

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Modulární dřevostavby

Modular timber buildings

Studijní program:

Stavební inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce pozemních staveb

Vypracoval:

Tomáš Jasek

Vedoucí práce:

doc. Ing. Petr Kuklík, CSc

Praha 2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Jasek Jméno: Tomáš Osobní číslo: 492840
Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor/specializace: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Modulární dřevostavby

Název bakalářské práce anglicky: Modular Timber Buildings

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce bude obsahovat esej na téma modulární dřevostavby.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kuklík: Dřevěné konstrukce, ČVUT Praha
- [2] Kuklík, Kuklíková, Mikeš: Dřevěné konstrukce 1, Cvičení, ČVUT Praha
- [3] Studnička, Holický: Ocelové konstrukce 20 - Zatížení staveb, ČVUT Praha
- [4] http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook_2_CZ.pdf
- [5] ČSN EN 1995-1-1
- [6] ČSN Online | Portál FSv ČVUT (cvut.cz)


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

Datum zadání bakalářské práce: 20.02.2023

Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.05.2023

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného/ak. roku



Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

20.02.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

V Praze dne: 22. 5. 2023

Podpis:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. K. S.', written in a cursive style.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Petru Kuklíkovi, CSc a Ing. Anně Kuklíkové, Ph.D. za poskytnutí materiálů a podnětů pro mou práci, ale také za odbornou pomoc při její tvorbě.

Abstrakt

Tato práce zkoumá potenciál modulárních dřevostaveb jako řešení problémů udržitelnosti ve stavebnictví. Druhá kapitola zdůrazňuje výhody použití dřeva jako obnovitelného a nízkouhlíkového materiálu a identifikuje výzvy s ním spojené. Další kapitoly se věnují vlastnostem a provedení dřevěného modulu a jeho následné implementace v konstrukci budovy. Je prozkoumán celý proces organizace a provedení projektů modulárních dřevostaveb. V poslední kapitole jsou uvedeny příklady úspěšných realizací z různých oblastí, s bližším zaměřením na situaci v České republice.

Klíčová slova

modulární, dřevostavba, udržitelnost, efektivita, dřevo, modul, prefabrikace

Abstract

This thesis explores the potential of modular timber buildings as a solution to sustainability issues in the construction industry. The second chapter highlights the benefits of using wood as a renewable and low-carbon material and identifies the challenges associated with it. Following chapters discuss the properties and performance of the timber module and its subsequent implementation in the building structure. The whole process of organisation and execution of modular timber building projects is explored. In the last chapter, examples of successful implementations from different areas are given, with a closer focus on the situation in the Czech Republic.

Keywords

modular, timber building, sustainability, efficiency, timber, module, prefabrication

Obsah

Úvod	8
1 Modulární konstrukce	9
1.1 Historie a vývoj	9
1.2 Typy modulárních konstrukcí	11
1.3 Výhody a nevýhody	12
2 Dřevo jako stavební materiál.....	14
2.1 Udržitelnost	14
2.2 Stavebně fyzikální vlastnosti	15
2.3 Mechanické vlastnosti	16
2.4 Vady dřeva	16
2.5 Dřevěné stavební prvky	17
2.5.1 Lepené lamelové dřevo	17
2.5.2 Vrstvené dřevo	20
2.6 Konstrukční systémy	23
3 Modulární dřevostavby	27
3.1 Historie a vývoj	27
3.2 Dřevěný modul	28
3.2.1 Základní konfigurace	28
3.2.2 Konstrukční systém	30
3.2.3 Akustika	32
3.2.4 Požární odolnost	32
3.2.5 Technická zařízení	33
3.3 Vnější konstrukce	34
3.3.1 Obvodový plášť	34
3.3.2 Předsazené konstrukce	34
3.3.3 Střecha	35
3.3.4 Základy	35
3.4 Výstavba s moduly	36
3.4.1 Navrhování s moduly	37
3.4.2 Nosnost modulů	37
3.4.3 Statické spolupůsobení modulů	39
3.4.4 Přístupy k modularitě	39

3.4.5	Využití modulů k přístavbě	40
3.5	Organizace modulárních projektů	41
3.5.1	Návrh	41
3.5.2	Výroba	42
3.5.3	Logistika	43
3.5.4	Montáž	44
4	Případové studie	46
4.1	Česká republika	46
4.2	Alpské státy	50
4.3	Skandinávie	52
	Závěr	58
	Reference	59
	Seznam obrázků	64

Úvod

Stavební průmysl je zodpovědný za značné množství emisí uhlíku, odpadů a vyčerpávání zdrojů, což vede k rostoucímu zájmu o udržitelné a efektivní stavební metody, které mohou pomoci tyto problémy řešit. Jedním z přístupů, který si v posledních letech získal oblibu, je modulární výstavba. Ta spočívá ve výstavbě konstrukcí v modulech mimo staveniště a jejich následnou montáží na místě. Modulární výstavba má mimo jiné potenciál snížit množství odpadu, zvýšit efektivitu a zlepšit kontrolu kvality.

Dřevo se zároveň stalo univerzálním a udržitelným stavebním materiálem, který může nabídnout několik výhod oproti tradičním stavebním materiálům. Je obnovitelné, má nízkou uhlíkovou stopu a lze jej použít pro různé aplikace, od rámování po obklady a další. Navíc lze skvěle kombinovat s dalšími stavebními materiály jako je ocel a beton, v případech, že materiálové vlastnosti samotného dřeva nestačí.

Kombinace modulární výstavby se dřevem má potenciál vytvořit udržitelnou a efektivní stavební metodu, která může pomoci řešit problémy, jimž stavebnictví čelí. Modulární dřevostavby lze použít pro různé účely, včetně obytných, komerčních a institucionálních budov, jako jsou školy a zdravotnická zařízení. Navzdory rostoucímu zájmu je však stále zapotřebí dalšího výzkumu a analýzy, abychom plně pochopili výhody a omezení této stavební metody.

Cílem této práce je přispět k pochopení modulárních dřevostaveb zkoumáním výhod a nevýhod, popisem procesu navrhování a výstavby modulů a analýzou stávajících modulárních dřevostaveb. Tímto způsobem se tato práce snaží přispět do oblasti udržitelného a efektivního stavebnictví.

1 Modulární konstrukce

1.1 Historie a vývoj

Modulární výstavba je velmi úzce spjata s prefabrikací, která má velice dlouhou historii. Ta sahá až do 17. století, kdy se začaly ve Spojených státech používat prefabrikované dílce, které pak byly na stavbě instalovány. Počátkem 20. století už to byly celé prefabrikované domy, které se daly objednat z katalogu americké firmy Sears, Roebuck and Company. Domů zákazníkovi pak přišel balík se všemi součástkami potřebnými ke stavbě domu. Další využití se ukázalo během Druhé světové války, kdy byly vojáci ubytováni v jednoduše sestavitelných a přemístitelných kasárnách. Po válce byly ve Spojených státech zase budovány obrovská předměstská sídliště prefabrikovaných domů pro vojáky vracející se z války. V této době se objevují i první moduly, v podobě obytných přívěsů tzv. house trailers nebo také mobile houses. Velice populární pro nižší třídu ve Spojených státech, kde z těchto pojízdných domků vznikala sídliště, kde lidé dodnes bydlí. Bohužel tento typ bydlení vstoupil do podvědomí většiny společnosti jako typický příklad modulové výstavby, levné, nezajímavé a málo prostorné. [1]

První opravdové využití modulové konstrukce bylo prezentováno až v roce 1967 na Expu 67 v Montréalu. Izraelsko-kanadský architekt Moshe Safdie pro tuto příležitost nechal postavit velký bytový komplex, s názvem Habitat 67, sestávající se z betonových modulů poskládaných různě na sebe. Přestože to bylo umělecké dílo, inspiroval tím ostatní, že takovéto moduly lze využít kdekoliv pro různé účely.



Obr. 1 - Habitat 67 [2]

V 90. letech 20. století začala být modulární výstavba populární pro její příhodnost, nízké náklady a efektivitu. Budovy stavěné z více modulů dávaly více možností pro kreativitu, byly prostornější a celkově atraktivnější pro spotřebitele, kteří byli odstrašeni představou obytného přívěsu. Od té doby se modulární výstavba vyvinula a zahrnuje celou řadu typů budov, od obytných a komerčních až po zdravotnická a vzdělávací zařízení. [1]

Velkým krokem bylo zjištění, že se moduly dají velmi efektivně stavět na sebe do vícepatrových objektů. Od roku 2021 se v Londýně tyčí 101 George Street, zatím nejvyšší modulární stavba na světě o výšce 135 metrů a 44 patrech. Tento rekord si ovšem udrží už jen krátkou chvíli, protože jen pár desítek metrů vedle se staví další modulární výšková budova College Road, která je projektována na 50 pater s celkovou výškou 150 metrů. [3]



Obr. 2 - 101 George Street a za ní stavba College Road [3]

1.2 Typy modulárních konstrukcí

Modulární konstrukce by mohly být rozděleny podle stupně prefabrikace na objemové a panelové. Objemová modulární výstavba zahrnuje stavbu celých 3D stavebních modulů, včetně stěn, podlah a střech, mimo staveniště a je to ta modulární výstavba ve své podstatě. Teoreticky by se ale mohly modulárními konstrukcemi nazvat i stavby z panelů, jelikož prefabrikovaný panel je také modul, pouze dvojdimenzionální. Panelová modulární výstavba zahrnuje konstrukci panelů, jako jsou stěnové nebo podlahové panely mimo staveniště a jejich následnou montáž na staveništi za účelem vytvoření budovy. Oba typy modulární výstavby nabízejí výhody z hlediska času, nákladů a kontroly kvality, ale jejich použití je jiné v závislosti na typu a umístění budovy.

Dále by mohly modulární stavby být rozlišeny podle toho, k čemu a jak dlouho budou sloužit, na stavby trvalé a stavby přemístitelné, resp. dočasné. Trvalá modulární výstavba zahrnuje výstavbu konstrukcí, které mají zůstat na jednom místě po celou dobu své životnosti a je to typ, kterému se budu věnovat především v této práci. Tento typ výstavby se obvykle používá pro větší budovy, jako jsou školy, nemocnice a kancelářské budovy, ale také rodinné a bytové domy. [4]



Obr. 3 - Dočasné kontejnerové obchodní centrum Re:START po zemětřesení ve městě Christchurch na Novém Zélandě [5]

Přemístitelná modulární výstavba naproti tomu zahrnuje stavební konstrukce, které lze snadno demontovat a přemístit na jiné místo. Tento typ se často používá v nouzových situacích, například při přírodních katastrofách. Po hurikánu, zemětřesení nebo jiných přírodních katastrofách je často potřeba dočasné bydlení, školy, zdravotnické zařízení, ale také

kanceláře a obchodní prostory. Přemístitelné modulární budovy lze rychle a snadno rozmístit a poskytnout dočasné přístřeší a služby osobám postiženým katastrofou. Tyto budovy lze také podle potřeby přemístit do jiných oblastí, což z nich činí flexibilní a přizpůsobivé řešení v nouzových situacích. Oba typy modulární výstavby nabízejí výhody, jako je úspora nákladů, lepší kontrola kvality a kratší doba výstavby. Volba mezi trvalou a přemístitelnou modulární výstavbou závisí na konkrétních potřebách a požadavcích projektu. Dala by se rozlišit řada dalších typů modulárních konstrukcí, podle materiálu, použitých prvků či konstrukčního systému, ale tomu se konkrétněji budu věnovat v dalších kapitolách. [4]



Obr. 4 - Nouzové ubytovací moduly pro lidi postižené zemětřesením ve městě Bam v Íránu [6]

1.3 Výhody a nevýhody

Jednou z hlavních výhod modulární výstavby je její schopnost zkrátit dobu výstavby a snížit náklady. Vzhledem k tomu, že moduly se staví mimo staveniště, může výstavba probíhat rychleji a s menšími nároky na pracovní sílu na staveništi. To jednak snižuje riziko nehod nebo zranění na staveništi, zlepšuje pracovní podmínky pro stavební dělníky, ale také se to může výrazně projevit v úsporách nákladů pro majitele a investory projektů. Kromě toho může být modulární výstavba efektivnější než tradiční stavební metody, protože umožňuje stavební činnosti, jako jsou práce na staveništi a výroba modulů, aby probíhaly současně. [7] [8] [17]

Modulární výstavba nabízí také výhody z hlediska kontroly kvality. Konstruování modulů v kontrolovaném prostředí výrobní haly přináší menší riziko poškození vlivem počasí nebo vzniku chyb způsobených prací na stavbě. Kromě toho tovární výroba umožňuje větší přesnost a preciznost výstavby, což může pomoci snížit riziko chyb a zlepšit celkovou kvalitu. Výrazně to ovlivní i množství vyprodukovaného odpadu a usnadní tím jak přepravu materiálu,

tak následnou likvidaci a finální úpravu staveniště. Kromě toho také často zahrnuje použití udržitelných materiálů, při jejichž výrobě se spotřebuje méně energie a zdrojů než při výrobě tradičních stavebních materiálů. To dělá modulární výstavbu udržitelnější než jiné tradiční stavební metody. [7] [8] [17]

I přes své potenciální výhody má modulární výstavba bohužel také některá omezení. Jedním z hlavních problémů je přeprava, protože prostorné moduly je třeba na staveniště dopravit, což může být nákladné a komplikované. Moduly svými rozměry často překračují povolené rozměry vozidla pro jízdu na pozemní komunikaci. Proto je mnohdy třeba vyříditi si speciální povolení pro nadrozměrné náklady nebo převážet moduly po částech a kompletovat je až na stavbě. To ale vyžaduje více projektování a plánování předem a modularita stavby už postrádá smysl. S rozměry souvisí i další omezení, jelikož moduly mají obvykle stanovenou maximální velikost, což může omezovat možnosti návrhu větších budov nebo staveb nepravidelných tvarů. Z architektonického hlediska je návrh modulární budovy velice omezující až svazující, jelikož musí pracovat s kvádrovými bloky a nedává moc prostoru pro kreativitu. [7] [8] [17]

Určité nevýhody přináší i skutečnost, že se stále jedná o relativně nové odvětví stavebnictví. Modulární výstavba vyžaduje specializovanou pracovní sílu s dovednostmi v oblasti výroby i výstavby. To může omezit dostupnost kvalifikované pracovní síly a může být obtížnější najít kvalifikované pracovníky pro takové projekty. Problémy mohou nastat i při získávání financování, protože někteří věřitelé mohou být s touto metodou méně obeznámeni než s tradiční výstavbou. To může ztížit zajištění úvěrů nebo financování projektů modulární výstavby. [7] [8] [17]

Celkově modulární výstavba nabízí jako stavební metoda několik výhod, včetně zkrácení doby výstavby a nákladů, lepší kontroly kvality, vyšší efektivity a udržitelnosti. Nicméně má také omezení a problémy, které je třeba pečlivě zvážit, aby bylo možné určit, zda se jedná o vhodnou stavební metodu pro konkrétní projekt. [7] [8] [17]

2 Dřevo jako stavební materiál

Dřevo se jako stavební materiál používá již po staletí a jeho obliba trvá z dobrého důvodu. Dřevo je obnovitelný zdroj, a pokud se těží zodpovědně, může být udržitelným stavebním materiálem. Kromě toho je to pevný a odolný materiál, který lze ve stavebnictví využít mnoha různými způsoby od prvků rámu, přes plnostěnné panely až po obklady a podlahy.

