Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Variantní řešení objektu malého rozsahu z prefabrikovaných dílců na bázi konopného betonu

Diplomová práce

Autor: Bc. Jaroslav Čermák

Vedoucí práce: Ing. Jozef Mitterpach, PhD.

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jaroslav Čermák

Dřevěné konstrukce a stavby na bázi dřeva

Název práce

Variantní řešení objektu malého rozsahu z prefabrikovaných dílců na bázi konopného betonu

Název anglicky

Variant solution of small building from prefabricated parts based on hemp concrete

---

Cíle práce

Předmětem této diplomové práce je variantní řešení prefabrikovaných dílců na bázi konopného betonu využitých při výstavbě objektů malého rozsahu. Projektová dokumentace zadaného objektu bude provedena ve stupni realizační dokumentace. Dále součástí práce bude vypracování statického posudku min. 2 konkrétních zvolených nosných prvků a třech detailů vybraných spojů, posouzení obvodového pláště z hlediska tepelně technického vč. řešení vlhkostních charakteristik navrženého systému. Poslední části diplomové práce bude návrh rozpočtu konstrukční části objektu.

Metodika

Metodika zpracování:

1) Rešerše zvolené problematiky (cca 40 stran) – do 09/2022

2) Dílčí část projektové dokumentace pro realizaci staveb – do 01/2023

a) Technické zprávy

b) Kompletní výkresová část (M 1:100, M 1:50)

3) Tepelně technické a vlhkostní posouzení obvodových konstrukcí – viz ČSN 730540-2 (2011) – do 02/2023

4) Statický posudek konkrétních zvolených nosných prvků a třech detailů vybraných spojů – do 03/2023

5.) Návrh rozpočtu pro konstrukční část objektu. – do 03/2023

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran textu + výkresová část (rozsah dle stavebního zákona č. 186/2006 Sb. a vyhlášky o dokumentaci staveb č. 499/2006 Sb.)

Klíčová slova

prefabrikované dílce, kompozity, konopný beton, malé stavby, realizační dokumentace

---

Doporučené zdroje informací

Bílek, V. a České vysoké učení technické v Praze. Stavební fakulta. Dřevostavby: navrhování dřevěných vícepodlažních budov. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 9788001031599;8001031594.

Dickson, M., Parker, D. a Česká rada pro šetrné budovy. Sustainable timber design. First publish. New York;Abingdon;: Routledge, 2015. ISBN 9780415468084;0415468086

Green, M. a Taggart J. Tall wood buildings: design, construction and performance. Basel: Birkhäuser, 2017. ISBN 3035604754;9783035604757.

Jami, Tarun, Karade S.R., Singh L.P. A review of the properties of hemp concrete for green building applications. Journal of Cleaner Production, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852

Kolb, J. Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 2., aktualiz. vyd. v České republice. Přeložil Bohumil KOŽELOUH. Praha: Grada, 2011. ISBN isbn978-80-247-4071-3.

Kuklík, P., Kuklíková, A. Navrhování dřevěných konstrukcí: příručka k ČSN EN 1995-1. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2010. ISBN 8087093887;9788087093887.

Tran Le, A.D., Maalouf, C., Mai T.H., Wurtz E., Collet F. Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. Energy and Buildings 42, 1797–1806. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.016

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Jozef Mitterpach, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 20. 7. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Variantní řešení objektu malého rozsahu z prefabrikovaných dílců na bázi konopného betonu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 5.4.2023 _____

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Jozefu Mitterpachovi, PhD. za pomoc a odborné směrování v postupu práce. Dále bych chtěl touto cestou vyjádřit svou vděčnost společnosti perspektiveLAB.s.r.o., konkrétně Ing. arch. Jakubu Volkovi, který mi umožnil podílet se v rámci diplomového projektu na projekčních činnostech plánovaného areálu Centra ekologického zemědělství Trója. Děkuji také své rodině za ohleduplnost a trpelivost. Největší dík patří mé přítelkyni, která mě po celou dobu intenzivně podporovala a stála mi po boku za každé situace.

