých částech konstrukce rozhoduje smyk (zelená barva) a ve kterých rozhoduje průhyb. Červená barva označuje místo, kde se přesně řešení může lišit od výsledku z CLTdesigneru.



Obrázek 25 - Poměr využití průřezu

Obrázek 26 ukazuje samotné posouzení průřezu na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Samotné posouzení je rozepsáno pod obrázkem.



Obrázek 26 - Posouzení desky D1a

- Moment

Rozhodující kombinace:  $1,35 \times g_{0,k} + 1,35 \times g_{1,k} + 1,50 \times 1,00 \times q_k$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

$$77,17kNm \geq 24,31kNm$$

- Smyk

Rozhodující kombinace:  $1,35 \times g_{0,k} + 1,35 \times g_{1,k} + 1,50 \times 1,00 \times q_k$

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

$$64,95kN \geq 18,51kN$$

- Průhyb

Rozhodující průhyb:

$$w_{net,fin} = \infty; g_{0,k} + (g_{0,k})_{creep} + g_{1,k} + (g_{1,k})_{creep} + 1,00 \times q_k + (0,30 \times q_k)_{creep}$$

$$w_{\text{limit}} = \frac{l}{250} \geq w_{\text{net,fin}}$$

$$21,02\text{mm} \geq 18,06\text{mm}$$

- **Posouzení jednoduchých nosníků D2**

Navržený panel:

150–5s (40+20+30+20+40) dřevěné lamely C24 (Obrázek 21)

$$\frac{l}{h} = \frac{2650}{150} = 17,7$$

180–5s (40+30+40+30+40) dřevěné lamely C24 (Obrázek 24)

$$\frac{l}{h} = \frac{2650}{180} = 14,7$$

Je vhodné navrhnout panel stejné tloušťky v celém patře. Při použití panelu tloušťky 180 mm se poměr  $l/h$  dostává pod povolený limit, proto je použit panel 150-5s.

Zatížení:

Vlastní tíha panelu  $g_{0,k} = 0,825\text{kN} / \text{m}$

Tíha podlahy  $g_{0,k} = 1,227\text{kN} / \text{m}^2$

Proměnné zatížení  $g_{1,k} = 2,7\text{kN} / \text{m}^2$

Posouzení:

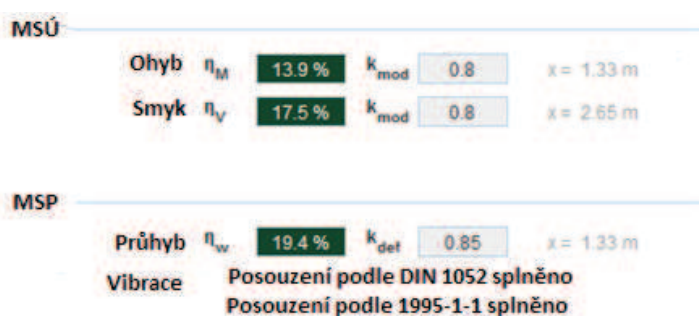
Obrázek 27 znázorňuje poměr využití průřezu a dále ukazuje, ve kterých částech konstrukce rozhoduje smyk (zelená barva) a ve kterých rozhoduje průhyb. Červená barva označuje místo, kde se přesně řešení může lišit od výsledku z CLTdesigneru. V porovnání s předchozími uspořádáními je zde vidět větší vliv smyku kvůli menšímu poměru  $l/h$ .



Obrázek 27 - Poměr využití průřezu



Obrázek 26 ukazuje samotné posouzení průřezu na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Samotné posouzení je rozepsáno pod obrázkem.



Obrázek 28 - Posouzení desky D2

- Moment

Rozhodující kombinace:  $1,35 \times g_{0,k} + 1,35 \times g_{1,k} + 1,50 \times 1,00 \times q_k$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

$$43,09 \text{ kNm} \geq 5,99 \text{ kNm}$$

- Smyk

Rozhodující kombinace:  $1,35 \times g_{0,k} + 1,35 \times g_{1,k} + 1,50 \times 1,00 \times q_k$