2.1 Udržitelnost

Dřevo je považováno za ekologický stavební materiál hlavně pro svou schopnost zachycovat a ukládat oxid uhličitý tzv. sekvestrací. Tento děj prostřednictvím fotosyntézy v lesích vede k ukládání uhlíku do dřeva a do země. Vytěžené stromy lze na místě nahradit novými sazenicemi stromů, které budou nadále odebírat uhlík z atmosféry, avšak bude trvat několik let, než se příjem uhlíku výsadby vyrovná příjmu z vytěžených stromů. Pokud jde o environmentální udržitelnost, je třeba zmínit také dobrou recyklovatelnost a opětovnou použitelnost. Dřevo lze recyklovat na nové výrobky poměrně jednoduše, pokud se myslí na recyklovatelnost už během návrhu. Znovupoužitelnost stavebních materiálů po skončení jejich životnosti totiž závisí na možnosti jejich separace ve fázi demontáže. To vede k negativnímu aspektu dřeva, co se týče udržitelnosti, a to používání impregnačních látek a lepidel, při výrobě dřevěných stavebních prvků, z nichž se uvolňují těkavé organické látky a formaldehyd. Například v Rakousku již 30 let existuje firma s názvem Thoma, která se zakládá na principu využívání pouze dřeva ke konstrukci svých projektů. Pro výrobu jednotlivých stavebních prvků nevyužívá lepidlo, ale mnohem tradičnější metodu, a to čepování. Náročnější a dražší na výrobu, ale zato naprosto šetrné k životnímu prostředí. Pokud už nelze materiál využít znovu, energii obsaženou ve dřevě lze spalováním využít k výrobě tepla a elektřiny. Spalovat se mohou i veškeré vedlejší produkty při zpracování dřeva k výrobě stavebních prvků jako jsou piliny či kůra. [9] [10] [13] [16]

Při pohledu na dřevo jako udržitelný zdroj stavebního materiálu z hlediska nadměrné těžby a odlesňování dojdeme k různým závěrům. Odlesňování je globální problém, kterým je třeba se zabývat, ale dochází k němu převážně na jižní polokouli v rozvojových zemích za účelem získání zemědělské plochy, ať už pro chov dobytka či plantáže palmy olejné. Nicméně k tomu nedochází kvůli získání dřeva. V rozvinutých zemích Severní Ameriky, Evropy či Východní Asie je trend obrácený, zalesněných ploch zde přibývá. Například v České republice za rok 2021 přibýlo rekordních 40 679 hektarů zalesněné plochy, což je nejvyšší hodnota v novodobé historii státu. Musí se přihlídnout k faktu, že zde probíhalo intenzivní zalesňování po kúrovcové kalamitě, to ale nic nemění na tom, že každý rok je plocha zalesněná větší než plocha odlesněná, a že lesy průměrně zabírají třetinu celé rozlohy České republiky. Takže pro Českou republiku a pro mnoho ostatních evropských i mimoevropských zemí je dřevo skutečně udržitelným zdrojem stavebního materiálu. [11] [12] [16]

PRINCIP UDRŽITELNÉHO STAVITELSTVÍ

KASKÁDOVÝ PRINCIP VYUŽÍVÁNÍ DŘEVA



Obr. 5 - Životní cyklus dřeva [13]

2.2 Stavebně fyzikální vlastnosti

Dřevo má dobré tepelně izolační vlastnosti, ale jeho tepelná vodivost a schopnost akumulace tepla se mění v závislosti na vlhkosti a směru vláken. Hodnota tepelné vodivosti rovnoběžně s vlákny může být dokonce dvakrát vyšší než v kolmém směru. Dřevo je také hygroskopický materiál, což znamená, že může měnit své rozměry pohlčováním a uvolňováním vlhkosti. Trvanlivost dřevěných staveb úzce souvisí s vlhkostí. Nejkritičtějšími částmi budovy jsou vnější dřevěné konstrukce a vnitřní dřevěné konstrukce vystavené vysoké vlhkosti. Vhodné větrání a vysoušení dřeva a správný hygrotermický návrh obvodového pláště a detailů jsou základem pro předcházení problémům s vlhkostí souvisejícím s napadením dřevokaznými houbami a hmyzem. Pro zlepšení odolnosti vůči vlhkosti lze využít i chemické ochrany jako je impregnace či nejrůznější postřiky, ale měla by se uvažovat skutečně pouze jako dodatečná ochrana ke správnému návrhu. [15] [16]

Akustické vlastnosti dřeva jsou méně dobré, protože je lehké. Rychlost zvuku ve stavebním materiálu přímo souvisí s jeho Youngovým modulem a hustotou. Nezávisí na druhu dřeva, ale mění se podle směru vláken, takže spojením dvou vrstev vláken s různou hustotou lze dosáhnout dobrých akustických vlastností. U dřevěných stěn a podlah je tedy velmi důležité, jak jsou jednotlivé vrstvy orientovány, jak jsou mezi sebou spojeny a také jak jsou celé konstrukce ukotveny. Z hlediska vzduchové neprůzvučnosti mají panely CLT dobrou povrchovou hmotnost, takže kritickým místem jsou spáry mezi panely. U vícevrstvých lehkých konstrukcí se dá využít vláknité izolace pro pohlcování zvuku. [14] [15]

Požární odolnost dřeva v budovách je ve stavebnictví velmi horkým tématem, na které se intenzivně zaměřuje další výzkum. Dřevo je hořlavý materiál, a proto je jeho požární odolnost rozhodující pro zajištění bezpečnosti obyvatel a ochranu budovy před potenciálním nebezpečím požáru. Proto by mnohé překvapila skutečnost, že požární odolnost dřeva

s nárůstem teplot je vyšší než u oceli. Při vystavení dřeva ohni dochází k procesu zvanému zuhelnatění, při kterém se na povrchu dřeva vytvoří ochranná vrstva, která zpomaluje rychlost hoření. Zuhelnatělá vrstva izoluje dřevo pod ní a snižuje množství tepla přenášeného na nespálené dřevo. Díky tomuto procesu může dřevo získat určitý stupeň přirozené požární odolnosti. Nicméně skutečná požární odolnost závisí na velikosti, tloušťce a druhu použitého dřeva a také na konkrétním použitém konstrukčním systému. Pro zvýšení požární odolnosti dřeva v budovách je k dispozici několik úprav a nátěrů. Tyto úpravy mohou zahrnovat chemickou impregnaci protipožárními chemikáliemi nebo nátěry intumescentní barvou, která se při působení tepla rozpíná a vytváří na dřevě izolační pěnovou vrstvu. Kromě toho stavební předpisy a normy předepisují specifické požadavky na požární bezpečnost dřevěných konstrukcí, jako jsou minimální hodnoty požární odolnosti pro různé typy budov a požárních úseků. Tyto normy v České republice rovněž limitují maximální požární výšku budov s hlavní nosnou konstrukcí ze dřeva na 12 metrů. [15] [16]

2.3 Mechanické vlastnosti

Z konstrukčního hlediska je největší výhodou dřeva jeho příznivý poměr pevnosti k hmotnosti. Je totiž srovnatelný s ocelí, a dokonce pětikrát vyšší než u betonu. Ve skutečnosti má dřevo velmi podobné vlastnosti jako beton v tlaku i tahu, ale při tom je pětikrát lehčí. Dřevo se také vyznačuje dobrou pružností, což je výhodou výhradně při montáži na staveništi. Díky těmto vlastnostem je také vhodné pro použití v seizmických oblastech. Nicméně není duktilní v tahu a tlaku, a proto je často potřeba spojit dřevo s tvárnými materiály, obvykle ocelí, použitou pro spoje nebo pro jiné konstrukční prvky. [15] [16]

Další nevýhoda dřeva pro konstrukční aplikace souvisí s jeho ortotropním chováním. Má dobrou odolnost v tahu i tlaku ve směru vláken a nižší odolnost kolmo na vlákna. Nedostatky související s nehomogenitou materiálu lze částečně překonat úpravou dřeva do jednotlivých dřevěných stavebních prvků s ortogonálně izotropním chováním. Další nevýhodou je viskozita spojená s vlhkostí a nasákavostí vody, která může způsobit nadměrné trvalé vertikální posuny a napětí. Pevnost dřeva je silně závislá na době působení zatížení a vyznačuje se vyšší odolností vůči krátkodobému zatížení než vůči dlouhodobému. [15] [16]

2.4 Vady dřeva

Ačkoliv jistě převažují výhody, dřevo má i své negativní vlastnosti. Většina z nich je zaviněna tím, že dřevo je přírodní heterogenní materiál, který roste v lese a není vyroben v laboratoři nebo průmyslové hale. Na vlastnosti dřeva mají během růstu stromu vliv všechny atmosférické vlivy jako je vlhkost, sluneční záření, teplota, dokonce i nadmořská výška. Tento přírodní charakter dřeva způsobí to, že dřevo, které chceme využít pro stavební účely obsahuje vady, které znehodnocují jeho vlastnosti a dělají z něj nepoužitelný materiál. Jednou z hlavních vad jsou suky neboli vrostlé základy větví. Pokud dosahují větších velikostí a jsou na špatném místě, silně to ovlivňuje statické vlastnosti daného prvku. Stejně tak působí i trhliny, které mohou vzniknout vlivem mrazu. Křivý růst kmene zase způsobí odklon vláken od podélného

směru. Další výrazná negativní vlastnost dřeva je nepochybně jeho nasákavost. Dřevo po pokácení dosahuje až 120% absolutní vlhkosti, což je poměr hmotnosti vody a suché dřevní hmoty. Aby se dřevo mohlo využít pro stavební účely, je třeba ho vysušit tak, aby absolutní vlhkost dosahovala maximálně 14 %. Pokud vlhkostní situaci nebude kontrolována, může dojít k tzv. vlhkostním deformacím. K sesychání dřeva dochází při snižování obsahu vlhkosti tzv. desorpci pod bod nasycení vláken. Při odpařování vody z dřeva se mezi buněčnými stěnami tvoří větší mezery a dochází k ústupu mezi nimi. V důsledku toho se dřevo smršťuje a může dojít k deformaci, trhlinám nebo dokonce k rozpadnutí. Opačným jevem je bobtnání, kdy dřevo nasává vlhkost až do bodu nasycení vláken. Voda se vstřebává do buněčné struktury a způsobuje, že se dřevo rozpíná. Pokud je toto rozpínání větší než pevnost dřeva, může dojít k trhlinám, deformaci a dalším poškozením. Vlhkostní deformace se projevují výrazně ve směru kolmým na vlákna, tedy radiální a tangenciální, a zanedbatelně ve směru vláken. Poslední výraznou vadou je chování dřeva při dlouhodobém zatížení. Pružnou deformaci je možné sledovat ihned po zatížení, trvalou po odlehčení, ale pak ještě nastává zpožděná deformace tzv. dotvarování. Ta může být často větší než původní pružná deformace. Dřevo je náchylnější k dotvarování s rostoucí vlhkostí a nárůstem napětí. Dotvarování a ortotropie dřeva jsou dvě hlavní příčiny proč musíme návrhové pevnosti dřeva uvažovat jen jako malý zlomek jeho pevností mezních. [15][16]

2.5 Dřevěné stavební prvky

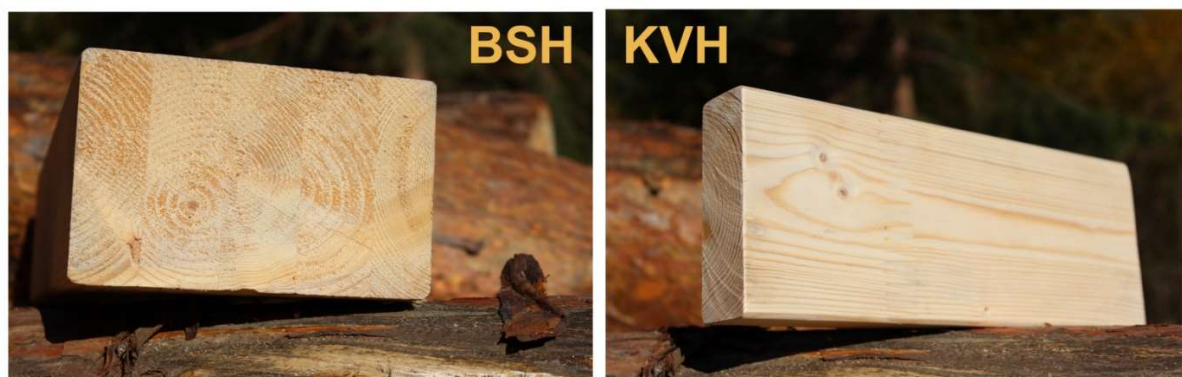
Dřevěné stavební prvky se vyrábějí zpracováním dřeva různými způsoby tak, aby vznikly materiály se specifickými vlastnostmi a charakteristikami. Při prvním opracování kulatin na pile vzniknou jediné čistě dřevěné prvky, které jsou ve stavebnictví stále hojně využívány. V současnosti však tato tradiční řeziva jako jsou hranoly, prkna a fošny už samotné nestačí. Existuje už celá řada materiálů, které kombinují dřevo s jinými surovinami. Motivací pro takovou kombinaci je mnoho, například zvýšení výtěžnosti surového dřeva, potlačení nechtěných vlastností dřeva a zejména zlepšení mechanických vlastností. Materiály kombinující dřevo s jinými surovinami mohou obsahovat dřevo v různých formách a množstvích. Nejběžněji používané jsou tradiční řeziva, dýhové listy, třísky, štěpky, vlna nebo vlákna. Dřevěné stavební prvky bychom mohli rozdělit podle toho s jakou surovinou ho kombinujeme a vznikly by nám dvě hlavní skupiny. Dřevěné prvky kombinované s materiály na minerální bázi a dřevěné prvky s organickými pojivy. [18]

2.5.1 Lepené lamelové dřevo

Nejvýznamnější skupinou konstrukčních prvků kombinovaných s organickými pojivy je bezpochyby lepené lamelové dřevo (LLD), v anglicky mluvících zemích známé taky pod názvem glulam (glued laminated timber). Lepené lamelové dřevo je modifikované masivní dřevo, u něhož je oslabující vliv růstových vad do značné míry eliminován. Typicky se vyrábí z jehličnatého dřeva lepeného pod tlakem rovnoběžně s vlákny. Lepidlo je třeba vybrat podle potřebné odolnosti proti vodě. Pokud se nevyžaduje voděodolnost, používají se lepidla ze syntetických pryskyřic na bázi močovinoformaldehydu. Lepený spoj má světlou barvu a je

sotva rozeznatelný od dřeva. Pokud je požadováno vodovzdorné lepení, musí se použít lepidla ze syntetických pryskyřic na bázi fenolu nebo resorcinu. Lamináty se po slepení suší a hoblují. Všechny přirozené vady, jako jsou nadměrně velké suky, jsou mechanicky odstraněny. Lepené lamelové dřevo, které je přímo vystaveno povětrnostním vlivům, vyžaduje dodatečné chemické ošetření olejnatými prostředky na ochranu dřeva. [16] [18]

Stavební prvky je třeba rozdělit i podle převažujících rozměrů, na prvky tyčové a prvky deskové. U lepeného lamelového dřeva mají největší využití z tyčových prvků lepené nosníky KVH a BSH. Oba typy jsou lepené hranoly, ale vyrábějí se různými způsoby a mají různé vlastnosti. [18]



Obr. 6 - Srovnání hranolů BSH a KVH [21]

KVH, zkratka německého slova Konstruktionsvollholz, přeloženo jako konstrukční stavební dřevo, se vyrábí slepením několika kusů masivního dřeva, pomocí klínových zubovitých spojů, čímž se vytvoří delší a pevnější prvky v porovnání s tradičním řezivem. Obvykle se vyrábí ze středových částí kmene smrku, borovice nebo jedle, které jsou důkladně technicky vysušeny na vlhkost pohybující se okolo 15 %. Většinou jsou vyráběny do průřezu 100/240 mm a jsou hojně využívány pro nosné prvky, jako jsou nosníky, sloupy nebo vazníky v dřevostavbách. Pro potřeby větších rozměrů se většinou používají hranoly BSH. [18] [21]



Obr. 7 - Klínovitý zubovitý spoj KVH hranolů [21]

Tato zkratka také pochází z němčiny, a to ze slova Brettschichtholz, což volně přeloženo znamená lepené lamelové dřevo. Proces výroby tomu také odpovídá, jelikož se vyrábí plošným lepením tenkých vrstev dřeva tzv. lamel, za účelem vytvoření větších a pevnějších nosníků. Díky tomu má BSH rovnoměrnější a konzistentnější strukturu, což může být vizuálně přitažlivější než KVH. Další rozdíl spočívá v jejich vlastnostech. BSH má obvykle vyšší pevnost

a tuhost než KVH, takže je vhodná pro použití ve větších a složitějších konstrukcích jako jsou mosty a haly. Rozměry BSH prvků mohou dosahovat rozměrů 280/2200 mm v průřezu a do délky až neuvěřitelných 24 metrů. BSH je však také obvykle dražší než KVH, což ho může činit méně vhodným pro menší projekty. [18]

Mezi lamelové lepené deskové prvky patří například spárovka, laťovka nebo překližka. Jedná se o prvky vyrobené z relativně velkých dřevěných prvků zachovávající si vlastnosti surového dřeva, proto bych je stále řadil mezi lepené lamelové výrobky. Spárovka je deska vyráběná podélným slepením lamel, převážně hranolů menších rozměrů. Laťovka je pouze dále upravovaná spárovka. Po celé ploše obou stran spárovky je nalepena dýha, která prvků dodává spíše vizuální význam než strukturální. Je hojně používaná ve skladbě podlah a výrobě nábytku. Asi nejdéle využívaným deskovým prvkem je překližka. Jedná se o desku vyráběnou z lichého počtu loupaných dých o tloušťkách 2 až 4 mm, přičemž každá vrstva je vůči sobě otočená o pravý úhel. Tento způsob vrstvení reguluje heterogenost mechanických vlastností a omezuje vlhkostní přetvoření v rovině desky. Překližky se musí skládat minimálně ze tří vrstev, ale pro jakékoliv konstrukční využití, například v konstrukci lehkého skeletu, je vyžadována minimální tloušťka 8 mm. Obzvláště důležitým prvkem pro tuto práci jsou masivní dřevěné křížem lepené panely, známé též jako CLT (cross-laminated timber). Jedná se o vrstvené panely se stejným principem jako překližka, tedy střídáním orientace vrstev, ale s použitím tradičního řeziva, především prken. Tím dostává vynikající mechanické vlastnosti a je možné ho využívat jako nosný prvek. Jelikož se jedná o jeden z nepopulárnějších konstrukčních systémů v rámci dřevěné modulární výstavby, rozvedu toto téma ještě více v dalších kapitolách. [16] [18]



Obr. 8 - CLT panely [22]

2.5.2 Vrstvené dřevo

Další významnou skupinou prvků, co využívají organická pojidla, jsou výrobky z vrstveného dřeva. V podstatě by se dalo tvrdit, že také spadají pod anglický pojem glulam, ale pro výrobu těchto prvků se nevyžívá masivní dřevo, pouze dýhy, odštěpky či piliny, tedy vedlejší produkty při zpracování dřeva. Tento způsob zpracování dřeva vzniknul převážně v USA, kde jím chtěli zvýšit výtěžnost dřeva. Kromě ekonomičnosti, je tato metoda ale i velice výhodná co se týče mechanických vlastností. Použitím menších kusů dřeva, jako jsou dýhy a třísky, a jejich kombinací s lepidlem pod vysokým tlakem lisu, vzniká homogenizovaný materiál s vyšší pevností, než je pevnost dřeva použitého k jeho výrobě. Je to tedy další šikovný způsob, jak se vypořádat s přírodní nepravidelností dřeva a vadami, které přináší. [18]

Existují čtyři druhy tyčových prvků, které jsou v současnosti s oblibou využívány jako nosníky, trámy či sloupy. Tyto výrobky jsou nejpobulárnější v USA, ale už jsou poměrně rozšířené i v Evropě. LVL prvky (z anglického laminated veneer lumber), v USA známé jako Microllam, v Evropě zase jako Ultralam, jsou vyráběny vrstvením tenkých dřevěných dýh pomocí lepidla a jejich spojováním za tepla a tlaku. Dýhy jsou tlusté zpravidla 2 až 3 mm a na rozdíl od překližky jsou orientované souhlasně, za účelem zvýšení pevnosti v jednom směru. V USA tento druh výrobku představila firma Trus Joists MacMillan, právě pod jménem Microllam, kde k výrobě využívali dřevo z douglasky nebo žluté borovice. V Evropě tento typ dřevěného produktu představila finská firma Finnforest pod jménem KERTO a k jeho výrobě využili dřevo ze severského smrku. V Německu později začala LVL vyrábět i firma Steico, která svůj produkt pojmenovala Ultralam. [16] [18] [20]