Variantní řešení objektu malého rozsahu z prefabrikovaných dílců na bázi konopného betonu

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá návrhem systému prefabrikovaných dílců na bázi konopného betonu a vhodného konstrukčního řešení pro uplatnění této technologie. V rámci projektu bylo vytvořeno architektonické a dispoziční řešení objektu menšího rozsahu s důrazem na tvarovou optimalizaci energetické náročnosti stavby. Projekt byl zpracován formou realizační dokumentace v podobě technické zprávy, situačních výkresů, půdorysných řezů, typických svislých řezů, pohledů a schémat kladení prefabrikátů konstrukčních prvků a konopných panelů. Výkresová dokumentace byla vytvořena za pomoci softwarů Revit a AutoCAD. V navazujících částech bylo v softwaru Teplo 2017 provedeno tepelně technické a vlhkostní posouzení dvou materiálových variant obvodového pláště a v softwaru Dlubal RFEM statické posouzení nosné konstrukce. Nasledně byly ručně vyhotoveny statické posudky a optimalizace variantních řešení specifických spojů. Závěrečná část zpracovaná v program KROS 4 se zabývá rozpočtem hrubé stavby. Výsledky poskytují přehled o vhodných variantách skladeb obvodového pláště a systému konstrukčních spojů. Finální návrh vyhovuje všem požadavkům a jednotlivé části diplomové práce potvrzují jeho proveditelnost. Tato práce a její závěry budou použity jako podklad pro plánovaný projekt Centra ekologické výchovy Troja.

Klíčová slova: konopný beton, geodetická kopule, dřevostavba, prefabrikované dílce, kompozity, malé stavby, projektová dokumentace

Variant solution of small building from prefabricated parts based on hemp concrete

Abstarct:

The diploma thesis deals with the design of a prefabricated components system based on hempcrete and a suitable structural solution for the application of this technology. As part of this project, an architectural and layout solution for a smaller-scale building was created with shape optimization of the building's energy efficiency. The project was processed as an implementation plan in the form of a technical report, site plan drawings, floor plans, typical vertical sections, views and schemes for laying prefabricated structural elements and hemp panels. The drawing part was created using Revit and AutoCAD software. The thermal technical and moisture assessment of two material variants of the outer casing was carried out in the Teplo 2017 software, and the construction analysis of the supporting structure was carried out in the Dlubal RFEM software. Subsequently, static assessments and optimization of variant solutions of specific joints were manually prepared. The final part processed in the KROS 4 program deals with the main construction budget. The results provide an overview of the shell composition suitable variants and the system of structural joints. The final proposal meets all requirements, individual parts of the thesis confirm its feasibility. This work and its conclusions will be used as a fundamental background for the planned project The Center of Ecological Education Troja.

Keywords: hempcrete, geodesic dome, wooden construction, prefabricated parts, composites, small constructions, project documentation

Obsah

1 Úvod ... 14

2 Cíl práce ... 15

3 Literární rešerše ... 16

3.1 Dřevo ve stavebnictví ... 16

3.1.1 Dřevní surovina ... 16

3.1.2 Materiály na bázi dřeva pro nosné konstrukce ... 16

3.2 Dřevostavby z pohledu prefabrikace ... 24

3.2.1 Historie a vývoj prefabrikace dřevostaveb ... 24

3.2.2 Prefabrikované dřevostavby v současnosti ... 30

3.2.3 Stupně prefabrikace ... 32

3.3 Tvarová optimalizace energetického návrhu budovy ... 34

3.4 Kopulové systémy s rámovou konstrukcí ... 37

3.4.1 Obecné definice a hlavní charakteristiky ... 37

3.4.2 Geodetické kopule ... 37

3.4.3 Příklady dalších konstrukčních systémů ... 40

3.4.4 Zhodnocení základních stavebních materiálů ... 45

3.5 Konopný beton ... 50

3.5.1 Výrobní specifikace konopného betonu ... 51

3.5.2 Aplikace konopného betonu ... 53

3.5.3 Technické parametry ... 56

4 Metodika ... 59

4.1 Arichetktonicko-stavební řešení formou realizační dokumentace ... 59

4.2 Tepelně technické a vlhkostní posouzení obvodových konstrukcí ... 59

4.3 Statický posudek ... 60

4.3.1 Vlastní tíha a užitné zatížení ... 60

4.3.2 Zatížení sněhem ... 60

4.3.3 Zatížení větrem ... 61

4.3.4 Posouzení dvou konstrukčních prvků ... 61

4.3.5 Posouzení konstrukčních spojů ... 61

4.4 Cenový rozpočet konstrukční části ... 62

5 Výsledky ... 63

5.1 Stavebně konstrukční řešení ... 63

5.1.1 Urbanistické a architektonické řešení ... 63

5.1.2 Konstrukční a materiálové řešení ... 63

5.2 Statická analýza ... 64

5.2.1 Vlastní tíha a užitné zatížení ... 64

5.2.2 Zatížení sněhem ... 64

5.2.3 Zatížení větrem 65
5.2.4 Posouzení konstrukčních prvků 65
5.2.5 Posouzení konstrukčních spojů 65
5.3 Tepelně technické zhodnocení obvodového pláště 66
5.4 Cenový rozpočet konstrukční části 66
6 Diskuze 67
7 Závěr 68
8 Literatura 69
9 Seznam příloh 76