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

$$51,67 \text{ kN} \geq 9,04 \text{ kN}$$

- Průhyb

Rozhodující průhyb:

$$w_{net,fin} = \infty; g_{0,k} + (g_{0,k})_{creep} + g_{1,k} + (g_{1,k})_{creep} + 1,00 \times q_k + (0,30 \times q_k)_{creep}$$

$$w_{limit} = \frac{l}{250} \geq w_{net,fin}$$

$$10,60 \text{ mm} \geq 2,06 \text{ mm}$$

#### 4.3.2 Návrh a posouzení stropních panelů v 4. NP

Návrh panelů proběhl podle stejného schématu jako návrh panelů pro 1. - 3. patro, jediný rozdíl je v zatížení. I přes menší zatížení vyšla stejná tloušťka panelů, rozhodující vliv měly vibrace.

#### Navržený panel:

150–5s (40+20+30+20+40), dřevěné lamely C24 (Obrázek 21)

$$D4a + D4b: \frac{l}{h} = \frac{5305}{150} = 35,4$$

$$D2: \frac{l}{h} = \frac{2650}{150} = 17,7$$

#### Zatížení:

Vlastní tíha panelu  $g_{0,k} = 0,825 \text{ kN} / \text{m}$

Tíha podlahy  $g_{0,k} = 0,557 \text{ kN} / \text{m}^2$

Proměnné zatížení  $g_{1,k} = 0,75 \text{ kN} / \text{m}^2$

#### Posouzení:

Posouzení desek D4a + D4b a D4-2 je znázorněno v tabulce (Tabulka 27).

Tabulka 27 - Posouzení stropních panelů ve 4. NP

Deska	$M_{rd}$	$M_{ed}$	$\eta_m$	$V_{Rd}$	$V_{ed}$	$\eta_v$	$W_{limit}$	$W_{net,fin}$	$\eta_w$
	[kNm]	[kNm]	[%]	[kN]	[kN]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
D4a + D4b	43,13	10,31	23,9	51,73	9,88	19,1	21,22	7,15	33,7
D4-2	43,24	2,63	6,1	51,43	3,96	7,7	10,6	0,85	9,5

### 4.3.3 Návrh a posouzení stěnového panelu

Tloušťka stěnového panelu bude v celé budově stejná, rozhoduje nejvíce zatížený panel.

#### Navržený panel:

100–3s (35+30+35), dřevěné lamely C24 (Obrázek 29)

Výrobce: binderholz



Obrázek 29 - Vodorovný řez stěnovým panelem

#### Zatížení:

Svislé zatížení na stěnu  $n_{xy,d} = 74,90 \text{ kN} / \text{m}$

### Posouzení:

Posouzení navrženého stěnového panelu je znázorněno na obrázku (Obrázek 30). Panel je posouzen na dva mechanismy, smyk a kroucení.

Poměr využití	
Smyková síla (Mechanismus I - Smyk)	$\eta_{nxy,V}$ 78 %
Smyková síla (Mechanismus II - Kroucení)	$\eta_{nxy,T}$ 46.8 %

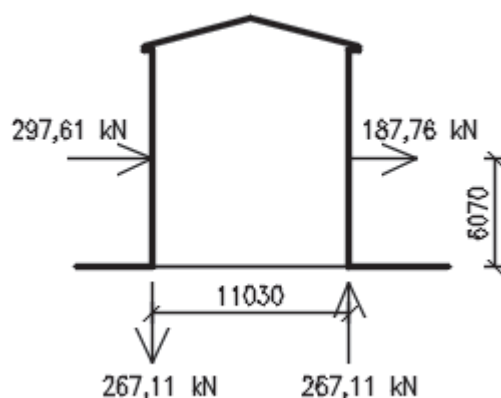
Obrázek 30 - Posouzení stěnového panelu

### 4.3.4 Návrh připojení stěnového panelu

Ideální připojení panelu k základu je stále předmětem zkoumání, tento návrh připojení slouží pouze jako předběžný návrh.

Pro předběžný výpočet je použito zatížení větrem kolmo na podélnou obvodovou stěnu (Obrázek 18), které je v tomto případě rozhodující. Pro výpočet spojení bylo použito pouze zatížení od větru za účelem vyzkoušení výpočtu, s přidáním vlastní tíhy konstrukce by tahové síly byly minimální.