Obr. 9 - Zleva: LVL, PSL, LSL [23] [24] [25]

Dalším výrobkem, co využívá metody vrstvení je PSL (z anglického parallel strand lumber), v USA též známé pod obchodním názvem Parallam. Tyto hranoly jsou vyráběny z dýh douglasky či borovice žlutokoré. Dýhy se ale ještě rozřezají na proužky široké asi 15 mm a až poté jsou v rotačním kontinuálním lisu podélně slepeny. PSL vykazuje ze všech lepených dřevěných prvků nejlepší výsledky, co se týče stejnorodosti, zatížitelnosti a rozměrové stálosti. Velmi podobnou technologii využívají i prvky LSL (z anglického laminated strand lumber), v USA známé jako Intrallam. K výrobě jsou ale využívány výhradně osikové třísky, které jsou podélně orientované lisovány do různých průřezů, jako například hranoly, ale i desky. [16] [18] [20]

Velice zajímavým prvkem z vrstveného dřeva jsou nosníky TJI. V podstatě se jedná o nosník s I profilem, ale ocel je nahrazena dřevěnými prvky. Pásnice bývají zpravidla z LVL či KVH hranolu, a ty jsou spojeny stojnou z OSB desky nebo překližky. Prvky jsou spojeny velkou rychlostí pod velkým tlakem, čímž vytvoří velice lehký, ale únosný prvek s vysokou rozměrovou stabilitou. V dřevostavbách najde široké zastoupení například ve skladbě střech či podlah, jelikož může dosahovat délek až 20 m. [16] [18] [20]



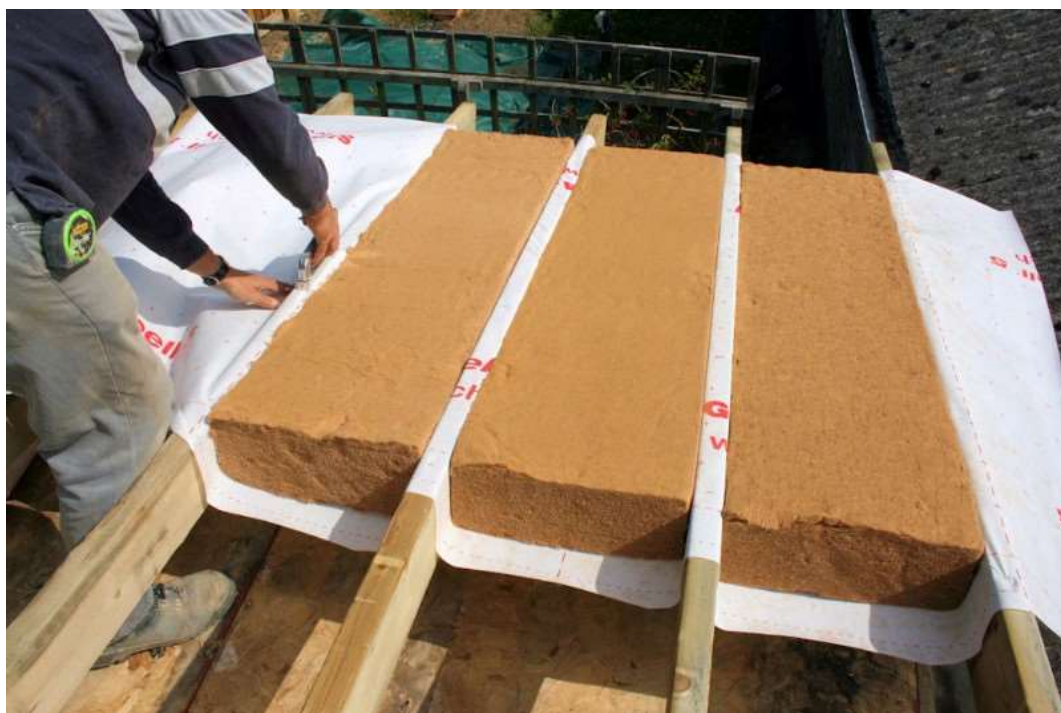
Obr. 10 - Nosníky TJI [26]

Deskové prvky z vrstveného dřeva by se daly rozdělit ještě podle velikosti dřevních částic, které jsou k jejich výrobě použity, na desky dřevotřískové a dřevovláknité. Oba typy jsou velice populárním materiálem, díky jejich výhodným poměrům mezi cenou a užitnými vlastnostmi. Z dřevotřískových desek je určitě neznámější deska OSB (z anglického oriented strand board), v překladu deska z orientovaných třísek. Využívá se zde stejného principu jako u prvků PSL či LSL, a to orientování třísek jedním směrem pro zvýšenou pevnost. Na vnějších stranách desky jsou třísky orientovány ve směru delší strany a v jádru zase ve směru strany kratší. Toto rozložení také způsobuje, že OSB desky mají v podélném směru vyšší pevnost než v tom příčném. V České republice mají dlouhou tradici i desky z náhodně orientovaných třísek. Z třísek je vytvořen koberec, kde jemnější třísky jsou ukládány do vnějších vrstev a hrubší třísky do jádra desky. Tyto desky jsou jednodušší a levnější na výrobu, ale zase se to promítne na slabších mechanických vlastnostech. Dřevotřískové desky se používají zejména jako opláštění ve skladbách stěn a podlah nejen dřevostaveb, ale silnější OSB desky jde využít i v méně namáhaných pláštích stropů a střech. [16] [18]

Dřevovláknité desky mají mnoho podob a dělíme je podle hustoty na desky měkké, polotvrdé a tvrdé, s hustotou nad 900 kg/m³. Výjimkou je středně tvrdá vláknitá deska, která nezapadá ani do jedné kategorie, jelikož se k její výrobě používá suchý postup. Pro výrobou všech dřevovláknitých desek se používají vlákna dřeva nebo jiné lignocelulózové materiály, které částečně přispívají i k adhezi materiálu, pokud vyrábíme mokřím postupem. Při suchém výrobním postupu se vlákna vysuší a je na ně nanášeno organické pojivo. Následně je z nich vytvořen koberec, který je poté lisován a klimatizován na absolutní vlhkost 8 %. Výsledkem je polotvrdá vláknitá deska s označením MDF (medium density fibreboard), která má skvělé mechanické vlastnosti. Při mokřím výrobním procesu se vlákna promíchají s horkou vodou,

přidají se pojidla a další příměsi a vytvoří se koberec, který se nechá odvodnit na 65 % vlhkosti. Po vychladnutí a usušení nám zbyde měkká deska. Vysokoteplotním lisováním se pak vyrábí desky polotvrdé a tvrdé. Měkké desky jsou výhradně využívány pro své tepelněizolační vlastnosti jako akustické či tepelné izolace v kontaktních zateplovacích systémech dřevostaveb. Kvůli své malé pevnosti nemají žádné konstrukční využití. Polotvrdé desky se využívají ve skladbě stropů, střech nebo stěn a tvrdé desky mají použití například jako obklady nebo stojny TJI nosníků. [16] [18]

Měkké dřevovláknité desky dokazují, že dřevěné prvky nemusí nutně sloužit pouze ke strukturálním či okrasným účelům, ale také izolačním. Dřevěná vlákna totiž není třeba formovat do desek pro využití jejich tepelně a akusticky izolačního potenciálu, ale je možné je do konstrukce integrovat i v podobě dřevovláknité hmoty. Buď se dají do konstrukce dopravit hadicí se stlačeným vzduchem nebo se při prefabrikace stěnového panelu vkládají mezi sloupky rámové konstrukce. Pro firmy zabývající se prefabrikovanými či modulárními dřevostavbami, které chtějí své projekty zhotovovat výhradně ze dřeva, je toto velice atraktivní alternativa tepelné izolace. S tepelnou vodivostí $\lambda = 0,045$ až $0,055$ W/mK jsou dřevěná vlákna srovnatelná s izolačními materiály na bázi minerálních vláken. Jedinou nevýhodou je, že je tento materiál vysoce hořlavý. [16] [18] [27]



Obr. 11 - Měkké dřevovláknité desky [27]

Prvky kombinující dřevo s materiály na minerální bázi jsou výhradně prvky deskové. Asi nejvyužívanější jsou desky sádrokartonové, zkráceně SDK, ale není to pro jejich pevnost. Nejčastěji jsou využívány pro vnitřní obklady konstrukcí, ale dají se z nich vytvořit i sendviče, které najdou využití například v suchých plovoucích podlahách dřevěných budov. Sádrovec použitý pro jejich výrobu jim dodává dobré protipožární vlastnosti. Vyrábí se ve více variantách, podle toho, pro jakou funkci desku chceme. Různými příměsemi se dají vylepšit

specifické vlastnosti jako požární či vlhkostní odolnost. Pro lepší mechanické vlastnosti lze sádrovec zkombinovat s dřevěnými třískami či papírovými nebo skleněnými vlákny. Vzniknou nám tím sádrovláknité nebo sádrotřískové desky, které díky vyšší ohybové tuhosti mohou být kromě obkladů využívány i jako konstrukční pláště ve smykových stěnách. [16] [18]

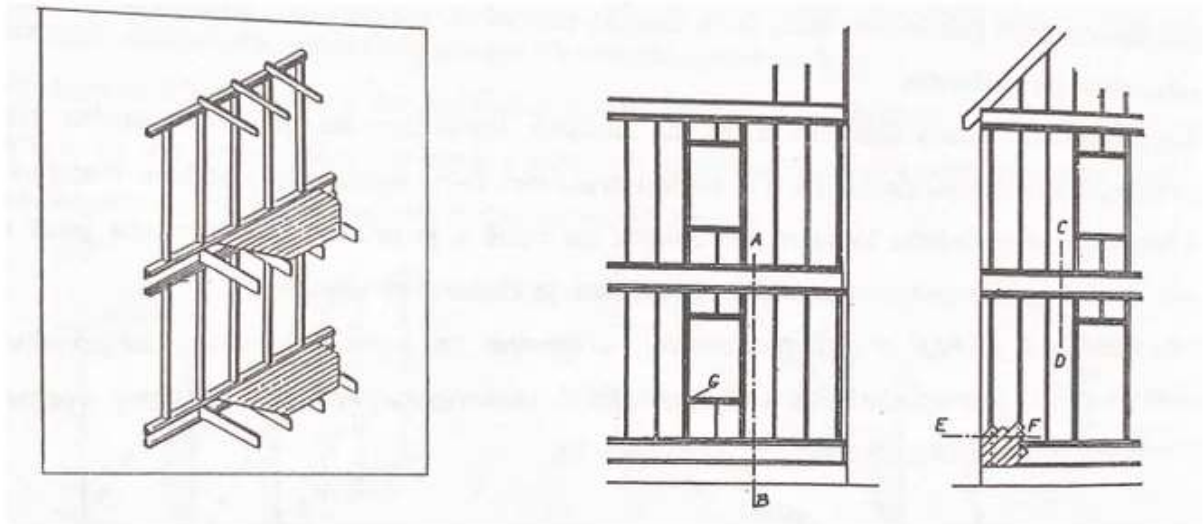
Po sádrovci se dřevo nejčastěji kombinuje s cementem, který slouží jako pojivo. Dřevěné třísky či vlákna se použijí jako plnivo a vzniká pevný stavební materiál se zajímavými vlastnostmi. Podle jemnosti dřevěné složky můžeme rozdělit desky cementotřískové a cementovláknité. Cementotřískové desky mají poměrně široké spektrum využití, jelikož disponují dobrými mechanickými vlastnostmi tak i tepelně a akusticky izolačními. Cementová složka dodává deskám i vysokou odolnost proti vlhkosti a také protipožární odolnost. Tam kde se sádrokartonová deska už nedá použít z důvodu malé únosnosti či nedostatečné odolnosti proti vlhkosti, lze bezpečně použít cementotřískovou desku. Využívají se jako nosné vrstvy podlah, staticky účinné opláštění rámových dřevostaveb, ale i vrstvy střech nebo vnější části odvětrávané fasády. Cementovláknité desky díky jemnějším částicím mají velmi homogenní strukturu. Používají se jako obklady nebo dokonce i jako střešní krytiny. Za zmínku určitě stojí materiál, který se u nás velmi běžně používá už od 30. let 20. století. Heraklit, deska kombinující cement s dřevitou vlnou, má skvělé akustické vlastnosti a v období funkcionalismu byl velmi oblíbeným prvkem, který byl v interiérech často přiznaný. I v současnosti je populární pro pohledové aplikace, jelikož v interiérech působí industriálním dojmem. [16] [18] [19]

2.6 Konstrukční systémy

Stejně jako se vyvíjely modernější a pevnější stavební prvky popsané v předchozí kapitole, tak se vyvíjelo i jejich využití a integrování do nosných systému, a to vedlo k rozvoji různých konstrukčních metod. Obecně existují tři hlavní typy nosných konstrukčních systémů využívaných pro konstrukci dřevěných modulů. Nejvyužívanější tradiční metodou je jistě sloupkový systém, též známý jako lehký dřevěný skelet nebo lehká rámová konstrukce. Druhý tradiční systém je těžký dřevěný skelet, který využívá masivnější prvky. A nejnovější a zároveň velmi populární metodou jsou panelové systémy, jako třeba CLT panely.

Lehkému skeletu se v anglicky mluvících zemích přezdívá „two by four“, což naráží na rozměry fošnového profilu, který je ke stavbě rámových konstrukcí nejčastěji využíván. Ten má průřez 2 x 4 palce což je přibližně 50 x 100 cm, ale tyto rozměry nejsou nijak závazné. Dnes se nejčastěji používají KVH profily 60 x 90 mm až 60 x 120 mm. Jednotlivé sloupky jsou většinou nahuštěné na sobě. Základní modul je velmi často rozteč 625 mm. Volné prostory mezi sloupky jsou obvykle vyplněny izolačním materiálem a konstrukce je ztužena v rovině stěny deskami na bázi dřeva. Existují tři základní typy lehkého skeletu, a to Balloon frame, modifikovaný Balloon frame a Platform frame. Hlavní rozdíl mezi těmito typy je především v konstrukčním řešení navazujícího podlaží. [16] [28] [30]

Balloon frame se od modifikovaného liší tím, že sloupky probíhají po celé výšce stěny, zatímco v modifikovaném jsou na každém patrovém prahu přerušeny. Průvlaky nesoucí stropní konstrukci jsou na sloupky připevněny z boku. Velká vzpěrná délka sloupek je většinou vyřešena podélným ztužením. Modifikovaný Balloon frame má průběžný pouze sloupek rohový, na který je připevněn průběžný patrový práh vyskládaný z fošen či v podobě hranolu. Platform frame má podlaží složené z více dílů vzájemně na sebe posazených a žádné sloupky nejsou průběžné. V současné době se jedná o nejpoužívanější systém pro stavbu jednopodlažních, ale i vícepodlažních dřevostaveb. [16] [30]

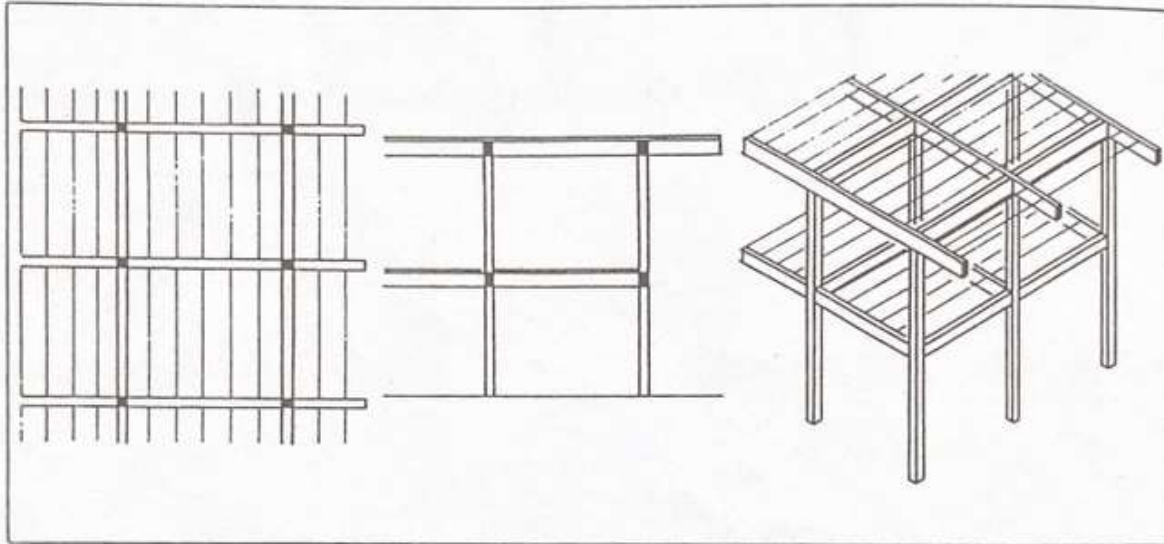


Obr. 12 - Platform frame [30]

Aby byla budova se sloupkovým systémem dostatečně tuhá, musí být konstrukce stropu a stěn ztuženy. Stropní konstrukce se ztužuje pomocí stropnic, které se rozepřou na vzdálenost asi 2 metrů. Rozměry stropnic jsou voleny tak, aby poměr výšky k šířce byl menší než 6 z důvodu stability. Stropní deska je většinou z šachovnicově položených překližek nebo jiného deskového materiálu. Ztužení sloupkových stěn je komplikovanější, protože sloupky nejsou samy o sobě schopné přenášet vodorovné zatížení do základů. K vyztužení se proto používají smykové stěny, které jsou schopné zatížení přenést nejen v podélném, ale i ve směru příčném. Dřevěné smykové stěny tvoří sloupky z fošen nebo prken a plášť z překližek. [16] [30]