Seznam obrázků

Obr. 1: Stavební řezivo (Dataholz.eu, 2023) 17

Obr. 2: Ozubový spoj KVH hranolu (DŘEVO SMUTNÝ, 2023)....17

Obr. 3:Lepené masivní dřevo (Dataholz.eu, 2023)....18

Obr. 4: Typizovaný sortiment BSH (PUUINFO, 2022) 19

Obr. 5: Ukázka použití lepeného lamelového dřeva pro tvarované konstrukce (BeautexWood, 2020) 19

Obr. 6: vlevo – nosník se stojnou z OSB; vpravo – nosník se stojnou z DHF (ČeskýTesař.cz, 2023) 20

Obr. 7: Manipulace LVL prvku na staveništi (STEICO, 2023)....21

Obr. 8: PSL nosník (Weyerhaeuser, 2023) 22

Obr. 9: Pětivrstvý CLT panel (CLT SLOVAKIA, 2023) 23

Obr. 10: Interiér rodinného domu z CLT (3AE, 2022)....23

Obr. 11: Porovnání: Vlevo – Döckerův spoj svislých stěn (KORYCIŃSKI, et al., 2017), vpravo trámová skrytá spojka Rothoblaas (ROTHOBLAAS, 2023)....25

Obr. 12: Dobové foto realizace (vlevo)a fragment výkresové dokumentace (vpravo) Döckerova patentu (KORYCIŃSKI, et al., 2017)....26

Obr. 13: Katalogový dům Hamilton, číslo 102 (Sears Archives, 2023) 27

Obr. 14: Proces výstavby General Panel System (The General Panel Corporation, 2021) 28

Obr. 15: Přeprava komponentů General Panel System z továrny na staveniště v roce 1947 (The General Panel Corporation, 2021) 28

Obr. 16: Procentuální srovnání plochy obvodového pláště různých prostorových těles o totožném objemu vztažené k referenčnímu tvaru krychle (Hegger, 2008)....34

Obr. 17: Vyhodnocení geometrické účninnosti GE pro různé ortogonální objemy (Parasonis, 2012) 35

Obr. 18: Vliv tvaru objektu na potřebu tepla na vytápění – porovnání poměru ochlazovaných ploch vůči objemu stavby 36

Obr. 19: Zleva – tetraedr, oktaedr, ikosaedr (Davis, 2011) 38

Obr. 20: Schématické znázornění frekvenčního dělení geodetického systému (PACIFICDOMES, 2023) 38

Obr. 21: Princip deformace šestiúhelníkové geometrie při silovém namáhání (WangerFlange, 2023) 39

Obr. 22: Příklady konstrukčních řešení příhradových kopůlí (Narayanan, 2006) 41

Obr. 23: Příklady geometrie příhradových konstrukcí (Narayanan, 2006) 41

Obr. 24: Schéma konstrukčního řešení žebrové kopule z masivních prvků (Narayanan, 2006) 42

Obr. 25: Schwedlerova kopule na střeše plynárny – Fichtebunker, Berlin (Macdonald, 2017) 43

Obr. 26:Schémata typických geometrií Schwedlerovy kopule (Narayanan, 2006) 43

Obr. 27: Základní geometrie Föpplovy kopule (Narayanan, 2006) 44

Obr. 28: Příklady geometrie lamelových systémů (Narayanan, 2006) 45

Obr. 29: CAD model experimentální stavby Recycleshell (Digital Timber Construction, 2019) 46

Obr. 30: Lehká ocelová konstrukce geodetické kopule s využitím RBNB (GLAMPING-DOME-TENTS, 2023) 47

Obr. 31: Montáž stanu geodetické kopule (vlastní fotografie) 47

Obr. 32: Kopůle s hliníkovou konstrukcí a celoplošným zasklením o průměru 23 m (VIKING DOME, 2023) 48

Obr. 33: Železobetonová kopule – Bellinzona Švýcarsko (vlastní fotografie) 49

Obr. 34: Vlevo – zhutněný konopný beton v dočasném bednění, vpravo – povrch po odbednění (THE LAST STRAW, 2014; OZHEMP, 2020) 54

Obr. 35: Aplikace konopného betonu nástřikem (Lupu, 2022) 55

Obr. 36: Nosný stěnový systém z prefabrikovaných tvarovek na bázi konopného betonu (HempBuild Magazine, 2021) 55

Obr. 37: Tvarové součinitele zatížení sněhem pro válcovou střechu (ČSN EN 1991-1-3 ed. 2, 2022) 61