Zatížení větrem je zachyceno dvěma svislými silami působícími na krajích konstrukce (Obrázek 31). Připojení proběhne po délce celé budovy (23,70 m),



Obrázek 31 - Schéma pro výpočet reakcí

- **Zakotvení do betonu**

Zakotvení do betonu proběhne pomocí mechanické kotvy za pomoci úhelníkové spojky BOVA (Obrázek 32).



Obrázek 32 - Příklad uhelníkové spojky (52)

- **Přichycení k CLT panelu**

Každý uhelník bude připojen k CLT panelu dvěma vruty o průměru 12 mm. Jedná se o jednostřížný spoj. Ocelový uhelník má tloušťku 4,0 mm, proto je klasifikován jako tenká deska.

Nutný počet vrutů se vypočítá podle následujících vzorců:

- Charakteristická pevnost vrutů

$$F_{v,Rk} = \min(0,4f_{h,k}t_1d; 1,15\sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}) \quad 50$$

- Návrhová pevnost vrutů

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod}F_{v,Rk}}{\gamma_M} \quad 51$$

- Charakteristická osová únosnost spojovacího prostředku na vytažení

$$F_{ax,Rk} = \min\left(\frac{Af_{u,k}}{\gamma_{M0}}; A_p f_{c,90,k} 3\right) \quad 52$$

- Návrhová osová únosnost spojovacího prostředku na vytažení

$$F_{ax,Rd} = \frac{k_{mod} F_{ax,Rk}}{\gamma_M} \quad 53$$

- Počet úhelníků

$$n = \frac{F_{ed}}{2 \times F_{v,Rd}} \quad 54$$

kde:

$$f_{h,k} = 0,082(1-0,01d)\rho_k \text{ pro svorníky} \quad 55$$

$$M_{y,Rk} = 0,3f_u d^{2,6} \text{ pro svorníky} \quad 56$$

$M_{y,Rk}$  - charakteristický plastický moment únosnosti spojovacího prostředku

$f_{h,k}$  - charakteristická pevnost v otláčení

$d$  - průměr vrutu

$t_l$  - hloubka vniku

$n_{ef}$  - účinný počet vrutů

$\rho_k$  - charakteristická hustota

$f_{c,90,k}$  - pevnost dřeva v tlaku

Návrh:

Vrut  $12 \times 90 \text{ mm}$

$t = 90 \text{ mm}$

$d = 12 \text{ mm}$

počet vrutů  $n = 2$

$\rho_k = 550 \text{ kg/m}^3$

Plocha podložky  $A_p = 1436 \text{ mm}^2$

- Charakteristická pevnost v otláčení

$$f_{h,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times 12) \times 550 = 39,7 \text{ MPa}$$

- Charakteristický plastický moment únosnosti spojovacího prostředku

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times 600 \times 12^{2,6} = 115118 \text{ MPa}$$

- Charakteristická osová únosnost spojovacího prostředku na vytažení

$$F_{ax,Rk} = \min\left(\frac{\pi \times 12^2}{4} \times 600; 1436 \times 2,5 \times 3\right) = \min(67,86; 10,77) = 10,77 \text{ kN}$$

- Charakteristická únosnost vrutů

$$F_{v,Rk} = \min(0,4 \times 39,7 \times 90 \times 12; 1,15 \sqrt{2 \times 115118 \times 39,7 \times 12} + \frac{10,77}{4})$$

$$F_{v,Rk} = \min(17,15; 12,05) = 12,05 \text{ kN}$$

- Návrhová pevnost vrutů

$$F_{v,Rd} = \frac{0,9 \times 12,05}{1,25} = 8,68 \text{ kN}$$

- Počet úhelníků

$$n = \frac{267,11}{2 \times 8,68} = 16$$

Návrhová únosnost jednoho vrutu se rovná 8,68 kN, návrhová únosnost celého úhelníku (2 vruty) se rovná 17,36 kN.

Pro přichycení síly 267,11 kN je nutné použít 16 úhelníků, které budou po stěně délky 23,70 m umístěny každých 1,58 m.

Výpočet proběhl podle ČSN EN 1995-1-1 (8).

#### 4.4 Tepelně technické požadavky

Budova byla navržena tak, aby splňovala podmínky nízkoenergetické budovy. Skladby obvodových konstrukcí jsou navrženy pro dosažení požadovaného součinitele prostupu tepla.