Těžký skelet je oproti lehkému mnohem prostornější. Sloupy mohou mít rozpory až 7,5 metrů, a bývají uspořádány do pravidelných rastrů. Proto je tento systém optimální pro stavby, kde je potřeba velká variabilita dispozice, jako jsou školy, školky a administrativní budovy. Pro svíslé a vodorovné nosné prvky jsou většinou použity tyčové prvky z lepeného lamelového dřeva, jako KVH nebo BSH, které jsou spojeny ocelovými svorníky a styčníky. Právě podle způsobu provedení těchto styků můžeme rozlišit tři základní typy skeletových konstrukcí. Základním typem je skelet s jednodílnými průvlaky a sloupy, kdy je napojení provedeno pomocí tesařského spoje nebo ocelového styčníku. Dále se rozlišuje skelet s dvojdílnými průvlaky a jednodílnými sloupy a skelet s jednodílnými průvlaky a dvojdílnými sloupy, kdy napojení dvou rovnoběžných průvlaků, respektive sloupů zajišťuje ocelový svorník. Opět je důležitá tuhost konstrukce kvůli vodorovnému zatížení větrem, a ta závisí na množství

a umístění ztužidel. U dřevěných skeletových konstrukcí je zvláště důležité dobře vyztužit stropní konstrukci, aby dokázala přenášet vodorovné účinky do svislých ztužidel. Stěny jsou pak vyztuženy diagonálními ztužidly. Při návrhu sloupu je třeba přihlídnout na způsob kotvení a podle toho správně určit vzpěrnou délku. [16] [28] [30]



Obr. 13 - Těžký skelet [30]

Posledním konstrukčním systémem, který bych ve své práci chtěl zmínit je systém masivních dřevěných panelů. Jak již bylo zmíněno, CLT je konstrukční dřevěný prvek vyrobený z kolmo na sebe vrstvených dřevěných prken o tloušťce 10 až 50 mm. Vrstvy musí být minimálně tři a bývají uspořádány tak, aby krajní vrstvy byly orientovány svisle při použití jako svislé nosné konstrukce a ve směru pnutí v případě stropního panelu. Počet vrstev není nijak omezen, ale bývá zpravidla lichý. Křížení vrstev zajišťuje dobrou tvarovou stálost a prostorovou tuhost. Panely se tradičně vyrábějí do výšky 3 metry a délky okolo 15 metrů, protože větší rozměry už by komplikovaly dopravu na staveniště. Pro stěny se vyrábějí panely o tloušťce 60 až 160 mm, tlustší panely už by nebyly výhodné z hlediska spotřeby materiálu a hmotnosti konstrukce. Stropní panely vyžadují více vrstev a jsou neefektivněji využity v rozponech 6 metrů. CLT je relativně nový konstrukční systém, ale v posledních letech se stává stále populárnějším díky své pevnosti, trvanlivosti a udržitelnosti. Panely CLT lze použít na stěny, podlahy a střechy a díky své přesnosti a snadné montáži jsou obzvláště vhodné pro modulární výstavbu. V případě požadavků na velké množství otevřených prostor jsou sice vhodnější prvky tyčové, ale při výrobě jednotlivých buněk je jednoduché tyto prvky kombinovat. Co se týče estetiky, tak jsou panely vyráběny ve více pohledových kvalitách od konstrukční po broušený panel z výběrového dřeva. Oproti ostatním dřevěným konstrukčním metodám je ale systém CLT o něco dražší. [22] [29] [30]



Obr. 14 - CLT panely připraveny na montáž [31]



Obr. 15 – Hrubá stavba z CLT panelů [22]

3 Modulární dřevostavby

3.1 Historie a vývoj

První dřevěné moduly se objevily až počátkem 70. let 20. století, a to ve střední Evropě. Byly zatím využívány především pro jednopodlažní aplikace. V severním Německu vyvinula společnost Holtmann systémy pro dřevěné moduly díky svému zájmu o prefabrikovanou dřevěnou architekturu. Tyto moduly byly konstruovány s použitím skeletové konstrukce z lepeného lamelového dřeva a doplněny prvky rámové konstrukce. Moduly byly standardně 3 metry široké a až 12 metrů dlouhé. Jiné společnosti se pokoušely zmenšit přepravní rozměry experimentováním se skládacími moduly. Od roku 1972 do počátku 80. let 20. století bylo realizováno mnoho projektů pro dočasné i trvalé využití, od školních budov až po přístavbu podlaží v nemocnici. V 80. letech však poptávka po modulárním řešení poklesla a v roce 1985 firma Holtmann tento obor podnikání ukončila kvůli slabému růstu stavebnictví a negativnímu obrazu prefabrikované výstavby ze 70. let. [32]

V 90. letech 20. století se zájem o modulární dřevostavby vrátil a vývoj se zaměřil na využití modulů ke konstrukci vícepodlažních dřevostaveb. V čele šlo Švýcarsko a Vorarlbersko, kde používali lehké dřevěné konstrukce, jako skeletové a rámové, jelikož použití křížem lepeného dřeva bylo povoleno až v roce 1998. V tuto dobu vznikalo všude po střední Evropě mnoho modulárních a většinou vícepodlažních dřevostaveb. V Německu se stavěli dvoupodlažní rodinné domy s využitím rámových modulů. Ve Švýcarsku zase využívali dřevěné moduly ke stavbě dočasných kanceláří při stavbě, ale i trvalých administrativních budov. Při navrhování stejně dbali na flexibilitu, aby se dal prostor přestavět, ale třeba i kompletně rozebrat celá budova a znovu postavit na jiném místě. Všechny moduly byly zatím rámové konstrukce a využívaly jak tyčové, tak deskové prvky. Ve Štýrsku dřevěnou modulární výstavbu zpopularizoval univerzitní profesor a architekt Hubert Rieß, který je mnohými považován za průkopníka v tomto odvětví. Kombinuje totiž řemeslné myšlení se zkoumáním urbanistických možností, obzvláště v integraci volných prostor v novostavbách. Multifunkčnost a prostorová komplexnost se projevuje i v jeho největším dokončeném projektu, Impulszentru ve Štýrském Hradci. Jedná se o hybridní dřevostavbu, kde železobetonová konstrukce obepíná velké nádvoří, na kterém jsou vyskládány z dřevěných modulů kancelářské budovy. Ve Vorarlbersku si dřevěné moduly našly své první použití při přístavbách alpských hotelů. Zde se opravdu projevila příhodnost modulární výstavby, protože v zimních horských podmínkách je rozpracovaná stavba velice náchylná k poškození od atmosférických vlivů. Do toho každý den, kdy je provoz hotelu omezen či zastaven, činí pro majitele obrovské ztráty. Je třeba zmínit, že přístavby jako tyto vyžadují velmi úzkou spolupráci architektů, stavebních inženýrů a tesařských firem, aby proběhly úspěšně. Zatím všechny moduly byly zkonstruovány z rámových stěnových panelů a stropů z lepeného lamelového dřeva. [32]



Obr. 16 - Impulszentrum ve Štýrské Hradci [33]

V roce 1998 se však křížem lepené dřevo stalo certifikovaným stavebním materiálem a zároveň nejvyužívanějším pro stavbu dřevěných modulů. První důležitou stavbou z tohoto materiálu, která získala velkou pozornost veřejnosti, byl Alpenhotel Ammerwald v rakouském Tyrolsku. Tento pětipatrový hotel byl poskládán z 96 jednotlivých modulů za pouhých 10 dní. Od roku 2010 už se realizuje jeden projekt z dřevěných modulů za druhým. Z Vorarlberska se exportují dřevěné moduly na stavby v Německu a Švýcarsku jako jsou školy, hotely či ubytovny pro uprchlíky. V současnosti už nejsou neobvyklé ani stavby až z 300 modulů. Chytrou kombinací dřeva s dalšími materiály, jako je železobeton či ocel, je možné budovat i velmi vysoké budovy, které podrobněji popíši v další kapitole. [32]

3.2 Dřevěný modul

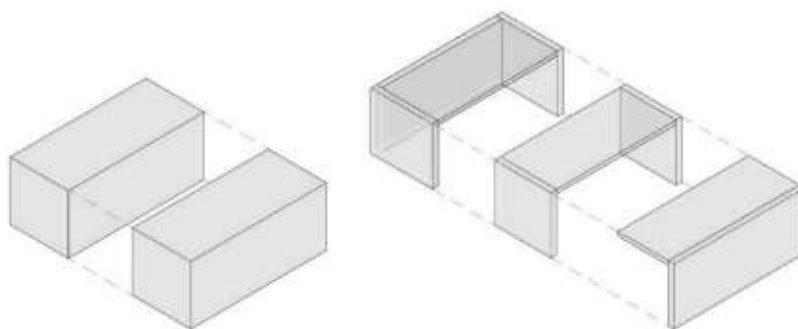
3.2.1 Základní konfigurace

Moduly jsou obvykle ve tvaru kvádrů s obdélníkovým půdorysem a šesti hraničními plochami. Tyto hranice jsou zpravidla tvořeny z podélných a příčných stěn, stropu či střechy a podlahy. Z konstrukčního, výrobního a logistického hlediska je ideální, když je všech šest stran uzavřených. Této konfiguraci se říká uzavřený modul, je však možné ho použít pouze v případě, kdy jeden modul přesně odpovídá rozměrům jedné užitné jednotky, jako je tomu například u hotelových pokojů, malých bytů nebo komplexů studentských kolejí. [32]



Obr. 17 - Uzavřený modul z CLT panelů [34]

Modul může mít jednu nebo více stěn odstraněných, aby se z něj stal modul otevřený. Ten je pro tuto klasifikaci definován jako modul, který má alespoň jednu stranu zcela otevřenou k sousedním modulům. Odstraněním stěny se umožní propojení s dalšími otevřenými moduly a vytvoří se tak velký otevřený prostor. Odstranění více než jedné boční plochy však způsobuje, že modul je konstrukčně nestabilní. Pro účely přepravy je nutné modul dočasně zpevnit a provizorně uzavřít, aby byla vnitřní konstrukce chráněna před povětrnostními vlivy. Počet otevřených stran na modulu také určuje směr rozpětí podlahy a stropu. U uzavřených modulů se svislé zatížení obvykle přenáší přes podélné stěny vzhledem k jejich kratšímu rozpětí. Strop a podlaha mají odlišnou úlohu při přenášení různých zatížení. Podlaha nese užitečné zatížení a hmotnost podlahové konstrukce, zatímco strop nese především jen svou vlastní hmotnost. V některých konstrukcích navíc horní modul nese také zatížení od střechy. Pokud modul nemá ani jednu podélnou stěnu, je třeba pro přenos svislého zatížení zvolit jiný přístup. Zatížení se dá přenést buď podélným překlenutím stropu či podlahy do příčných stěn modulu nebo nahrazením chybějících stěn nosíky. Nosíky pak přenesou zatížení do sloupů umístěných v rozích modulu. [32]



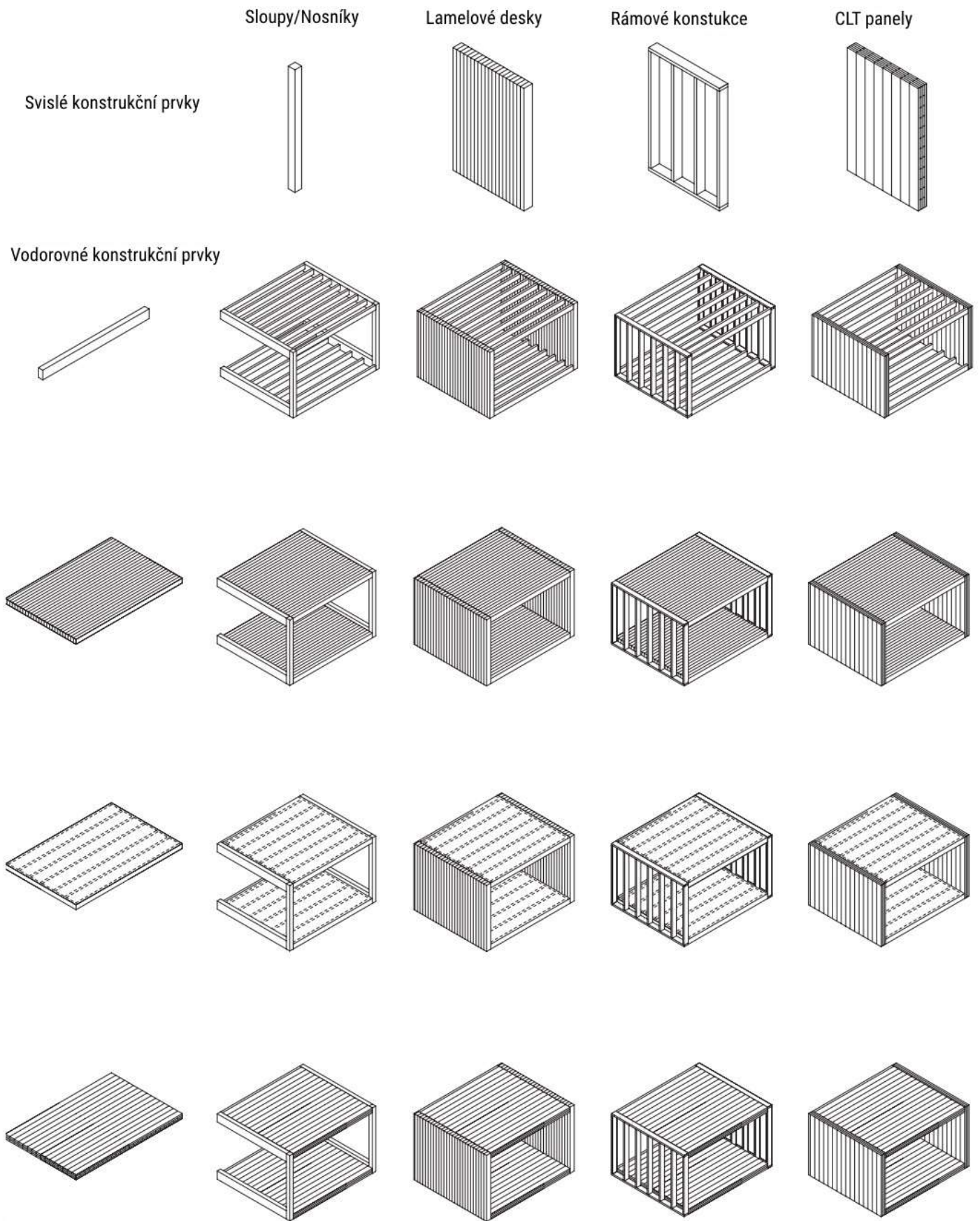
Obr. 18 - Vlevo: Uzavřený modul Vpravo: Otevřený modul [35]

3.2.2 Konstrukční systém

Pro stavbu modulů se nabízí více konstrukčních systémů běžně používaných v dřevostavbách a jejich kombinací. Patří mezi ně sloupkové rámové konstrukce, panely CLT a hybridní konstrukce využívající tyčové prvky z vrstveného či lepeného lamelového dřeva. Rozhodnutí, jaký systém použít závisí na konkrétních podmínkách každého projektu. Na obrázku č. 20 můžete vidět varianty modulů sestavených kombinací různých konstrukčních systémů.



Obr. 19 - Rámová konstrukce modulu [36]



Obr. 20 - Varianty modulů sestavených kombinacemi konstrukčních systémů [32]

Při výběru konstrukčního řešení stropu je třeba přihlídnout na velikost rozpětí. Pro menší rozpory jsou ideální panely CLT, pro větší se zase hodí systémy trámů a skeletové konstrukce. Dále je důležitý estetický aspekt, jestli se má jednat o prvek přiznaný. Z hlediska požární odolnosti je, kromě zapouzdření protipožárními deskami, nejvhodnější řešení stropu masivní panelová konstrukce. U podlahy je rozhodující fakt, jestli musí být tepelně zaizolována od venkovního prostředí. V tomto případě je vhodné využít rámové konstrukce, které se dají vyplnit izolačním materiálem. Co se týče výběru konstrukčního systému pro stěny, CLT a panely z lepeného lamelového dřeva jsou nejlepší volbou skoro v každém kritériu. Díky své prostorové tuhosti a mimořádně velké únosnosti jsou schopny přenést velké zatížení a k tomu jsou estetickým přiznaným prvkem. Jediné kritérium, kde zaostávají jsou akustické a tepelněizolační vlastnosti. Například obvodové stěny je výhodnější navrhnout jako rámovou konstrukci, protože dutiny lze jednoduše vyplnit izolačním materiálem. Co se týče akustiky, tak rámy s lehkým pláštěm na obou stranách vykazují lepší výsledky než masivní panely. [32]

3.2.3 Akustika

V dřevostavbách je pro dosažení vysokých požadavků na zvukovou izolaci často nutné použít vícevrstvé konstrukce. Pokud každý modul odpovídá jedné jednotce využití, tak je tato metoda velice příhodná, úsporná a efektivní. Tloušťky stěn a stropů dřevěných modulů jsou pak srovnatelné s tloušťkami těchto prvků v tradičních dřevostavbách. U stropních konstrukcí má zásadní význam dosažení účinné vzduchové neprůzvučnosti a tlumení nárazového zvuku. Účinnou metodou, která se běžně používá, je oddělování na sobě uložených modulů pomocí elastomerových ložisek. Tento přístup zajišťuje, že samonosný strop je účinně izolován od podlahy nad ním a funguje podobně jako podhled. Tím se eliminuje potřeba pro těžké výplňové materiály podlah, světlá výška modulu se zvětší a celý systém se stává efektivnějším. [32]

3.2.4 Požární odolnost

Pro stavby z dřevěných modulů jsou požadavky na požární bezpečnost určeny stavebními předpisy a normami pro dřevěné konstrukce, které jsou v každém státě jiné. V České republice například normy omezují stavby s nosnou konstrukcí ze dřeva maximální požární výškou 12 metrů. Pro dřevostavbu vyšší než tento limit, je třeba použít pro svislé nosné prvky konstrukce z nehořlavého materiálu. Všechny nosné prvky musí splňovat stanovené požadavky stavebních předpisů. V případě modulů je účinkům požáru nejvíce vystaven strop. Přestože se obvykle nepodílí na přenosu svislého zatížení, může sloužit ke ztužení budovy a stává se tak nosným prvkem s vlastními požadavky na požární bezpečnost. Je proto nutné zajistit, aby si strop zachoval svou nosnost po požadovanou dobu vystavení účinku požáru. [32] [37] [38]