Seznam grafů

Graf 1: Výstavba rodinných domů v letech 2000–2021 (Trandová, 2021) 30

Graf 2: Podíl jednotlivých konstrukčních systémů ve výstavbě dřevostaveb v roce 2021 (Trandová, 2021) 31

Seznam tabulek

Tab. 1: Srovnání materiálovych charakteristik certifikovaného produktu konopného betonu a vybraných tepelněizolačních materiálů (Majringer, 2019; STEICO SE, 2019; ISOVER SAINT-GOBAIN, 2021) 56

Tab. 2: Hodnoty součinitele prostupu tepla materiálu Hemcrete® pro různé tloušťky (Majringer, 2019) 57

Tab. 3: Srovnání materiálovych charakteristik certifikovaných tvarovek z konopného betonu a běžných variant tvrarovek pro pasivní domy (LAUDATOSI, 2023; Wienerberger, 2023; Xella CZ, 2022) 57

Tab. 4: Závislost mechanických a tepelných vlastností konopného betonu na jeho hustotě a míchacím poměru (Lupu, 2022) 58

1 Úvod

Současný světový vývoj také staví stavební průmysl i celou společnost před řadu závažných problémů. V posledních letech střídavě dochází k nedostatku stavebních materiálů a dramatickému nárůstu jejich cen, zpřísňují se legislativní a normativní požadavky na energetickou náročnost a udržitelnost staveb. Kromě negativního vývoje ve stavebním sektoru dochází také k řadě energetických, ekonomických a společenských krizí. To vše nekompromisně vede k tomu, že soukromá výstavba a samostatné bydlení se stávají pro čím dál větší procento lidí nedosažitelným luxusem. Tempo vývoje těchto negativních vlivů je rychlé a nepředvídatelné. Stavebnictví proto musí začít na tato témata co nejrychleji reagovat.

Dalším neopomenutelným faktorem je environmentální situace ve světě, která se v posledních desetiletích výrazně zhoršuje. Dochází k citelným změnám klimatu, paralelně s tím narůstají přírodní katastrofy, životní prostředí bojuje se znečištěním. Lidstvo musí začít aktivně snižovat emise CO2, vytvářet technická řešení zaměřená na využití přírodních materiálů s minimálním množstvím odpadu v procesu jejich výroby. Za takové stavební materiály se považuje dřevo a materiály na něm založené. Jedná se o trvale obnovitelný zdroj, který se snadno zpracovává a nedopouští se produkce škodlivých anorganických látek.

Logickou odezvou na tyto problémy je mimo jiné navyšování požadavků na tepelnou ochranu budov. Vývoj tepelně izolačních materiálů ovšem značně zaostává. Tepelné izolace uplatňované obytné i komerční výstavbě jsou často technologie známé již desítky let a jejich parametry se nijak zvlášť nevylepšují. Většina z nich má navíc vážné dopady na životní prostředí. Vyhovět vzrůstajícím požadavkům na energetickou náročnost budov lze prakticky jen postupným přidáváním dalších vrstev tepelných izolací. Řada projektů díky tomu ale ztrácí nejen ekonomický smysl, zhoršuje se také ekologická stránka staveb. To je přesně opačná tendence než ta, na kterou cílí ony snahy o energetické úspory. I v tomto směru je tedy jednoznačně nezbytné zvolit cestu přírodních obnovitelných surovin s maximální sekvestrací uhlíku a ideálně nulovými emisemi CO2. Konopný beton splňuje všechna tato důležitá kritéria a je bezkonkurenčním řešením v politice udržitelné výstavby.

2 Cíl práce

Předmětem této diplomové práce je variantní řešení prefabrikovaných dílců na bázi konopného betonu využitých při výstavbě objektů malého rozsahu. Projektová dokumentace zadaného objektu bude provedena ve stupni realizační dokumentace. Dále součástí práce bude vypracování statického posudku min. 2 konkrétních zvolených nosných prvků a třech detailů vybraných spojů, posouzení obvodového pláště z hlediska tepelně technického vč. řešení vlhkostních charakteristik navrženého systému. Poslední částičástí diplomové práce bude návrh rozpočtu konstrukční části objektu.