##### 4.4.1 Hodnoty v budově

Obvodové skladby byly posouzeny v programu Stavební fyzika, Teplo 2010.

- Obvodová stěny

$$U = 0,16 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

- Strop 4. NP

$$U = 0,20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

- Podlaha 1. NP

$$U = 0,29 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

## 5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo souhrně zpracovat dostupné informace o vícepodlažních budovách z křížem vrstveného dřeva a materiálu jako takovém, spolu s předběžným návrhem vícepodlažní budovy z křížem vrstveného dřeva.

Ve druhé kapitole byla popsána výroba CLT, jeho vlastnosti a chování. Byly popsány tři analytické metody pro výpočet stropních panelů z CLT a jeden software. Všechny metody se použily pro stanovení momentů únosnosti a průhybu pro tři různá rozpětí. Výsledky byly porovnány a metody následně ohodnoceny.

Ve třetí kapitole byly popsány hlavní aspekty návrhu vícepodlažních dřevostaveb z CLT, poznatky z této kapitoly se dále použily ve čtvrté kapitole, kde probíhal samotný návrh vícepodlažní konstrukce z křížem vrstveného dřeva.

Závěrem lze říct, že křížem vrstvené dřevo má velkou budoucnost a proto je nutné se nyní soustředit na jeho výzkum a následné zpracování do nového vydání Eurokódu 5.

## 6. CITOVANÁ LITERATURA

1. **Mayo, Joseph.** *Solid Wood*. Oxfordshire : Routledge, 2015.
2. **Woodard, Alaistar.** *New Opportunities for Timber in Mid-rise Apartment and Commercial Construction*. Melbourne : Wood Solutions, 2016.
3. **FPInnovations.** *CLT Handbook*. Québec : FPInnovations, 2011.
4. **Brandner, Reinhard.** *Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report*. IOM3. [Online] [Citace: 1. Duben 2016.]  
<http://www.iom3.org/fileproxy/457425>.
5. *TEMTIS, Handbook 1 - timber structures*. místo neznámé : Leonardo da Vinci Pilot Projects, 2008.
6. **Kuklík, Petr a Kuklíková, Anna.** *Navrhování dřevěných konstrukcí příručka k ČSN EN 1995-1*. Praha : ČKAIT, 2010. ISBN.
7. **Li, Minghao, Lam, Frank a Li, Yuan.** *Evaluating rolling shear strength properties of cross laminated timber by torsional shear tests*. *NEWBuildS*. [Online] 2014. [Citace: 5. Duben 2016.]  
[https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiTwJzulPjLAhWC3iwKHZVZANQQFgguMAE&url=http%3A%2F%2Fnewbuildscanada.ca%2Fwp-content%2Fuploads%2F2010%2F11%2FABS452\\_Li.pdf&usg=AFQjCNF3ixJAWS3zTSHx3x95rJJsroHymg&sig2=o](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiTwJzulPjLAhWC3iwKHZVZANQQFgguMAE&url=http%3A%2F%2Fnewbuildscanada.ca%2Fwp-content%2Fuploads%2F2010%2F11%2FABS452_Li.pdf&usg=AFQjCNF3ixJAWS3zTSHx3x95rJJsroHymg&sig2=o).
8. ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha : Český normalizační institut, 2006. 1.
9. *Design of cross laminated timber (CLT)*. **Mestek, P., Keuzinger, P. a Winter, s.** Miyazaki : autor neznámý, 2008.
10. **Thiel, Alexandra a Gerhard, Schickhofer.** *CLTdesigner - A SOFTWARE TOOL FOR DESIGNING CROSS LAMINATED TIMBER ELEMENTS: 1D-PLATE-DESIGN*. *cltdesigner.at*. [Online] [Citace: 1. Květen 2016.]  
[http://cltdesigner.at/fileadmin/downloads/CLTdesigner\\_WCTE2010\\_Paper.pdf](http://cltdesigner.at/fileadmin/downloads/CLTdesigner_WCTE2010_Paper.pdf).
11. **Jöbstl, R. A.** *Praxisgerechte Bemessung von Brettspertholz*. *Ingenieurholzbau – Karlsruher Tage 2007*. Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie, 2007.
12. *Cross Laminated Timber Comes To America And The New York Times Is On It*. *treehugger*. [Online] narrative content group, 2016. [Citace: 20. Duben 2016.]