3.2.5 Technická zařízení

Modulární výstavba opět prokazuje svou praktičnost, protože umožňuje kompletní prefabrikaci všech technických zařízení, včetně rozvodů, vzduchotechniky a řídicích jednotek, v rámci každého modulu. Úroveň vybavení modulu se může lišit v závislosti na požadavcích projektu. Opět je nutné myslet dopředu a umístění rozvodů rozvrhnout už v prvotních fázích návrhu, jelikož ovlivňuje strukturu celého modulu. Rozhodovací proces zahrnuje výhradně volbu protipožární ochrany a určení polohy šachet. Při přepravě modulů na velké vzdálenosti je montáž na místě obvykle svěřena různým firmám, takže je výhodnější jednoduché rozvržení. Zásadní je rozhodnutí, jestli šachty budou uvnitř nebo vně modulů. Umístění z vnějšku modulu nabízí několik výhod, včetně snadnějšího přístupu, jednodušší montáže na místě a případné údržby. Co se týče protipožární ochrany, je třeba rozhodnout mezi horizontálními nebo vertikálními protipožárními přepážkami. Svislé protipožární přepážky jsou výhodnější, protože umožňují prefabrikaci ve výrobní hale a na místě se pouze napojují potřebné díly. Rozvody uvnitř modulu už nejsou tak složité. Pokud je vyžadováno ventilační potrubí, tak je vedeno ve stropním prostoru. Elektrické rozvody jsou vedeny v konstrukci zdvojené stěny modulů. V podlahové konstrukci jsou zase obvykle uloženy topná a vodovodní potrubí, a to ve výplňových nebo vyrovnávacích vrstvách. V případě spojených otevřených modulů se dá vodovodní potrubí jednoduše napojit na sousední modul. [32]



Obr. 21 - Instalace technických zařízení ve výrobní hale [32]

3.3 Vnější konstrukce

3.3.1 Obvodový plášť

Vnější stěny typických modulárních budov bývají zpravidla nenosné, jelikož zatížení přenáší vnitřní podélné stěny. Obvodová stěna pak může být navržena jako dřevěná rámová konstrukce vyplněná izolantem nebo jako relativně tenké CLT panely obložené tepelnou izolací. V případě, že vnější stěny mají nést zatížení, se musí celková tloušťka stěny zvětšit, aby se do ní vešla nosná vrstva. Kritickým místem, kde je riziko vzniku tepelného mostu, je spoj mezi moduly. Ve fasádě má zásadní význam jak z technického, tak z estetického hlediska. Je důležité zajistit, aby vrstvy tepelné izolace a fasádního obkladu byly přes spáru plynule propojeny. I když je možné tyto vrstvy do určité míry prefabrikovat, konečné spojení se obvykle provádí až na stavbě. Výstavba na místě umožňuje rychlejší a efektivnější dokončení požadovaných kroků bez výrazných dodatečných nákladů. Konstrukce na připevnění fasádního pláště je předem namontována na moduly a samotný plášť je přidán až po montáži. Tento způsob poskytuje větší flexibilitu při navrhování fasády, protože spoje modulů lze jednoduše překrýt. [32]

3.3.2 Předsazené konstrukce

Návrh a realizace lodžii nebo balkonů v modulárních konstrukcích nabízí zajímavé možnosti pro zvýšení estetiky a funkčnosti budovy. Balkóny jsou obvykle navrženy tak, aby byly konstrukčně i tepelně nezávislé na hlavní budově. Jedním z nejběžnějších přístupů jsou balkóny s vlastními základy umístěné před čelo modulu, které jsou ke stávající budově připojeny pouze z důvodu upevnění.



Obr. 22 - Příklad provedení předsazené konstrukce v modulární budově [32]

Další možností je zavěšení balkonů a přenesení zatížení přes střechu na nosné stěny. Velmi vhodné řešení v případech, kdy je prostor pod balkonem nějak využíván, jako například v zástavbě podél ulic. Oba typy lze přizpůsobit konkrétnímu projektu a nejsou nijak omezovány

konstrukcí samotné budovy. Zajímavým přístupem je navržení balkónových modulů, které jsou zakotveny do fasády. Tento způsob byl zvolen pro finský projekt Puukuokka, který je blíže popsán v další kapitole. Řešení lodžii v modulárních budovách je sice zajímavé, ale konstrukčně komplikované. Pro podporu těchto prvků fungují stěny modulů jako vyčnívající podpěry, které přenášejí zatížení na podlahu pod nimi, ale zároveň i hluk. [32]

3.3.3 Střecha

Řešení střešní konstrukce v modulární stavbě má mnoho možností. Šikmých střech lze dosáhnout použitím specializovaných modulů se šikmými stropy nebo kombinací běžných modulů s externí střešní konstrukcí. Tepelná izolace může být integrovaná do této konstrukce, za vzniku zatepleného podkroví, nebo je provedena na stropu nejvyššího modulu. Nicméně ploché střechy jsou mnohem běžnější. V tom případě se střešní konstrukce, včetně parozábran, tepelné izolace, hydroizolace a zatěžovací vrstvy, obvykle montuje až na místě po ukotvení modulu, jelikož je to jednodušší a rychlejší než složitá prefabrikace těchto prvků. Okraj střechy je většinou řešen jako atika a může být buď prefabrikovaný, nebo dodatečně instalován v závislosti na faktorech výšky modulu a povolené přepravní výšce. Odvodnění střechy je obvykle vedeno exteriérem, pomocí střešních okrajových vtoků a svodů. Nicméně lze zavést i vnitřní odvodňovací systém, například v oblasti chodby, v závislosti na praktických požadavcích. [32]



Obr. 23 - Moduly se střešní konstrukcí ve výrobní hale [68]

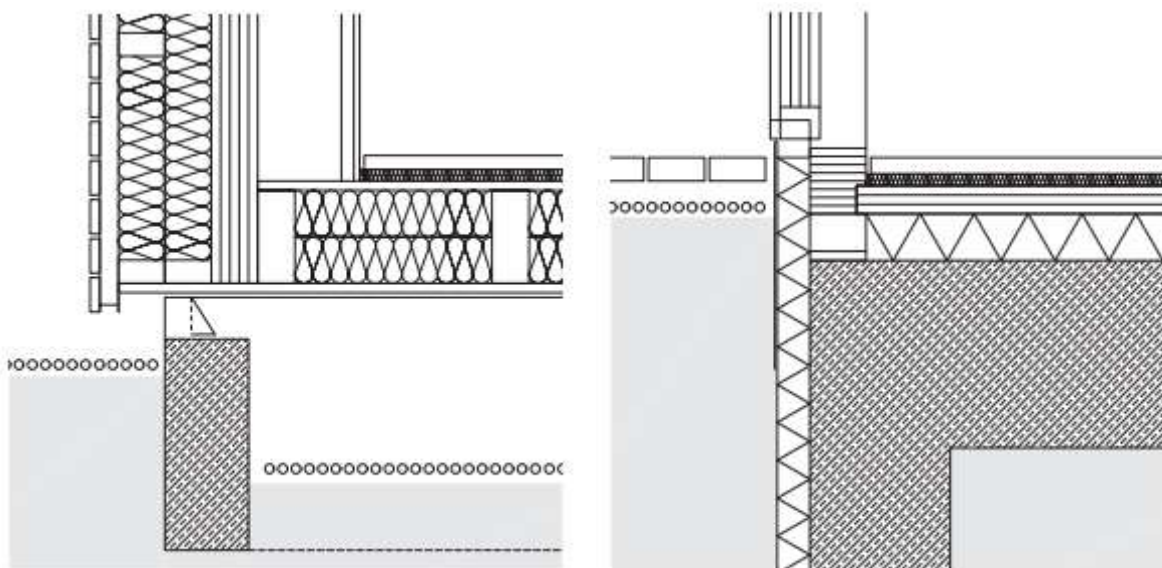
3.3.4 Základy

Často je u modulárních projektů požadavek na specifické využití přízemí, většinou pro maloobchodní a komerční účely, ale třeba i jako lobby hotelů nebo podzemní parkoviště. V takových případech se často buduje masivní přechodová deska pomocí běžných stavebních

metod. Tato platforma tak vytvoří v přízemním podlaží budovy kýžený otevřený prostor. Další nestandardní typ založení modulárních budov vyžadují stavby se suterénem. Ty se ale navrhují velmi málo. Pro základové konstrukce v budovách s moduly na úrovni přízemí bez suterénů rozlišujeme dva základní přístupy. [32] [38]

První typ zakládání je pro budovy, kde jsou spodní moduly umístěny nad terénem, čímž vzniká vzduchová mezera mezi moduly a povrchem terénu. Nosná konstrukce těchto budov může být podepřena různými typy základů. Běžně se používají železobetonové základové pásy, které mohou být prefabrikované nebo odlité na staveništi, ale i bodové betonové podpěry. Pro méně zatížené nebo dočasné konstrukce může být vhodné založení na ocelových vrutech. Pro moduly bez provětrávané mezery lze použít železobetonové základové desky. Tyto základové desky jsou umístěné v přímém kontaktu s půdou, čímž účinně chrání moduly před zemní vlhkostí. Tepelná izolace může být umístěna buď nad betonovou deskou, nebo pod ní. Základová deska může samostatně rovnoměrně rozložit zatížení nebo využít kombinace se základovými pásy. [32]

Volba konstrukční metody základových konstrukcí by měla zohledňovat funkční, konstrukční a designové faktory, jakož i předpokládanou životnost budovy. Zásadní je rozhodnutí, zda má být budova pevně spojena se základovou deskou, nebo zda má působit dojmem plovoucí konstrukce s provětrávanou mezerou. [32]



Obr. 24 - Vlevo: Založení modulu se vzduchovou mezerou na železobetonovém pasu

Vpravo: Založení modulu na železobetonové desce [32]

3.4 Výstavba s moduly

Dřevěné modulární budovy dnes už slouží k mnoha účelům. Největší zastoupení mají budovy pro bydlení, komerční a institucionální účely, přičemž největší počet tvoří určité bytové domy následované budovami škol. Modulární přístup nabízí značné výhody v typech budov, které se vyznačují opakujícími se prostory, jako již zmíněné bytové domy, ale také

ubytovací zařízení, zejména hotely, ubytovny a domovy důchodců. Uspořádání modulů v rámci budov se však značně liší v závislosti na jejich zamýšlené funkci. [32]

3.4.1 Navrhování s moduly

Použití prefabrikovaných modulů k výstavbě významně ovlivňuje proces navrhování, zejména z hlediska volného prostoru. Rozhodnutí o stavbě touto metodou musí proto být učiněno v počátečních fázích návrhu, protože prostorová konfigurace je neodmyslitelně spjata s rozložením modulů. Modularita ukládá silné prostorové omezení, které utvářejí celý proces navrhování. Při navrhování prostor jako jsou hotelové pokoje nebo byty, kde je možné použít uzavřené moduly, lze strukturu snadno uspořádat. Navrhování s otevřenými moduly, jako jsou vícemodulové byty, je však mnohem složitější. V takových případech je třeba pečlivě sladit prostorové požadavky s hranicemi modulů. Architekti se musí orientovat v kombinaci prostorové funkčnosti a modularity a hledat řešení, které splní požadavky projektu a zároveň využije přizpůsobivost modulů. [32]

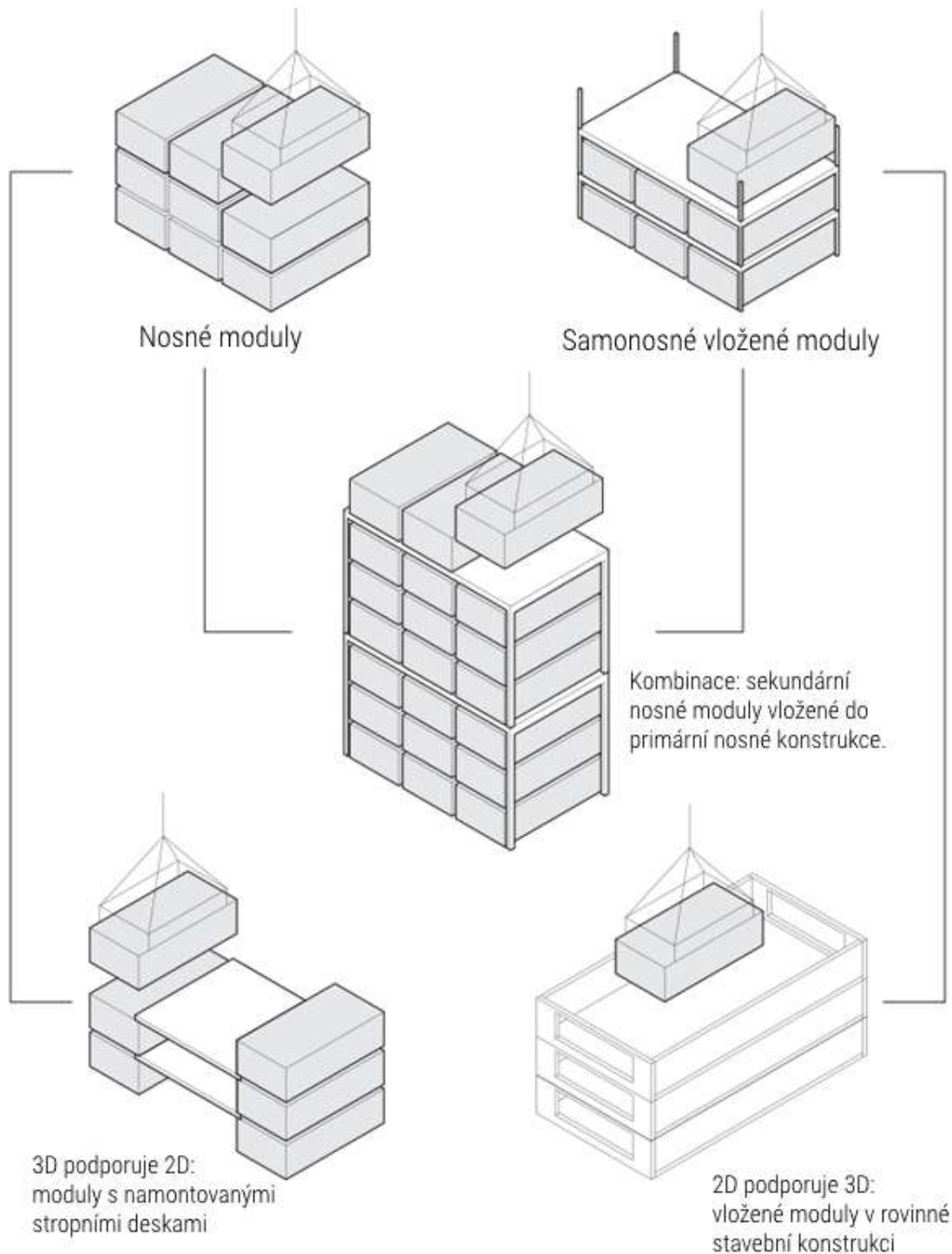
3.4.2 Nosnost modulů

Moduly musí být navrženy tak, aby byly dostatečně pevné a unesly vlastní hmotnost, což je nezbytné k jejich přepravě na staveniště a následné montáži. Ne všechny moduly jsou však určeny k tomu, aby unesly a přenesly zatížení dalších modulů uložených na sobě ve více podlažích. V důsledku toho rozlišujeme dva základní typy modulů podle své únosnosti, nosné a vložené moduly. Vložené moduly bývají využívány i v tradičních stavbách pro místnosti, které vyžadují rozsáhlé vybavení, pro zjednodušení výstavby. Typickým příkladem vloženého modulu je sanitární modul, často využíván při stavbě ubytoven, nemocnic a hotelů. V kombinaci s primární nosnou konstrukcí lze ale z vložených modulů stavět celé budovy. S doplňující nosnou konstrukcí se často kombinují i nosné moduly. [32]



Obr. 25 - Sanitární modul [41]

Existují i budovy kde moduly nepřenášejí jenom svoji hmotnost a zatížení z ostatních modulů, ale i zatížení z plošných prvků, se kterými jsou zkombinovány. Nejběžnějším příkladem takového využití jsou chodby ve středu objektu, kde moduly obklopující chodbu přenášejí její zatížení. Tímto způsobem lze vytvořit velké otevřené prostory v modulárních stavbách. Kombinace modulů s plošnými prvky nabízí nový přístup, který využívá výhod obou konstrukčních metod. Moduly vynikají ve složitých a dobře vybavených prostorách, zatímco plošné prvky umožňují otevřené prostorové konfigurace a konstrukce s velkým rozpětím. [32]



Obr. 26 - Schéma variant využití modulů podle jejich nosnosti [32]

3.4.3 Statické spolupůsobení modulů

Při skládání modulů na sebe, je důležité zohlednit svislá i vodorovná zatížení, včetně zatížení větrem, a zajistit jejich bezpečný přenos do základů. Moduly jsou obvykle spojeny dohromady a působí jako jeden celek, přičemž se zatížení nerovnoměrně rozděluje mezi jednotlivé moduly v závislosti na jejich uspořádání ve shluku. Tato proměnlivost zatížení často vyžaduje složitá opatření pro zvládnutí jeho přenosu. Často se používají dodatečné vnější prvky, jako jsou ztužidla nebo ztužující jádra, například schodiště a výtahové šachty, které moduly vyztužují. Aby bylo ztužení efektivní, je nutné vytvořit spoje mezi moduly a sousedními vyztužnými prvky. Ve většině případů tvoří hraniční plochy modulů buď strop nebo dělicí stěny mezi různými místnostmi či byty. V těchto bodech dochází ke zdvojení ploch, což by se dalo považovat za zbytečný dodatečný náklad, ale z hlediska stavební fyziky toto zdvojení přináší výhodu z hlediska odhlučnění, jak už bylo uvedeno v předešlých kapitolách. Je ale důležité najít rovnováhu, protože příliš mnoho spojů může tuto výhodu zcela vyrušit. Proto by se měly spoje oddělovat, nejlépe pomocí vhodných mezivrstev z pružných materiálů. Přenosu smykové síly lze ale dosáhnout i například pomocí vytvarování uložení panelů nebo pomocí tření. [32]