3 Literární rešerše

3.1 Dřevo ve stavebnictví

3.1.1 Dřevní surovina

Historické prameny hovoří o dřevu jako o nejstarším stavebním materiálu. První dřevěná obydlí vznikala již v období pravěku. Technologie využití dřeva v architektuře se vyvíjely po celou lidskou historii až do dnes, a přestože s objevy moderních materiálů jako je ocel, beton nebo cihla ztratilo do značné míry dřevo svou atraktivitu, v současné době opět zaznamenáváme celosvětový nárůst podílu staveb na bázi dřeva. (Růžička, 2006)

Dnes je dřevo hlavním zástupcem kategorie zcela obnovitelných a recyklovatelných materiálů. Mezi jeho hlavní přednosti patří nízká hmotnost při relativně vysokých pevnostech (v porovnání s jinými materiály), odolnost vůči dynamickým zatížením, dobré tepelně izolační vlastnosti snadná pracovatelnost a relativně lehká manipulace. Jeho hlavními materiálovými charakteristikami jsou anizotropie, heterogenita, hydroskopicita a pórovitost, z čehož bohužel plyne i řada nevýhod. Vlastnosti dřeva jsou velmi variabilní, a to i v rámci jednoho stavebního elementu, kvůli navlhavosti a nasáklivosti dochází k rozměrovým změnám, dřevo je zápalné a hořlavé. Dále je kvůli svému organickému charakteru náchylné k biologické degradaci vlivem působení dřevokazného hmyzu a hub. (Požgaj, 1993)

3.1.2 Materiály na bázi dřeva pro nosné konstrukce

Stavební řezivo

Stavební řezivo je pevnostně tříděné konstrukční dřevo, které se vyrábí pro nosné aplikace řezáním nebo profilováním kulatiny v pilařském provozu. Pro stavební účely musí být masivní dřevo klasifikováno podle jeho pevnosti vizuálním nebo strojním tříděním podle ČSN EN 14081-1. Platí různé třídy pevnosti. Řezivo lze dále zušlechťovat tím, že je podrobeno dalším zpracovatelským krokům, např. umělé sušení, hoblování, srážení hran a dodatečné profilování. Přirozená odolnost (proti biologickému napadení) konstrukčního masivního dřeva se odvíjí od použité dřeviny. Trvanlivost lze zvýšit ošetřením preventivními biocidy. Je třeba dodržovat požadavky normy ČSN EN 15228. (Dataholz.eu, 2023)

Obr. 1: Stavební řezivo (Dataholz.eu, 2023)

KVH – konstrukční dřevo nastavené zubovým spojem (Konstruktionsvollholz)

KVH je konstrukční stavební dřevo délkově nastavované tzv, cinkovým (ozubovým) spojem. Někdy se používá také anglický termín Solid Structural Timber (SSL). Jde o sušený, čtyřstranně frézovaný a tloušťkově egalizovaný hranol o maximálním průřezu 140 x 240 mm. Hlavní myšlenkou technologie KVH je eliminace vad dřeva jejich výřezem a následným slepením nakrácených výřezů požadované kvality. Při pořezu je také dbáno na podélné rozříznutí, nebo úplné odstranění dřeně. KVH hranol může být téměř v libovolné délce, česká výroba se potkává s hranoly o délce do 18 m. Specifikace pro spojování zubovým spojem jsou uvedeny v ČSN EN 15497. Tato norma definuje maximální vlhkost dřeva 18 %. Lepidlo použité k lepení lamely musí splňovat požadavky na nosné konstrukční dřevěné prvky. Stejně jako stavební řezivo je KVH do pevnostních tříd za pomoci vizuálního nebo strojního třídění podle normy ČSN EN 14081-1. Ošetření biocidy rovněž musí odpovídat požadavkům ČSN EN 15228. (Böhm, 2012)

Obr. 2: Ozubový spoj KVH hranolu (DŘEVO SMUTNÝ, 2023)

Vícevrstvé konstrukční dřevo (Duo – Trio hranoly)

Lepené masivní dřevo se skládá z několika totožných lamel stejné pevnostní třídy, které jsou podélně slepeny vzájemně spojeny. V zásadě se jedná o nejčastěji dvoj až troj vrstevné KVH hranoly. Podle ČSN EN 14080 lepené masivní dřevo obsahuje až pět lamel o tloušťce od 45 do 85 mm. Celkový průřez nosníku ale nesmí přesáhnout 280 x 280 mm. Tento výrobek se používá na ohybem namáhané prvky konstrukce. Orientace konkávní a konvexní strany jednotlivých lamel by se měla střídat, přířezy jsou k sobě navzájem lepeny levou stranou (stranou vzdálenější od středu kmene). Díky tomu se zajistí tvarová stabilizace a eliminace příčného borcení lamel. Jednotlivé lamely se opět hodnotí a třídí do pevnostních tříd normy ČSN EN 338. (Dataholz.eu, 2023)

Obr. 3:Lepené masivní dřevo (Dataholz.eu, 2023)

BSH – lepené lamelové dřevo (Brettschichtholz)