<http://www.treehugger.com/green-architecture/cross-laminated-timber-comes-america-and-new-york-times-it.html>.

13. Forté December 2012. *Victoria Harbour*. [Online] lendlease. [Citace: 10. Duben 2016.] <http://www.victoriaharbour.com.au/live-here/forte-living>.

14. **Dufek, ing. Jaroslav**. Požadavky na požární bezpečnost staveb a dřevostavby. místo neznámé : PAVUS a. s.

15. **Weiss, K. a Linegar, M.** Londýn, 14. Červen 2011.

16. **Spurgeon, Roy**. construction-manager.co.uk. *building.co.uk*. [Online] [Citace: 28. Duben 2016.]

[http://www.building.co.uk/Journals/Builder\\_Group/Construction\\_Manager/November\\_2008/attachments/cpd%20pages%20nov08.pdf](http://www.building.co.uk/Journals/Builder_Group/Construction_Manager/November_2008/attachments/cpd%20pages%20nov08.pdf).

17. **Schmidt, J. a Griffin, C.T.** Barriers to the design and use of cross-laminated timber structures in high-rise housing. *portland state University*. [Online] 24. Červenec 2013. [Citace: 16. Duben 2013.] [http://web.pdx.edu/~cgriffin/research/jschmidt\\_clt.pdf](http://web.pdx.edu/~cgriffin/research/jschmidt_clt.pdf).

18. **Teibinger, M., Matzinger, I. a Doležal, F.** Construction with Cross-Laminated Timber in Multi-Storey Buildings - Focus on Building Physics. *Planning Guide*. Vienna : Holzforschung Austria, 2013.

19. —. Timber Frame construction in Multi-Storey Buildings - focus on Building Physics. *Planning guide*. Vienna : Holzforschung Austria, 2014.

20. home: world: europe. theguardian. *the guardian*. [Online] Guardian News and Media, 1. Březen 2015. [Citace: 4. Květen 2016.]

<http://www.theguardian.com/cities/2015/mar/01/vienna-plans-worlds-tallest-wooden-skyscraper>.

21. Brandschutz im Holzbau. *Technische Universität Braunschweig*. [Online] TU Braunschweig. [Citace: 5. Květen 2016.] <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports.php?topic>.

22. *FIRE AND MATERIALS*. San Francisco : interscience communication, 2013. <http://www.intersciencecomms.co.uk/html/publications/f&m13toc.pdf>. 13.

23. Forschung: Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Technische Universität München. *Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Technische Universität München*. [Online] [Citace: 5. Květen 2016.] <http://www.hb.bgu.tum.de/index.php?id=18>.

24. Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe. *SP Report 2010*. Stockholm : 19, Technical Research Institute of Sweden, 2010.

25. **Cronioe, C., a další, a další.** New Swedish building regulations and a framework for fire safety engineering. *9th int. conference on Performance-Based Codes and Fire Safety design methods*. Hong Kong : autor neznámý, 2012.
26. **Östman, Birgit, a další, a další.** Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe. *SP Report 2010*. Borås : Technical Research Institute of Sweden, 2010. 19.
27. *7th International Scientific Conference*. **Mikkola, Esko.** Strbske Pleso : autor neznámý, 2012. Performance based background for revision of Finnish fire regulations concerning timber framed buildings. *Wood & Fire Safety*.
28. **Mikkola, Esko.** 1st International Seminar for Fire Safety of Facades. *Fire safety of wooden balconies, facades and eaves*. Espoo : KK-Fireconsult Ltd, 2013. Sv. 9.
29. **Frangi, A., Knobloch, M. a Fontana, M.** Fire design of timber-concrete composite slabs with screwed connections. *Engineering Structures*. 2010, 136(2), stránky 219-228.
30. —. Fire design of timber slabs made of hollow core elements. *Journal of Structural Engineering*. 2009, 31(1), stránky 150-157.
31. **Frangi, A., Schleifer, V. a Fontana, M.** Design model for verification of the separating function of light timber frame assemblies. *Engineering Structures*. 2010, 32(4), stránky 1184-1195.
32. **Frangi, A. a Montana, M.** Fire behaviour of timber block walls. *Proceedings of 4th International Workshop structures in Fire*. Aveiro, Portugalsko : University of Aveiro, 10. až 12. Květen 2006. stránky 963-974. ISBN 972-789-190-X.
33. **Frangi, A., a další, a další.** Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. *Fire Safety Journal*. 209, 44(8), stránky 1078-1087.
34. **Erchinger, C., Frangi, A. a Fontana, M.** Fire design of steel-to-timber dowelled connections. *Engineering Structures*. 2010, 32(2), str. 580/589.
35. **Palma, P., a další, a další.** Fire resistance tests on beam-to-column shear connections. *Progress on Safety of Structures in Fire - Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire*. Shanghai, Čína : Tongji University Press, 2014. stránky 545-556.
36. **Klippel, M., Frangi, A. a Hugli, E.** Experimental analysis of the fire behaviour of finger-jointed timber members. *Journal of Structural Engineering*. 2014, 140(3).
37. **Klippel, M. a Frangi, A.** Fire tests on finger-jointed timber boards. *Test report no. 354*. Zurich : Institute of structural Engineering, ETH Zurich, 2014.