V kontextu přenosu vodorovného zatížení je třeba přihlídnout i k nepřesnostem a odchylkám, které při skladbě nebo výrobě modulů mohou nastat. Tolerance odchylek u modulárních staveb vyplývá jak z výrobního procesu modulů, tak z možných nepřesností při montáži modulů a vychází z norem na provádění ocelových a hliníkových konstrukcí ČSN EN 1090-2. Problémy s nesouosostí, které mohou vzniknout při montáži modulu, se dají na stavbě kontrolovat pomocí laserových přístrojů, aby se omezila kumulativní polohová odchylka. Ta by neměla přesáhnout tisícinu celkové výšky budovy. Excentricity způsobené odchylkami mohou mít za následek dodatečné vodorovné síly, které se pak přenášejí jako smykové síly ve stropě, podlaze a vnitřních smykových stěnách modulů. V kombinaci se zatížením větrem mohou způsobit vodorovné posunutí budovy, což vede k posunu těžiště vzhledem k základům. Toto posunutí vytváří dodatečné ohybové momenty známé jako vliv druhého řádu. I když jsou tyto účinky obvykle malé a zanedbatelné, v extrémních případech mohou vést až ke kolapsu. Proto pokud jsou účinky druhého řádu významné, je třeba je zohlednit při ověřování mezního stavu únosnosti a použitelnosti zahrnutím dodatečných vodorovných sil. [38]

3.4.4 Přístupy k modularitě

V současné modulární výstavbě existuje více koncepčních přístupů, které je třeba zvážit a rozlišit dvě zásadně odlišné strategie vývoje. Prvním přístupem je koncept přizpůsobitelné konstrukce. Tato strategie míří na praktičnost a efektivitu výstavby. Firmy nabízí standardizované stavby s jasně definovaným katalogem možností, podobně jako možnosti výbavy automobilu. Potenciál přizpůsobitelné modulové výstavby spočívá v dosažení významných úspor nákladů a času při zachování vysoké ekologické, estetické a technické kvality. Zavedením tohoto přístupu lze výrazně ulehčit plánování, což vede ke zvýšení efektivity. V tomto přístupu role architekta spočívá především v přizpůsobení systému

podmínkám na staveništi a splnění požadavků zákazníka. Urbanisté by se zase zaměřili na hledání vhodných pozemků pro tento způsob výstavby. Navzdory zjevnému potenciálu se stavební systémy s přizpůsobitelnými moduly v dřevostavbách výrazněji neprosadily. Jedním z rozhodujících faktorů, které k tomu přispívají, je obchodní struktura odvětví dřevostaveb, která se vyznačuje malým počtem velkých společností. Kromě toho představují další výzvu neustále se vyvíjející a regionálně odlišné parametry. [32] [35]

Druhý přístup se ve střední Evropě používá častěji a zahrnuje individuálně vyvinutou modulární architekturu. V rámci tohoto přístupu se architekti snaží, aby při navrhování využili výhod konstrukce modulů. Pokud je jako optimální řešení pro konkrétní projekt vyhodnocena modulární konfigurace, je navržena budova na míru přizpůsobená okolním podmínkám. V tomto procesu hrají zásadní roli jak projektanti, tak výrobci modulů. [32] [35]

Modulární výstavba sama o sobě automaticky nezaručuje snížení stavebních nákladů. Díky své efektivitě však nabízí příznivý poměr výdajů a kvality. Navíc se jedná o způsob výstavby, který je dobře přizpůsoben budoucímu pokroku v oblasti automatizace, aniž by představoval hrozbu pro stávající kulturu ve stavebním sektoru.

3.4.5 Využití modulů k přístavbě

Zajímavým využitím dřevěných modulů je k rozšíření stávající budovy. Proces urbanizace a suburbanizace stále trvá a poptávka po nových bytech v městských oblastech stále stoupá. Modulární přístavby nabízejí mnoho výhod, zejména v případech, kdy je třeba provádět stavební práce za provozu. Vůbec první dřevěné vícepodlažní modulární budovy byly realizovány jako patra přistavěná ke stávajícím hotelovým budovám ve Vorarlbersku, jak už jsem zmiňoval v kapitole výše. Při rozšiřování budovy je možná jak horizontální, tak vertikální nástavba. V případě horizontálních přístaveb, které často výrazněji zasáhnou do stávajících konstrukcí, je výhodné zkombinovat novou dřevěnou přístavbu s rekonstrukcí pláště budovy a efektivně tak zmodernizovat starou budovu. Naproti tomu vertikální nástavbu podlaží lze z hlediska prostorové koncepce navrhovat mnohem nezávisleji. V ideálním případě existuje možnost plynule navázat na nosné konstrukce, rozvody instalací a elektřiny stávající stavby. Pokud to není možné, lze zavést další vrstvy, jako jsou dřevěné nebo ocelové profilové nosníky, které přeměrují zatížení a rozvody do vhodných poloh. [32] [39] [40]

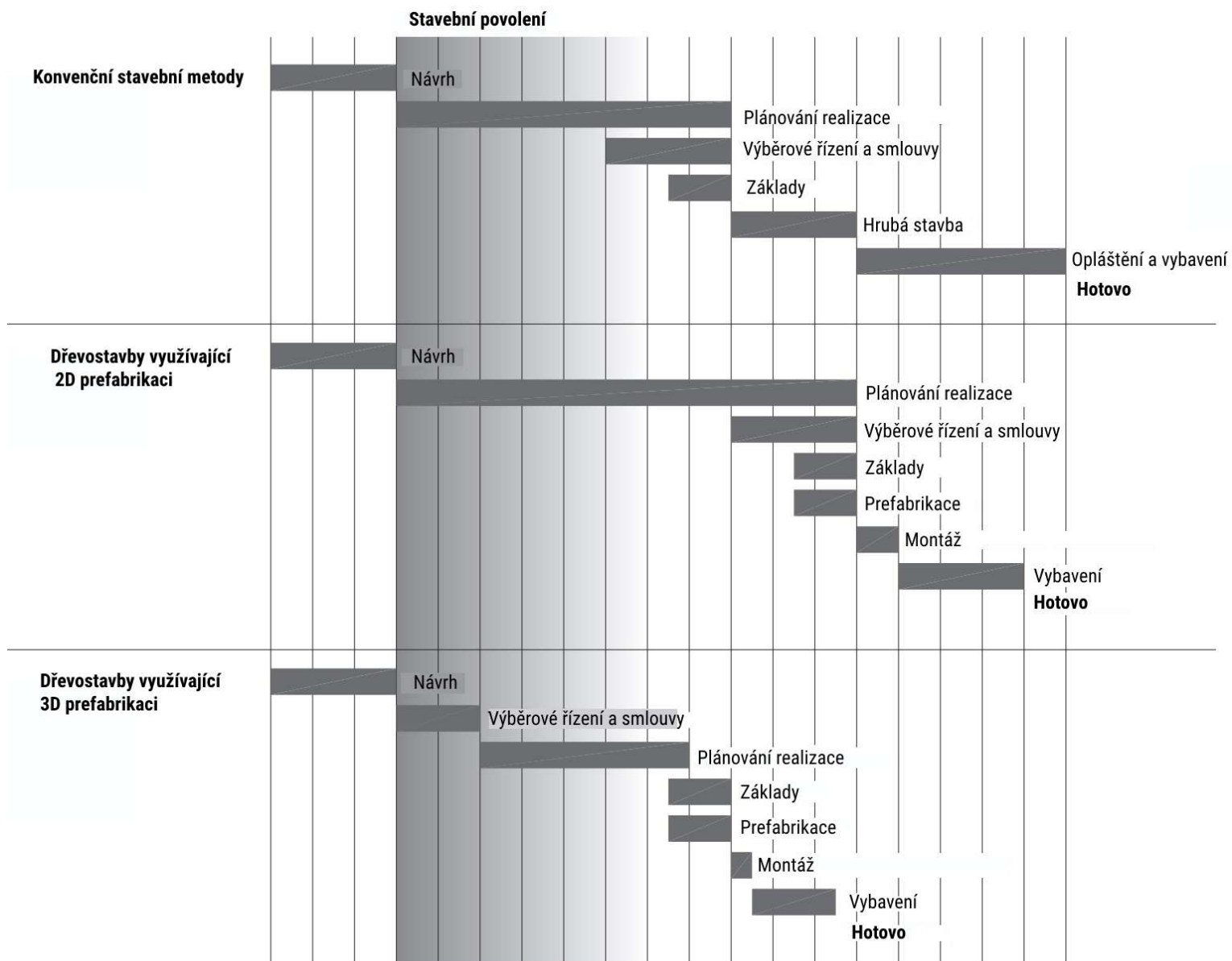


Obr. 27 - Vizualizace provedení vertikální modulární přístavby [40]

3.5 Organizace modulárních projektů

3.5.1 Návrh

Mezi hlavní výhody modulární výstavby patří krátká doba realizace projektů. Pro plné využití této výhody a zajištění efektivity je ale nezbytné pečlivě promyslet organizaci projektu. Koordinace mezi prostorovým řešením, nosnou konstrukcí, technickým zařízením budovy a logistikou musí proběhnout již v rané fázi. Nejprve je důležité rozhodnout o rozměrech modulů z hlediska výroby a přepravy. Obzvláště u velkých modulů je třeba zohlednit volbu dopravní trasy na místo montáže. Rozměry jednotlivých dílů, jako jsou podlahy, stropy a dělicí stěny, přímo ovlivňují konečné vnější rozměry budovy. Definování těchto rozměrů před plánováním realizace je nezbytné pro schvalovací proces. Proces získání stavebního povolení trvá v praxi obvykle až šest měsíců nebo déle, proto je třeba realizaci plánovat souběžně se schvalovacím procesem, což přináší určité rizika. Koordinace s úřadem a včasné podání žádosti o stavební povolení je důležité pro správný průběh projektu a časový plán. Jakmile je zadána objednávka na výstavbu modulů, je harmonogram stavby už jasně daný. Pro zajištění nejvyšší efektivity je důležité, aby procesy běžely současně. V tomto případě, by se během výroby modulů ve výrobní hale, mělo připravovat staveniště a provádět základová konstrukce. [32]



Obr. 28 - Srovnání časového harmonogramu zhotovení projektu různými metodami [32]

3.5.2 Výroba

Firmy zabývající se dřevostavbami a výstavbou dřevěných modulů mají často dobře vybudovanou síť subdodavatelů, což nabízí výhody oproti individuálnímu zadávání různých řemesel. Sestrojení modulů zahrnuje celou řadu výrobních technik založených na řemeslné zručnosti, od konvenčních stavebních metod až po částečně automatizovanou výrobu. Menší společnosti mohou více spoléhat na tradiční řemeslnou výrobu, zatímco větší firmy s více projekty mají tendenci využívat automatizaci pro zvýšení efektivity. Zde se na efektivitě výroby nejvíce projeví výhoda využití typově stejných či podobných modulů. Podobnost modulů umožní přechod do téměř sériové výroby, což výrazně ušetří čas. Moduly jsou sestavovány na výrobní lince, která se pohybuje pomocí kolejového systému nebo halového jeřábu.

Po sestavení modulů následuje jejich další vybavování, které zahrnuje základní sanitární a elektrické instalace, montáž okenních prvků, malířské práce, podlahové konstrukce, obkladačské práce, fasádní práce a zajištění přepravitelnosti. [32]



Obr. 29 - Kompletace modulů ve výrobní hale [42]

3.5.3 Logistika

Doprava hraje při navrhování modulů zásadní roli, proto je důležité projekt konzultovat s odborníkem na dopravu již na počátku procesu projektování. Pro každý projekt je třeba pečlivě prozkoumat konkrétní dopravní trasy a zvážit případná úzká místa nebo omezení. Posledních několik metrů přepravy a příjezd na staveniště jsou často nejkritičtější a vyžadují zvýšenou pozornost. Pro přepravu modulů velkých rozměrů se často musí používat speciální transporty vyžadující schválení. V České republice platí maximální rozměry nákladu, který může být přepravován bez speciálního povolení a doprovodného vozidla. Tyto rozměry jsou omezeny na délku 16,5 metru, výšku 4 metry a šířku 2,55 metru. Z hlediska přepravy je pro většinu projektů obvykle dostačující délka standardního návěsu nákladního automobilu, která činí přibližně 13,5 metru. Je možné přepravit i delší moduly, ale manipulace s nimi bude mnohem složitější. Moduly bytových domů většinou nemají problém splnit limit dopravní výškou. V případě modulů pro administrativní budovy či školy by komplikace nastat mohly. Dalším důležitým faktorem pro transport je šířka modulu. Bez vyřizování speciálního povolení a doprovodných vozidel je třeba dodržet maximální šířku 2,55 metru ve většině evropských zemí. I s povolením a doprovodem se pro zajištění plynulejší dopravy a předcházení možným problémům obecně doporučuje dodržovat maximální šířku 3,25 metru. Náklady na dopravu dřevěných modulů se pohybují v průměru kolem 5 % celkových stavebních nákladů. Kromě

vzdálenosti cenu ovlivňují i náklady způsobené nadměrnými rozměry, jako je například policejní doprovod. Pro zvýšení efektivity a snížení nákladů se proto pro složité přepravy často používají konvoje. [32] [38]



Obr. 30 - Transport modulu zabaleného pro ochranu před povětrnostními podmínkami [43]

3.5.4 Montáž

Další významnou výhodou stavby z modulů je její rychlá montáž na staveništi. Ta je možná i za nepříznivých povětrnostních podmínek díky ochrannému fóliovému krytu modulů, zajištěnému už pro přepravu. Proces montáže modulů zahrnuje několik klíčových kroků. Začíná přípravou montážního podkladu, následuje vlastní zvedání a umístění modulů pomocí mobilních jeřábu. Pokud jsou moduly dostatečně tuhé, lze je pomocí ocelových lan ve čtyřech bodech přímo namontovat na hák jeřábu. U méně tuhých modulů nebo modulů velkých rozměrů je však často zapotřebí další zvedací konstrukce. Tou může být silný ocelový rám, který poskytuje další upevňovací body, nebo upínací popruhy, které obepnou celý modul. Během tohoto procesu se provedou nezbytná upevňovací opatření pro zajištění stability a provede se provizorní utěsnění fasády a střechy. Jakmile jsou moduly na místě, pozornost se přesune na dokončení budovy, včetně instalace technických zařízení. [32] [38]



Obr. 31 - Zdvihání modulu za pomoci ocelového rámu [44]



Obr. 32 - Montáž modulu pomocí mobilního jeřábu vybaveného upínacími popruhy [43]

4 Případové studie

4.1 Česká republika

Počátky modulární výstavby v Česku sahají až k odkazům Tomáše Bati. Pád komunismu a následný rozpad „socialistického zázraku“ Agrokombinátu Slušovice dal vzniknout řadě nových firem. Jednou z nich byla firma s názvem Mobimont, která se odpoutala od výroby maringotek a začala vyrábět obytné moduly s názvem Mobires. Z Mobimentu se v roce 1991 stala společnost ACRO a kvůli neshodám uvnitř firmy se do roku rozpadla. Nicméně jeden ze spolujednatelů založil firmu KOMA MOUDLAR CONSTRUCTION a začal se věnovat výrobě modulů. Postupně vyvíjeli nové typy, například protivýbuchový nebo skladatelný, který se mohl letecky transportovat a na místě postavit, a díky těmto inovacím se dostali na evropský trh. V současné době pod jménem KOMA Modular dominují českému a evropskému trhu v poli modulární výstavby a mohou se pyšnit přes 5 000 úspěšnými modulárními projekty po celém světě. Významným úspěchem byla výhra výběrového řízení na dodavatele stavby českého pavilonu na milánském Expu 2015, který byl navržen právě v modulární konfiguraci. [45] [46] [47]



Obr. 33 - Český pavilon na světové výstavě EXPO 2015 v Miláně [47]

Co se týče dřeva, tak u nás máme velké množství firem zabývajících se jeho zpracováním. Zlomek těchto firem vyrábí ze zpracovaného dřeva konstrukční prvky a pouze nepatrná část z nich se navíc ještě zabývá projektováním a prováděním dřevostaveb, natožpak modulárních. Netvrdím, že v Česku není hodně firem, co provádí klasické nebo modulární dřevostavby, protože je. Jen málokterá z nich ale dokáže zpracovat pokácený strom v hotový dům pouze

sama o sobě. V tomto ohledu mě zaujala rodinná firma Nema z jižních Čech. Ve třech výrobních areálech v okolí Nových Hradů zpracují kulatinu na řezivo, z řeziva vyrobí konstrukční prvky z lepeného lamelového dřeva, nejčastěji hranoly KVH a BSH a panely CLT, které následně využijí ke stavbě stěnových či stropních panelů, střešních vazníků, ale i kompletních modulů. Tým projektantů navrhne kýžený typ dřevostavby a konstrukční tým ho postaví. Navíc mají k výrobě velice zodpovědný ekologický přístup. Zakládají si na maximálním využití dřeva ve svých výrobcích, a proto se se svými 96 % mohou pyšnit konstrukcemi s nejvyšším obsahem tohoto materiálu na českém trhu. K tomu si 95 % spotřebované elektřiny vyrábějí sami fotovoltaickými panely na střechách svých hal a za každý kubický metr dřeva co spotřebují vysadí nový strom. Tato firma vykázala loňský rok obrát 300 milionů korun a čistý zisk se pohybuje v hodnotách desítek milionů korun. Ten, spolu s dotacemi investují do další automatizace výroby. Katedra dřevěných a ocelových konstrukcí mi umožnila zúčastnit se exkurze do jejich areálů a nahlédnout do všech fází výroby. Možnost vidět realitu tohoto podniku byla opravdu cennou zkušeností a pro mou práci velkým přínosem. [48] [49]



Obr. 34 - CNC obráběcí centrum v hale firmy Nema [44]

Firem, které se specializují přímo na modulární dřevostavby je v Česku řada. Naprostá většina funguje na konceptu přizpůsobitelné konstrukce. Tedy nabízejí katalog typových staveb, většinou jednopodlažních, které si zákazník může drobně upravit podle svých potřeb. Volitelné úpravy se zpravidla týkají pouze vybavení modulů, rozmístění prvků a celková konfigurace budovy je pevně daná standardizovaným typem z katalogu. Nicméně

existují firmy, které umožňují si konfiguraci upravit. Například firma Modulos nabízí přizpůsobení modulů půdorysu, který měl zákazník navržený pro projekt stavěný konvenční metodou. Mezi další tuzemské firmy, které se zabývají výhradně modulárními dřevostavbami, patří například Eko Modular, Modulární domky nebo Wood-Con Dřevostavby. Svůj sortiment služeb o modulární dřevostavby rozšířila i řada firem, které se věnovaly pouze typickým dřevostavbám nebo stavbám z tradičních stavebních materiálů. Mezi ně patří společnosti jako například RD Rýmařov, Úsporné bydlení nebo PURLIVE.