BSH známé také pod pojmem glulam se vyrábí z délkově nastavovaných a následně tloušťkově lepených dřevěných lamel. Dle ČSN EN 14080 tvoří lepené lamelové dřevo minimálně dvě lamely o tloušťce od 6 do 45 mm. Dřevo se čtyřstranně hobluje a opět třídí do pevnostních tříd vizuálním nebo strojním tříděním. Lepidlo použité k lepení lamel musí splňovat požadavky pro nosné konstrukční dřevěné prvky. Lze rozlišit homogenní (všechny lamely napříč průřezem nosníku patří do jedné pevnostní třídy) a kombinované (vnější a vnitřní lamely patří do různých pevnostních tříd) lepené lamelové dřevo. Pro každou z těchto dvou konfigurací ČSN EN 14080 definuje sedm různých typů pevnostních tříd. Lepené lamelové dřevo je zvláště vhodné pro vysoce namáhané díly, velkorozponové konstrukce a konstrukční elementy, které musí splňovat přísné požadavky na rozměrovou stálost a vzhled. Lze vyrábět přímé i zakřivené nosníky. (Böhm, 2012)

Obr. 4: Typizovaný sortiment BSH (PUUINFO, 2022)

Obr. 5: Ukázka použití lepeného lamelového dřeva pro tvarované konstrukce (BeautexWood, 2020)

I – nosníky

I-nosníky nebo dvojité T-profily jsou kompozitní prvky na bázi dřeva. Skládající se ze dvou pásnic a mezilehlé stojny. Všechny části jsou slepeny dohromady. Jsou určeny pro nosné části stěnových, stropních i střešních konstrukcí. Dle Eurokódu 5 je jejich použití omezeno na třídy provozu 1 a 2, tedy v takových případech, kde podmínky prostředí nepřesahují teplotu 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 85 % déle než několik dní v roce. Horní a spodní pásnice jsou vyrobeny převážně z pevnostně tříděného konstrukčního dřeva, lepeného lamelového dřeva nebo vrstveného dřeva. Stojny se vyrábí převážně z orientovaných třískových desek OSB 3 nebo OSB 4, nebo tvrdých dřevovláknitých desek DHF podle podmínek stanovených v ČSN EN 622-2. Materiály, rozměry a mechanické vlastnosti výrobku se odvíjí od technologických postupů výrobce a jsou uvedeny v Evropském technickém posouzení (ETA). (Dataholz.eu, 2023)

Obr. 6: vlevo – nosník se stojnou z OSB; vpravo – nosník se stojnou z DHF (ČeskýTesař.cz, 2023)

LVL - Vrstvené dřevo (Laminated veneer lumber)

LVL se používá jako panelový nebo nosníkový systém. Skládá se z loupaných smrkových nebo borovicových dýh tloušťky do 6 mm. Vyrábí se procesem kontinuálního lisování za použití fenolové pryskyřice. Rozměry jsou limitovány pouze kapacitami výrobních linek. Pevnost materiálu je zajištěna přeplátováním konců jednotlivých vrstev. Tento výrobek využívá nekolikanásobně vyšších pevností dřeva v axiálním směru, než ve směrech radiálním a tangenciálním. Na rozdíl od překližek proto jednotlivé vrstvy mají primárně stejnou orientaci vláken. Tato varianta se používá v nosných konstrukcích, vaznících, trámech a krokvích.

Převážně deskové varianty pro nosné stropy a podlahy mohou mít jednotlivé vrstvy orientované i kolmo. Obecně lze tento materiál použít pro stejné aplikace jako lepené lamelové dřevo. LVL je možné velmi snadno a kvalitně ošetřit tlakovou impregnací, a proto se mimo jiné hodí i pro speciální aplikace, jako jsou oblasti s vysokým rizikem biologického napadení a nepříznivých klimatických podmínek. (Dataholz.eu, 2023)

Obr. 7: Manipulace LVL prvku na staveništi (STEICO, 2023)

PSL – Parallam (Parallel Strand Lumber)

PSL se vyrábí z pásků dýhy o tloušťce přibližně 3 mm, šířce 15 mm a délce až 2,6 m. Technologie výroby je dále velmi podobná výrobě LVL. Pásky jsou orientovány rovnoběžně a před lisováním jsou navrstveny tak, aby došlo k přesazení konců a provázání. Lisování probíhá v kontinuálním lisu s mikrovlným ohřevem, výstupem je prakticky nekonečný nosník. Ovbyklé průřezy jsou do výšky 500 mm a šířky 300 mm. Větší průřezy se získávají slepením menších do jednoho celku. K lepení se používá fenol-formaldehydová pryskyřice, která barevně zvýrazňuje texturu tohoto materiálu a zbarvuje ho do červena. Pevnost v ohybu je srovnatelná s LVL, pevnost v tlaku a smyku je vyšší. PSL je navrženo pro použití v konstrukcích s dlouhými volnými rozpony. (Dataholz.eu, 2023)