38. **Frangi, A. a Fontana, M.** Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions. *Fire Safety Science*. 2005, 8, stránky 279-290.
39. **Buchanan, A., Östman, B. a Frangi, A.** Fire resistance of timber structures. *Report for the National Institute of Standards and Technology*. 2014.
40. **Klippel, M.** Fire Safety of bonded structural timber elements. *PhD thesis no 21843*. Zurich : Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, 2014.
41. Approved Document B - Fire Safety. *Volume 2 - Buildings other than dwelling houses*. Londýn : HM Government, Leden 2013.
42. TF2000. *BRE Projects*. [Online] BRE Projects. [Citace: 10. Květen 2016.] <http://projects.bre.co.uk/tf2000/>.
43. Fire risks in London's tall and timber framed buildings. *Fire safety in London*. Londýn : London Assembly, Planning and Housing Committee , 2010.
44. 16 Steps to Fire Safety on Timber Frame Construction Sites. Londýn : UK Timber Frame Associaton, 2012.
45. Information centre: Site safe. *Structural Timber Association*. [Online] The Structural TimberAssociation. [Citace: 10. Květen 2016.] <http://www.structuraltimber.co.uk/information-centre/technical-library/site-safe/>.
46. The rise of cross-laminated timber. *Building.co.uk*. [Online] Building 2015. [Citace: 10. Květen 2016.] <http://www.building.co.uk/the-rise-of-cross-laminated-timber/5069291.article>.
47. Multifunctional timberbased element system for improving energy efficiency of the building envelope. *TES EnergyFacade*. [Online] Technische Universität München. [Citace: 10. Květen 2016.] [http://www.tesenergyfacade.com/index.php?id=10\\_news](http://www.tesenergyfacade.com/index.php?id=10_news).
48. Main page. *SusRef*. [Online] SusRef. [Citace: 10. Květen 2016.] <http://cic.vtt.fi/susref/>.
49. **Benák, Dipl. Ing Jaroslav**. <http://stavba.tzb-info.cz.tzbinfo>. [Online] Topinfo s.r.o. [Citace: 30. Duben 2016.] <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/10175-akustika-silna-stranka-drevostaveb>.
50. ČSN 73 0532. *Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků - Požadavky*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 1.
51. ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha : Český normalizační institut, 2007. 1.

52. Katalog produktů. *BOVA*. [Online] BOVA spol. s.r.o. [Citace: 11. Květen 2016.] <http://bova-nail.cz/produkt/kotevni-prvek-bvcp-12-36/>.
53. Studijní materiály. *VŠB-TUO Ostrava - Fakulta Stavební*. [Online] [Citace: 2. Duben 2016.] <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps3/1.html>.
54. *Design of cross laminated timber (CLT)*. **Mestek, P., Kreuzinger, H. a Winter, S.** Miyazaki : 10th World Conference on Timber Engineering, 2008.
55. ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Návrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha : Český normalizační institut, 2006. první.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Výkres č. 1 - Půdorys 1.NP