Obr. 35 - Realizace projektu firmy Modulos [50]



Obr. 36 – Realizace dvoupodlažního projektu firmy Eko Modular [51]

Vícepodlažní modulární dřevostavby jsou u nás výrazně omezeny maximální dovolenou požární výškou 12 metrů. To ale nebránilo libereckému architektonickému studiu Mjölck navrhnout v centru Liberce osmipatrový bytový dům z CLT modulů. Autoři návrhu jím chtějí oživit spodní centrum města, která v posledních padesáti letech působí poněkud ponuře a zanedbaně. Dřevostavba by nahradila dvě chátrající stavby, které této atmosféře značně přispívají. Přízemí by tvořila železobetonová základová platforma, čímž by se vytvořil prostor pro komerční účely, a zbylá patra by už pak byla vyskládaná z dřevěných modulů. O dodavateli modulů ještě není jasno, ale architekti už jednájí s firmou Nema, jelikož si myslí, že jsou jedinou českou firmou, která by takovou zakázku zvládla. Projekt je nyní ve fázi získávání územního rozhodnutí a poté bude potřeba získat stavební povolení. To může být ještě složitě, vzhledem k výšce projektu, která činí 30 metrů, a požárnímu limitu české normy. To však autory návrhu netrápí, jelikož mají v plánu vycházet z norem evropských, kde požární výška už tak omezující není a odkazují se na úspěšné vícepodlažní dřevostavby v zemích západní Evropy. [52] [53]



Obr. 37 - Vizualizace projektu bytového domu Fügnerova z arch. studia Mjölck [53]

4.2 Alpské státy

V alpských státech, kde trend dřevěných modulů vznikl, je růst sektoru tažen především středně velkými firmami zabývajícími se dřevostavbami. Pouze omezený počet z nich má však schopnost vyrábět moduly místností s kompletním vnitřním vybavením zcela ve vlastní režii. Vyčnívající v tomto směru je rakouská společnost Kaufmann Bausysteme, která je dominantním lídrem dřevěné modulární výstavby ve střední Evropě. Během jednoho dne jsou schopni vyprodukovat až 4 moduly a zároveň jich 10 instalovat na staveništích. Specializují se na větší projekty jako jsou školy nebo školky, hotely, studentské koleje, ubytovny či bytové domy. Jedním z prvních jejich významných projektů byl již zmiňovaný Alpenhotel Ammerwald. Přízemí je z železobetonu a tvoří základnu pro zbylá tři patra. Ta jsou vyskládána z 96 dřevěných modulů, které v Kaufmann Bausysteme stihli vyrobit za 31 dní a jejich následná montáž trvala dalších 10 dní. [32] [40] [54]



Obr. 38 - Alpenhotel Ammerwald [55]

Další projekt z jejich dílny jsou studentské koleje Woodie v německém Hamburku. V šesti patrech z CLT modulů, vyskládaných na železobetonovém podstavci, je 371 pokojů pro studenty, což z projektu Woodie dělá největší obytnou budovu z dřevěných modulů na světě. Při výstavbě se výrazně projevila výhoda sériové výroby, jelikož byly použity pouze dva typy modulů. [32] [56]



Obr. 39 - Studentské ubytování Woodie [32]

Rozšíření školy IGS Riedberg ve Frankfurtu bylo navrženo jako dočasná budova, kam žáci chodili, dokud se nedostavěla finální budova. Musela pojmout jídelnu, kabinety a 11 učeben, do kterých se muselo vlézt 200 žáků. Pro učebny bylo nejpraktičtější konfiguraci modulů rozvrhnout do dvou rovnoběžných řad spojených chodbou, která byla podepřena tíhou modulů. Takto byly provedeny tři patra a celkem bylo použito 90 modulů. Celý projekt byl navržen a zhotoven za 15 měsíců a stál o 20 % méně než typická škola. Přestože to byla pouze dočasná stavba, tak na žáky působila velmi pozitivně. Dokonce je budova zaujala natolik, že 80 % z nich si vybralo architekturu pro svůj individuální projekt. [32] [57]



Obr. 40 - Rozšíření školy IGS Riedberg ve Frankfurtu nad Mohanem [58]

Za zmínku stojí německá firma LiWood, která projektuje zejména studentské koleje nebo bytové domy. Dále firma Blumer Lehmann se základnou v Porýní a Nizozemsku, která v metropolitní oblasti Curychu staví lehce přemístitelné školy a školky. Tento koncept s názvem Züri-Modular vzniknul už v roce 1998 jako reakce na nedostatek těchto institucí v Curychu. Modularita umožnila rychlou výstavbu a zároveň nabídla možnost budoucího rozšíření nebo rozmontování a přesunutí na jiné místo. V roce 2012 byla vytvořena druhá generace těchto staveb, která je navržena úsporněji, a navíc umožňuje trojpatrovou konfiguraci. Na výstavbu těchto škol bylo doposud využito více než 1 000 modulů na více než 60 místech, a další se chystají. [32] [59]



Obr. 41 - Přemístitelná škola z projektu Züri-Modular [59]

4.3 Skandinávie

Nikoho asi nepřekvapí že ve Skandinávii je dřevo velmi populárním stavebním materiálem. Modulární přístup byl tedy jen další možností, jak tento materiál využít a dnes už ve Skandinávii funguje řada velkých firem co se takovou výstavbou zabývají.

Zajímavým konceptem je projekt BoKlok, na kterém se spojily dva švédští giganti IKEA a Skanska. Jedná se o rozlehlé komplexy bytových domů, které jsou sestaveny z dřevěných modulů prefabrikovaných Skanskou a vybaveny interiérem IKEA. Projekt byl propagován typickým IKEA marketingem, vyzdvihující jednoduchost a poměr velkého prostoru a nízké ceny, se zaměřením na klientelu s nižšími příjmy. Název BoKlok přeložen ze švédštiny znamená Live Smart. První areály byly dokončeny ve švédských městech už v roce 1997 a setkaly se s obrovským zájmem médií i zákazníků. V prodejnách IKEA se stály tak dlouhé fronty, že nebylo

dostatek bytů pro každého zájemce, což vedlo k výběrovému řízení založenému na slosování. Tento přístup zajistil spravedlnost a rovné příležitosti pro potenciální kupce, a proto je metoda losování dodnes způsobem, jak si vlastní BoKlok pořídit. Dnes už je na výběr z šesti různých variant modulových domů BoKlok a dohromady jich bylo zhotoveno přes 5 000. Z toho je většina ve Švédsku, ale několik projektů bylo zhotoveno i ve zbytku Skandinávie, Německu nebo Spojeném království. [60] [40]



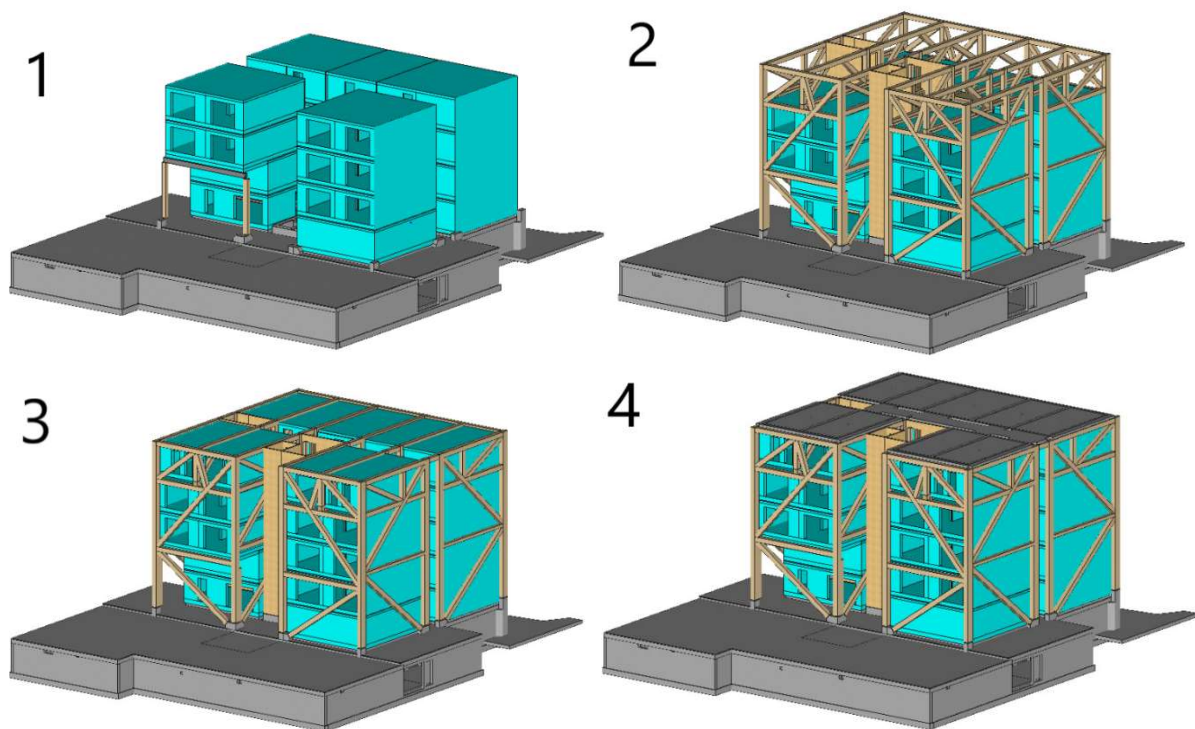
Obr. 42 – Bytové domy BoKlok [60]

Ve Finsku je nejvýraznějším modulárním projektem ze dřeva určitě bytový komplex Puukuokka ve městě Jyväskylä. Jedná se o tři bytové domy, z kterých ten nejvyšší má 8 pater a je složený ze 116 individuálních modulů. Projekt byl navržen společností OOPEAA, a zhotoven finským gigantem v oblasti dřeva, firmou Stora Enso, v roce 2014. Nosnou konstrukci tvoří CLT panely, z kterých jsou moduly sestaveny, místy ztužené BSH sloupy a nosníky. Stropní panely přenášejí zatížení do stěnových panelů, které ho přenesou až do základů. Přízemní patro je částečně provedeno z železobetonu. Předsazené konstrukce byly zajímavě řešené formou modulů, které byli zakotveny do fasády. Puukuokka získala uznání a ocenění za svůj udržitelný design a inspirovala podobné projekty dřevostaveb po celém světě. [61] [62]



Obr. 43 - Bytový komplex Puukuokka [62]

Stavba norské architektonické kanceláře Artec v jejich domovském městě Bergenu je hezký příklad nosných modulů podpořených sekundární nosnou konstrukcí. Jedná se o čtrnáctipodlažní bytový dům s názvem Treet, což v norštině znamená „strom“. Její název odkazuje na konstrukční řešení. To totiž lze přirovnat ke stromu, ale ve skutečnosti funguje spíše jako skříňka se zásuvkami. V této analogii představuje skříňka kostru z velkých vazníků z lepeného lamelového dřeva, zatímco zásuvky představují prefabrikované obytné moduly. První dvě patra jsou odlité z železobetonu a tvoří základ pro dřevěný nosný systém. Proces výstavby je znázorněn na obrázku č. 44. Na železobetonové desce jsou vystavěny první čtyři patra CLT modulů. Páté patro je vyztuženo příhradovými vazníky z lepeného lamelového dřeva, které jsou napojeny na vazníky hlavního nosného systému, a vyplněno speciálními moduly. Na strop tohoto vyztuženého podlaží je položena prefabrikovaná železobetonová deska, která přenáší zatížení z dalších čtyřech pater modulů nad ním do kostry z dřevěných vazníků. A pak se proces opakuje. [63]



Obr. 44 - Proces výstavby budovy Treet [63]

Budova byla dostavěna v roce 2015 a s výškou 49 metrů se ihned stala nejvyšší dřevěnou budovou na světě. Žebříček nejvyšších dřevěných budov je ale třeba brát s rezervou, jelikož není pevně daný limit, jak moc může být dřevo zkombinované s dalšími materiály, aby mohly budovy být v takovémto žebříčku uvedeny. Na základě dat mezinárodní organizace Council on Tall Buildings and Urban Habitat si Treet titul nejvyšší dřevěné budovy hájil až do roku 2019, kdy byl dokončen projekt Mjøstårnet na východě Norska. Tato osmnáctipatrová budova měří 85,4 metrů a nachází se v ní kromě bytů i hotel, restaurace, kanceláře, a dokonce i vnitřní bazén. Konstrukčním systémem jsou si s budovou Treet velmi podobné. Nosný systém totiž také tvoří masivní vazníky z lepeného lamelového dřeva, ale místo CLT modulů byly použity prefabrikované CLT stropní a stěnové panely. [63] [64] [65]



Obr. 45 – Vizualizace projektu Treet [65]

V roce 2016 vyhrál návrh White Arkitekter, jedné z největších architektonických kanceláří ve Skandinávii, konkurz na návrh nového kulturního centra pro město Skellefteå na severu Švédska. Vzhledem k dlouholeté tradici severanů využívat dřevo ke stavbě byla navržena budova převážně z tohoto materiálu, s občasným využitím ocelových prvků. Budova má několik úrovní, ve kterých se nachází divadelní sál, muzeum, galerie umění, knihovna, konferenční centrum a hotel. Právě k výstavbě hotelu byly využity dřevěné moduly. Jeho dvacetipatrová konstrukce se tyčí nad zbytkem budovy do výšky 75 metrů, což z Kulturhausu dělá jednu z nejvyšších dřevěných budov na světě. Jádrem budovy je složeno z CLT modulů, které jsou obklopeny dvěma masivními výtahovými šachtami vyrobenými také z CLT panelů. Nižší budova obklopující hotel je zkonstruována ze sloupů a nosníků z lepeného lamelového dřeva, s dodatečnými CLT jádry a smykovými stěnami. S navrženou životností 100 let je tato budova uhlíkově negativní, protože je v ní uloženo více než dvojnásobek emisí uhlíku způsobených provozní energií a ztělesněným uhlíkem z výroby materiálů, dopravy a výstavby. Tato budova nejenže ukázala, čeho je možné dosáhnout za použití dřeva a modulárního přístupu, ale také je skvělým příkladem udržitelnosti a ekologické šetrnosti tohoto materiálu a stavební metody. [66] [67]



Obr. 46 - Výstavba projektu Sara Kulturhaus [67]



Obr. 47 - Sara Kulturhaus [67]

Závěr

Domnívám se, že má práce o modulárních dřevostavbách objasnila potenciál této stavební metody. Poukázala na to, že modulární dřevostavby nabízejí řadu výhod, včetně vyšší efektivity, udržitelnosti a flexibility při navrhování a výstavbě. Využitím prefabrikovaných dřevěných modulů lze urychlit stavební projekty a snížit náklady na pracovní sílu při zachování standardů vysoké kvality.

Analýza případových studií a reálných příkladů ukázala úspěšné realizace modulárních dřevostaveb v různých regionech a zdůraznila jejich přizpůsobivost různým architektonickým stylům a funkčním požadavkům. Tyto budovy se ukázaly být nejen velmi estetické, ale také konstrukčně robustní a odolné, což svědčí o síle a univerzálnosti dřeva jako stavebního materiálu.

Kromě toho je třeba vyzdvihnout ekologické výhody modulárních dřevostaveb. Použití udržitelných dřevěných materiálů, které jsou obnovitelné a mají nižší uhlíkovou stopu ve srovnání s tradičními stavebními materiály, přispívá ke snížení emisí skleníkových plynů a podporuje ekologičtější stavebnictví. Možnost prefabrikace modulů v kontrolovaném továrním prostředí rovněž minimalizuje vznik odpadu a zvyšuje efektivitu využívání zdrojů.

Dále bylo poukázáno na ekonomickou stránku modulární dřevostavby. Efektivní výrobní proces, zkrácení doby výstavby a optimalizované využití materiálu vedou k úsporám nákladů pro developery a klienty. Kromě toho přizpůsobivost modulárních dřevostaveb umožňuje jejich snadné úpravy a rozšíření, což zvyšuje jejich dlouhodobou hodnotu.

Je nezbytné si uvědomit, že s výstavbou modulárních dřevostaveb jsou spojeny i určité problémy. Jako hlavní výzvy považuji překonání regulačních překážek, jako jsou limitující požární normy, a odstranění společenského stigma, který ilustruje tento způsob bydlení jako neprostorné a nezajímavé. Řešení těchto problémů vyžaduje spolupráci zúčastněných stran, včetně architektů, inženýrů, výrobců a zákonodárců, s cílem podpořit sdílení znalostí, inovace a vývoj norem.

Závěrem lze říci, že modulární dřevostavby nabízejí jednoduché a efektivní řešení pro splnění náročných požadavků stavebního průmyslu, jako je udržitelnost, efektivita a přizpůsobivost. Díky neustálému pokroku v oblasti technologií, designu a stavebních metod mají modulární dřevostavby dobré předpoklady k tomu, aby zásadním způsobem ovlivnily utváření budoucí zástavby. Představují slibnou cestu k vytváření udržitelných, estetických a efektivních budov, které vyhovují vyvíjejícím se potřebám naší společnosti a zároveň minimalizují naši ekologickou stopu.