Obr. 8: PSL nosník (Weyerhaeuser, 2023)

CLT – křížem vrstvené dřevo (Cross Laminated Timber)

Technologie někdy též nazývaná jako Xlam nebo KLH představuje prefabrikované velkoformátové vícevrstvé lepené konstrukční panely z masivního dřeva. Základním elementem jsou fošny nebo prkna tloušťky 10–45 mm a šířky 80–240 mm. Ty jsou naskládány vedle sebe a plošně lepeny nejčastěji ve 3, 5, nebo 7 vrstvach (někteří výrobci pracují i s bočním lepením prken). Sousední vrstvy jsou uloženy kolmo na sebe, což zabezpečuje tvarovou stabilitu panelu. Tloušťka panelu se obvykle pohybuje v rozsahu 60–240 mm. Výška CLT panelu se pohybuje kolem 3 m, ale odvíjí se především od požadavků projektové dokumentace. Délka je teoreticky neomezená, limitující jsou kapacity výrobní linky, komplikovaná přeprava a obtížná manipulace. Způsoby spojování jsou poměrně snadné, proto jsou většinou výhodnější menší dimenze dlouhé obvykle do 16–18 m. Požadavky na výrobu a vlastnosti CLT jsou standardizovány v normě ČSN EN 16351. Hlavní výhodou tohoto materiálu je především možnost prefabrikace a maximálně přesného automatického opracování CNC technologiemi. CLT panely jsou ucelený konstrukční systém, který se aplikuje na konstrukce stěn, stropů,

střech, schodišť aj. Současná stavební legislativa v ČR dovoluje uplatnění panelů z křížem vrstveného dřeva převážně jen v oblasti rodinných domů. Technické parametry a způsoby provádění staveb ale umožňují použití křížem vrstveného dřeva i u vícepodlažních budov. Řada studií považuje CLT panely za plnohodnotnou náhradu železobetonu. (Pavlas, 2016)

Obr. 9: Pětivrstvý CLT panel (CLT SLOVAKIA, 2023)

Obr. 10: Interiér rodinného domu z CLT (3AE, 2022)

3.2 Dřevostavby z pohledu prefabrikace

Pojmem prefabrikace označujeme ve stavební praxi takový výrobní proces stavebních dílů. tzv. prefabrikátů, při němž jsou stavební výrobky v různém stupni finalizace zhotoveny v předem stanovených kvalitativních, rozměrových a tvarových požadavcích již v podmínkách specializovaného závodu. Může se jednat o jednotlivé stavební prvky, ale i celé konstrukce či stavby. Prefabrikáty se následně dopravují na staveniště, kde se za pomoci mechanické a ruční manipulace usazují, případně v závislosti na stupni finalizace spojují do požadovaného celku. (HOTOVEDOMY.CZ, 2023)

Další definicí tohoto pojmu vztaženou přímo k oblasti dřevostaveb může být: *„Stavba, která obsahuje významné části postavené mimo staveniště, v továrně a poté smontována na místě, využívá výhod prefabrikované konstrukce. V některých případech mohou být jednotlivé části konstrukce prefabrikovány a v jiných případech mohou být téměř všechny součásti vyrobeny v továrně. Díky všestrannosti, nižší hmotnosti a snadnému zpracování se dřevo dobře hodí pro prefabrikované stavební metody. Takové budovy se obvykle staví pomocí jednoho ze dvou přístupů: jako sestava dílů nebo jako sestava hotových modulů.“* (Naturally:wood, 2023)

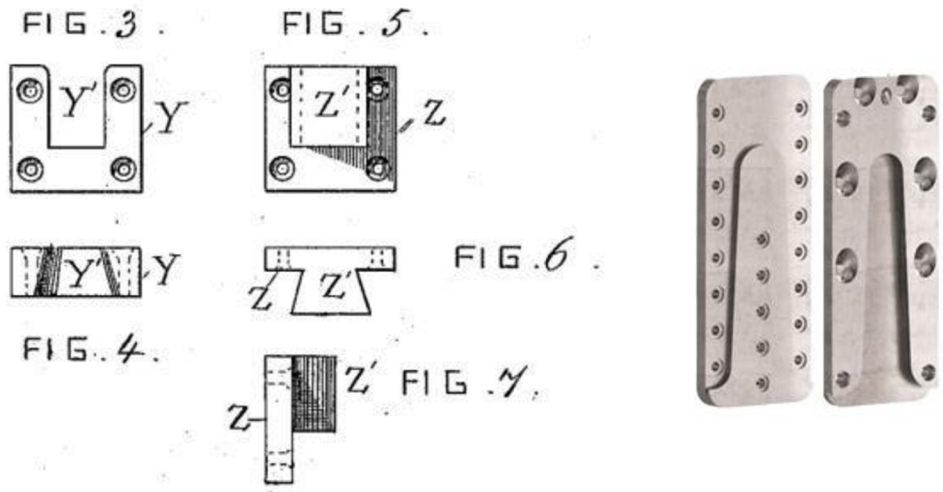
3.2.1 Historie a vývoj prefabrikace dřevostaveb