Výkres č. 2 - Půdorys 2. až 4. NP

Výkres č. 3 - Řez

Výkres č. 4 - Pohledy

Výkres č. 5 - Skladby konstrukcí

Výkres č. 6 - Detaily

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Vrstvení CLT (3).....	5
Obrázek 2 - Deformace valivým smykem CLT panelu (3) .....	11
Obrázek 3 - Graphite apartments v Londýně (12) .....	30
Obrázek 4 - Forté budova v Melbourne (13) .....	31
Obrázek 5 - Whistleton Road (1) .....	34
Obrázek 6 - Bridgeport house - první a druhé patro (1) .....	35
Obrázek 7 - Bridgeport house - vyšší patra (1).....	36
Obrázek 8 - Samořezné šrouby (3) .....	36
Obrázek 9 - Typy spojů CLT panelů (3).....	37
Obrázek 10 - Typický spoj (1).....	47
Obrázek 11 - Spojení po celé ploše (1).....	47
Obrázek 12 - Profilované stěny (1).....	48
Obrázek 13 - Kotvení CLT panelů (1).....	48
Obrázek 14 - Zdvojení mezibytové stěny (1) .....	74
Obrázek 15 - Zatížení na štítovou stěnu .....	80
Obrázek 16 - Zatížení, vítr kolmo na štítovou stěnu.....	80
Obrázek 17 - Zatížení na podélnou stěnu .....	81
Obrázek 18 - Zatížení, vítr kolmo na podélnou stěnu.....	82
Obrázek 19 - Schéma pnutí konstrukce .....	83
Obrázek 20 - Schéma stropních desek .....	83
Obrázek 21 - Řez panelem 150-5s.....	84
Obrázek 22 - Poměr využití .....	84
Obrázek 23 - Posouzení spojitého nosníku D1a + D1b .....	84
Obrázek 24 - Řez panelem 180-5s.....	85
Obrázek 25 - Poměr využití průřezu.....	86
Obrázek 26 - Posouzení desky D1a .....	86
Obrázek 27 - Poměr využití průřezu.....	87
Obrázek 28 - Posouzení desky D2.....	88
Obrázek 29 - Vodorovný řez stěnovým panelem .....	89
Obrázek 30 - Posouzení stěnového panelu .....	90
Obrázek 31 - Schéma pro výpočet reakcí .....	90
Obrázek 32 - Příklad uhelníkové spojky (52).....	91

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Lepidla (3) .....	6
Tabulka 2 - Pevnosti a moduly pružnosti pro dané třídy pevnosti (6).....	9
Tabulka 3 - Součinitel k pro různé situace (3).....	17
Tabulka 4 - Pevnosti a moduly pružnosti pro dané případy (3).....	18
Tabulka 5 - Použité CLT panely .....	26
Tabulka 6 - Zatížení .....	26
Tabulka 7 - Rozpětí.....	26
Tabulka 8 - Výsledky.....	28
Tabulka 9 - Výsledky v procentech .....	29
Tabulka 10 - Spojení panel - panel (3) .....	38
Tabulka 11 - Rohové spojení stěn (3).....	39
Tabulka 12 - Spojení panelu se stěnou (3).....	41
Tabulka 13 - Spoj panel - základ (3).....	44
Tabulka 14 - Požadavky na požární bezpečnost v Německu.....	53
Tabulka 15 - Výzkumné projekty v Švýcarsku .....	63
Tabulka 16 - Limitní hodnoty pro akustiku .....	71
Tabulka 17 - Akustické vlastnosti CLT (3) .....	71
Tabulka 18 - Výsledky testů CLT stropních panelů s různými vrstvami (3) .....	72
Tabulka 19 - Výsledky testů CLT stěn s různými vrstvami (3).....	73
Tabulka 20 - Zatížení na stropní desku 1. až 3. NP .....	77
Tabulka 21 - Zatížení na stropní desku, 4. NP.....	77
Tabulka 22 - Zatížení od střešní konstrukce .....	78
Tabulka 23 - Zatížení od obvodové stěny.....	78
Tabulka 24 - Zatížení na stěnu v 1. NP.....	78
Tabulka 25 - Zatížení, vítr kolmo na štítovou stěnu .....	80
Tabulka 26 - Zatížení, vítr kolmo na podélnou stěnu .....	81
Tabulka 27 - Posouzení stropních panelů ve 4. NP .....	89