Reference

- [1] **MARQUIT, Amanda.** *From Sears & Roebuck to Skyscrapers: History of Prefabricated and Modular Construction* [online]. 2013. [cit. 21.05.2023]. Dostupné z: https://a860-gpp.nyc.gov/concern/file_sets/w6634393n?locale=en
- [2] Habitat 67. *Wikipedia*. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Habitat_67#/media/File:Habitat_67,_southwest_view.jpg
- [3] **DENNIS, Curtis.** Vertical Engineering: Inside the World's Tallest Modular Building. *Modular Building Institute* [online]. 2022. [cit. 21.05.2023]. Dostupné z: <https://www.modular.org/2022/09/26/vertical-engineering-inside-the-worlds-tallest-modular-building/>
- [4] What is Modular Construction?. *Modular Building Institute*. [online]. [cit. 21.05.2023]. Dostupné z: <https://www.modular.org/what-is-modular-construction/>
- [5] **LEBBELL, Mark.** Re:Start Shopping Mall, Christchurch, New Zealand. *Flickr*. [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/markle1/6921347201/>
- [6] Bam Earthquake Region, 4 000 Man, 1 000 Modular Emergency Accommodation Units / Disaster Housing. *Dorce Prefabricated & Construction* [online]. [cit. 21.05.2023]. Dostupné z: [https://www.dorce.com/projects/bam-earthquake-region-4000-man-1000-modular-emergency-accommodation-units-disaster-housing/#iLightbox\[gallery_image_1\]/7](https://www.dorce.com/projects/bam-earthquake-region-4000-man-1000-modular-emergency-accommodation-units-disaster-housing/#iLightbox[gallery_image_1]/7)
- [7] **MUSA, M., M. R. YUSOF, M. MOHAMMAD a N.S. SAMSUDIN.** Towards the adoption of modular construction and prefabrication in the construction environment: A case study in Malaysia. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. [online]. 2012. [cit. 21.05.2023] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305550264_Towards_the_adoption_of_modular_construction_and_prefabrication_in_the_construction_environment_A_case_study_in_Malaysia
- [8] Modularita. *KOMA MODULAR*. [online]. 2023. [cit. 21.05.2023]. Dostupné z: <https://www.koma-modular.cz/modularita>
- [9] Adhesive Free Timber Buildings. *Interreg NWE*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: https://www.nweurope.eu/media/6498/brochuredigitalfinal1_toweb_20190515rev.pdf
- [10] An ecological alternative to CLT buildings. *katus.eu*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://katus.eu/learn/courses/clt-buildings-ecological-alternative>
- [11] Zalesňování bylo v loňském roce rekordní. *Český statistický úřad*. [online]. [cit. 22.05.2023] Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/zalesnovani-bylo-v-lonskem-roce-rekordni>
- [12] Deforestation and Forest Loss. *Our World in Data* [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/deforestation>

- [13] Kaskádový princip využívání dřeva je synonymem udržitelnosti. *PURLIVE.cz*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.purlive.cz/cz/o-nas/blog-purlive/145-kaskadovy-princip-vyuzivani-dreva-je-synonymem-udrzitelnosti.html>
- [14] Ze zkušenosti odborníků: Je akustika slabou stránkou dřevostavby?. *DřevoStavby*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.drevostavby.cz/vse-o-drevostavbach/stavba-drevostavby/ostatni/4923-2018-03-19-07-34-46>
- [15] **PASTORI, S., E. S. MAZZUCHELLI a M. WALLHAGEN**. Hybrid timber-based structures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2022. ISSN 09500618, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822031610>
- [16] **BÍLEK, Vladimír**. *Dřevostavby: navrhování dřevěných vícepodlažních budov*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03159-4.
- [17] **MAZANCOVÁ, Markéta**. Modulové domy: výhody a nevýhody. *ČESKÉSTAVBY.cz*. [online]. 2019. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/modulove-rodinne-domy-jejich-pro-a-proti-26954.html>
- [18] Kombinace dřeva a jiných stavebních materiálů – Uvádění stavebních výrobků na trh. *iMaterialy*. [online]. 2018. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/kombinace-dreva-a-jinych-stavebnich-materialu-uvadeni-stavebnich-vyrobku-na-trh_46467.html
- [19] Cement a dřevo - praktická kombinace s výhodnými vlastnostmi. *DřevoStavby*. [online]. 2016. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.drevostavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/izolace/3636-cement-a-drevo-prakticka-kombinace-s-vyhodnymi-vlastnostmi>
- [20] **HRÁZSKÝ, Jaroslav a Pavel KRÁL**. *Progressivní konstrukční materiály*. Lesnická a dřevařská fakulta MZLU v Brně. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_BC/Povinne_predmety/Technika_a_technologie_vyroby_lepenych_materialu_z_reziva_a_dyh/Materialy_LVL,PSL,ISL.pdf
- [21] Co jsou to KVH hranoly?. *Dřevo Smutný*. [online]. 2016. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://drevosmutny.cz/kvh-hranoly/#prettyPhoto>
- [22] **JAKOUBKOVÁ, Dana**. Technologie dřevostaveb: CLT panel je 5krát lepším izolantem než beton. *Dřevostavby*. [online]. 2017. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.drevostavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/4724-technologie-drevostaveb-clt-panel-je-5krat-lepsim-izolanem-nez-beton>
- [23] LVL (Laminated Veneer Lumber). *PERI Česká republika* [online]. Dostupné z: <https://www.peri.cz/produkty/betonarske-desky/lvl.html>
- [24] Parallam® PSL Beams. *Weyerhaeuser*. [online]. Dostupné z: <https://www.weyerhaeuser.com/woodproducts/engineered-lumber/parallam-psl/parallam-psl-beams/>

- [25] Laminated Strand Lumber (LSL). *Canadian Wood Council* [online]. Dostupné z: <https://cwc.ca/en/how-to-build-with-wood/wood-products/structural-composite/laminated-strand-lumber/>
- [26] TJI I-Joists. *Forest Products Supply*. [online]. Dostupné z: <https://www.fp-supply.com/tji-i-joists-omaha.html>
- [27] Dřevo má budoucnost – i v zateplování *DřevoStavby*. [online]. 2016 [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.drevostavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/izolace/4092-drevo-ma-budoucnost-n-i-v-zateplovani>
- [28] Velké srovnání dřevostaveb: výhody, nevýhody a ceny jednotlivých konstrukčních systémů. *Dřevostavitel*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/srovnani-drevostaveb>
- [29] CLT panely: Vrstvené masivní panely, které voní dřevem. *Dřevostavitel*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/clt-panely>
- [30] **KUKLÍK, Petr**. *Dřevěné konstrukce I*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01748-6.
- [31] CLT panely. *Naturfor*. [online]. Dostupné z: <https://naturfor.eu/clt-panely-2/>
- [32] **HUSS, W., M. KAUFMANN a K. MERZ**. *Building in Timber: Room Modules*. 2019. Mnichov: DETAIL, 2019. ISBN 978-3- 95553-494-3.
- [33] Raumzellen. *Baunetz_Wissen*. [online]. Dostupné z: <https://www.baunetzwissen.de/holz/fachwissen/holzbausysteme/raumzellen-6984683/gallery-1/3>
- [34] 50 Modular Timber Apartments / PPA architectures. *ArchDaily*. [online]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/787698/50-modular-timber-apartments-ppa-architectures>
- [35] **BHANDARI, S., M. RIGGIO, S. JAHEDI, E. C. FISCHER, L. MUSZYNSKI a Z. LUO**. A review of modular cross laminated timber construction: Implications for temporary housing in seismic areas. *Journal of Building Engineering*. [online]. 2023, Volume 63, Part A. [cit. 22.05.2023] ISSN 2352-7102. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222014917>
- [36] Dickinson Homes Modular Construction Photos. *Modular Today*. [online]. Dostupné z: <https://www.modulartoday.com/gallery-dickinsonconstruction.html>
- [37] ČSN EN 1995-1-2. Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [38] **GIJZEN, R. P. T.** *Modular cross-laminated timber buildings*. Delft, 2017. MSc Thesis. TU Delft. [online] [cit. 22.05.2023] Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:f687e2cc-86e1-442e-862a-2ceb382f7157?collection=education>
- [39] **DIND, A., S. LUFKIN a E. REY**. A Modular Timber Construction System for the Sustainable Vertical Extension of Office Buildings. *Designs*. [online]. 2018. [cit. 22.05.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/designs2030030>

- [40] **TULAMO, T., Y. CRONHJORT, V. RIIKONEN, M. KOLEHMAINEN, K. NORDBERG a W. HUSS.** *smartTES Innovation in timber construction for the modernisation of the building envelope Book 2 TES Extension* [online]. 2014. [cit. 22.05.2023] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/294086317_smartTES_Innovation_in_timber_construction_for_the_modernisation_of_the_building_envelope_Book_2_TES_Extension_10032014
- [41] Bathroom Pods. *Howick Ltd.* [online]. Dostupné z: <https://www.howickltd.com/modular-construction/bathroom-pods>
- [42] 5 Things you need to know about Modular Homes. *FirstBuild Modular Homes.* [online]. Dostupné z: <https://firstbuild.co.nz/5-things-you-need-to-know-about-modular-homes/>
- [43] Husleverans. *villanybrobygget.* [online]. Dostupné z: <https://villanybrobygget.wordpress.com/2014/01/15/husleverans/>
- [44] Média. *nema.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.nema.cz/media-nema>
- [45] **BAŠKOVSKÁ, Kateřina.** *Ekonomický model sociálního ubytování z montovaných buněk.* Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta stavební. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/81182>.
- [46] Moduly z Vizovic, které dobývají svět. KOMA MODULAR slaví 30 let a chystá se postavit vlastní modulární městečko. *CZECHDESIGN.* [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.czechdesign.cz/temata-a-rubriky/moduly-z-vizovic-ktere-dobývají-svet-koma-modular-slaví-30-let-a-chysta-se-postavit-vlastni-modularni-mestecko>
- [47] Pavilon ČR na světové výstavě EXPO. *KOMA RENT.* [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.koma-rent.cz/reference/pavilon-cr-na-svetove-vystave-expo>
- [48] Praktické informace. *nema-drevostavby.cz* [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.nema-drevostavby.cz/prakticke-informace#drevostavby-budoucnosti>
- [49] **BIBEN, Martin.** Budovat ze dřeva bude snazší. Česká firma umí díky nové hale stavět na klíč z prvků, které sama vyrobí. *Hospodářské Noviny* [online]. 2023 [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-67199710-budovat-ze-dreva-bude-snazsi-ceska-firma-umi-diky-nove-hale-stavet-na-klic-z-prvku-ktere-sama-vyrobi>
- [50] MODUL 4,5 X 12 + 4 X 3,1 M VYSOKÉ MÝTO. *MODULOS.* [online]. Dostupné z: <https://modulos.cz/reference/modul-45-x-12-4-x-31-m-vysoke-myto/>
- [51] Zlínský kraj. *Ekomodular.cz.* [online]. Dostupné z: <https://www.ekomodular.cz/realizace/zlinsky-kraj-3/>
- [52] Mjölck architekti chtějí v Liberci vztyčit modulární dřevostavbu. *CzechCrunch.* [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://cc.cz/mestsky-dum-jako-zadny-jiny-mjolk-architekti-hodlaji-v-centru-liberce-vztycit-modularni-drevostavbu/>
- [53] Bytový dům Fügnerova. *Mjölck.* [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.mjolk.cz/fugnerova>

- [54] Company. *Kaufmann Bausysteme*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://kaufmannbausysteme.at/en/unternehmen>
- [55] BMW-Hotel Alpenhof, Ammerwald (D). *Kaufmann Bausysteme*. [online]. Dostupné z: <https://kaufmannbausysteme.at/en/bmw-hotel-alpenhof-ammerwald-d>
- [56] "Woodie" Student Dormitory - Timber Prefab Modular Building in Hamburg, Germany. *Prefab Modular Homes and Buildings*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://blog.prefabium.com/2018/12/woodie-student-dormitory-timber-prefab.html>
- [57] IGS Kalbach-Riedberg by NKBAK. *Architectural Record*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.architecturalrecord.com/articles/13189-igs-kalbach-riedberg-by-nkbak>
- [58] Schulerweiterung IGS Riedberg, Frankfrut (D). *Kaufmann Bausysteme*. [online]. Dostupné z: <https://kaufmannbausysteme.at/en/schulerweiterung-igs-riedberg-frankfrut-d>
- [59] Züri-Modular by Bauart Architekten (753AR). *Atlas of Places*. [online]. Dostupné z: <https://www.atlasofplaces.com/architecture/zueri-modular/>
- [60] BoKlok – ready for the big world. *Skanska - Global corporate website*. [online]. 2011. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://group.skanska.com/media/articles/boklok--ready-for-the-big-world/>
- [61] Puukuokka Housing Block. *OOPEAA*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://oopeaa.com/portfolio/puukuokka-housing-block/>
- [62] Puukuokka Housing Block / OOPEAA. *ArchDaily*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/614915/puukuokka-housing-block-oopeaa>
- [63] **MALO, K., R. ABRAHAMSEN a M.A. BJERTNÆS**. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway. *European Journal of Wood and Wood Products*. [online]. 2016. [cit. 22.05.2023] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/298906052_Some_structural_design_issues_of_the_14-storey_timber_framed_building_Treet_in_Norway
- [64] **ABRAHAMSEN, Rune**. Mjøstårnet - Construction of an 81 m tall timber building. *Moelven*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---construction-of-an-81-m-tall-timber-building.pdf>
- [65] Treet. *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.skyscrapercenter.com/building/treet/16540>
- [66] Sara Cultural Centre opens – one of the world's tallest timber buildings. *White Arkitekter*. [online]. Dostupné z: <https://whitearkitekter.com/news/sara-cultural-centre-opens-one-of-the-worlds-tallest-timber-buildings/>
- [67] Sara Kulturhus Center / White Arkitekter. *ArchDaily*. [online]. [cit. 22.05.2023]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/967019/sara-kulturhus-center-white-arkitekter>
- [68] Pros + Cons: Modular vs. Stick Built Homes. *Lamacchia Realty*. [online]. Dostupné z: <https://www.lamacchiarealty.com/pros-cons-modular-vs-stick-built-homes/>

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 - Habitat 67 [2]</i>	9
<i>Obr. 2 - 101 George Street a v pozadí stavba College road [3]</i>	10
<i>Obr. 3 - Dočasné kontejnerové obchodní centrum Re:START po zemětřesení ve městě Christchurch na Novém Zéleandě [5]</i>	11
<i>Obr. 4 - Nouzové ubytovací moduly pro lidi postižené zemětřesením ve městě Bam v Íránu [6]</i>	12
<i>Obr. 5 - Životní cyklus dřeva [13]</i>	15
<i>Obr. 6 - Srovnání hranolů BSH a KVH [21]</i>	18
<i>Obr. 7 - Klínovitý zubovitý spoj KVH hranolů [21]</i>	18
<i>Obr. 8 - CLT panely [22]</i>	19
<i>Obr. 9 - Zleva: LVL, PSL, LSL [23] [24] [25]</i>	20
<i>Obr. 10 - Nosníky TJI [26]</i>	21
<i>Obr. 11 - Měkké dřevovláknité desky [27]</i>	22
<i>Obr. 12 - Platform frame [30]</i>	24
<i>Obr. 13 - Těžký skelet [30]</i>	25
<i>Obr. 14 - CLT panely připraveny na montáž [31]</i>	26
<i>Obr. 15 – Hrubá stavba z CLT panelů [22]</i>	26
<i>Obr. 16 - Impulszentrum ve Štýrské Hradci [33]</i>	28
<i>Obr. 17 - Uzavřený modul z CLT panelů [34]</i>	29
<i>Obr. 18 - Vlevo: Uzavřený modul Vpravo: Otevřený modul [35]</i>	30
<i>Obr. 19 - Rámová konstrukce modulu [36]</i>	30
<i>Obr. 20 - Varianty modulů sestavených kombinacemi konstrukčních systémů [32]</i>	31
<i>Obr. 21 - Instalace technických zařízení ve výrobní hale [32]</i>	33
<i>Obr. 22 - Příklad provedení předsazené konstrukce v modulární budově [32]</i>	34
<i>Obr. 23 - Moduly se střešní konstrukcí ve výrobní hale</i>	35
<i>Obr. 24 - Vlevo: Založení modulu se vzduchovou mezerou na železobetonovém pasu</i>	36
<i>Obr. 25 - Sanitární modul [41]</i>	37
<i>Obr. 26 - Schéma variant využití modulů podle jejich nosnosti [32]</i>	38
<i>Obr. 27 - Vizualizace provedení vertikální modulární přístavby [40]</i>	41
<i>Obr. 28 - Srovnání časového harmonogramu zhotovení projektu různými metodami [32]</i>	42
<i>Obr. 29 - Kompletace modulů ve výrobní hale [42]</i>	43
<i>Obr. 30 - Transport modulu zabaleného pro ochranu před povětrnostními podmínkami [43]</i>	44
<i>Obr. 31 - Zdvihání modulu za pomoci ocelového rámu [44]</i>	45

<i>Obr. 32 - Montáž modulu pomocí mobilního jeřábu vybaveného upínacími popruhy [43]</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 33 - Český pavilon na světové výstavě EXPO 2015 v Miláně [47].....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 34 - CNC obráběcí centrum v hale firmy Nema [44].....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 35 - Realizace projektu firmy Modulos [50]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 36 – Realizace dvoupodlažního projektu firmy Eko Modular [51]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 37 - Vizualizace projektu bytového domu Fügnerova z arch. studia Mjölck [53]</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 38 - Alpenhotel Ammerwald [55]</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 39 - Studentské ubytování Woodie [32]</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 40 - Rozšíření školy IGS Riedberg ve Frankfurtu nad Mohanem [58].....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 41 - Přemístitelná škola z projektu Züri-Modular [59]</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 42 – Bytové domy BoKlok [60].....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 43 - Bytový komplex Puukuokka [62]</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 44 - Proces výstavby budovy Treet [63].....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 45 – Vizualizace projektu Treet [65].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 46 - Výstavba projektu Sara Kulturhaus [67]</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 47 - Sara Kulturhaus [67].....</i>	<i>57</i>