Počátky prefabrikované výstavby sahají až do roku 1624, kdy byl z Anglie až do Cape Ann ve Spojených státech přepraven demontovaný dům. Tato událost proběhla za účelem implementace osvědčených Anglických stavebních technik v nově vzniklých osadách z roku 1620. Pravděpodobně první zaznamenaná prefabrikace odpovídající současným výkladům tohoto pojmu proběhla kolem roku 1650. Jednalo se o kompletní zásilku předem nařezaného dřeva pro stavbu domu, dovezenou z kolonie Plymouth do jižního Connecticutu. (Marquit, 2013)

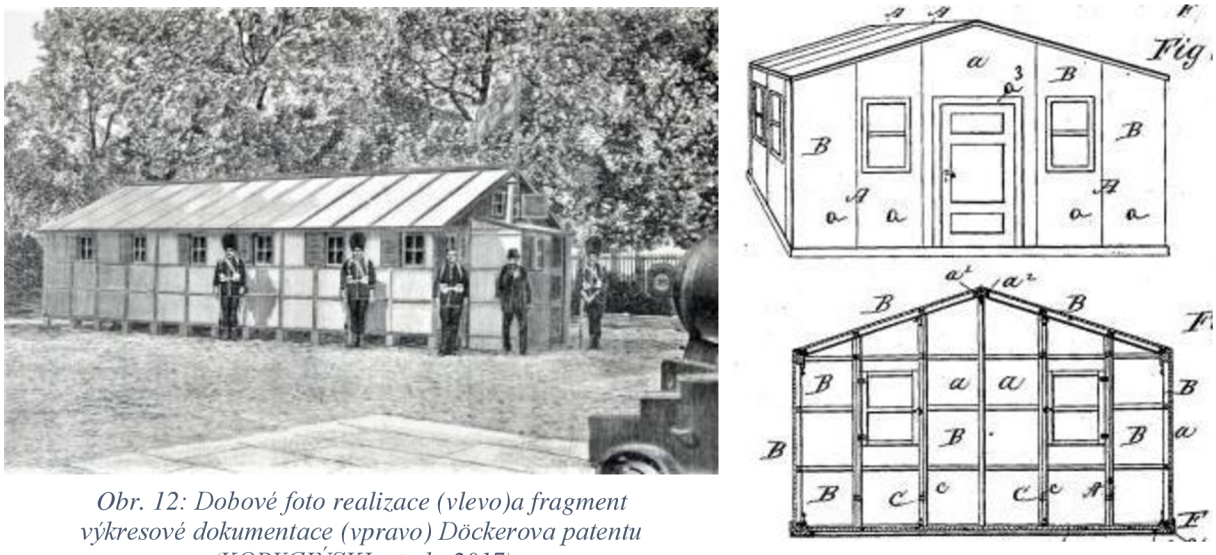
V roce 1833 byla v Chicagu postavena první budova s konstrukcí „balloon frame“ (Marquit, 2013). Tato technologie okamžitě získala velkou oblibu díky v té době maximální jednoduchosti, rychlosti výstavby a úspoře materiálu. Majoritním konstrukčním elementem bylo prefabrikované řezivo o průřezu 2x4 palce (Two by four). Tesařské spoje nahradily sériově vyráběné ocelové hřebíky. „Ballon frame“ byl postupně rozvinut v „Platform frame“, jehož výstavba byla ještě snazší a rychlejší (sloupy neprochází stavbou až po střechu, ale vedou vždy jen na výšku jednoho podlaží). V druhé polovině 19. století už byly v Americe a Anglii

vyvinuty sériově vyráběné stavebnicové systémy doplněné o typizované stavebně truhlářské výrobky. (Zahradníček, 2011a)

Nástup průmyslové revoluce vnesl do stavebnictví nové trendy. Na popularitě začaly nabírat konstrukční ocel a později beton, zatímco využívání dřeva mírně sláblo. I přesto ale vývoj prefabrikace v dřevostavebním průmyslu pokračoval a v roce 1880 byl v Dánsku rotmistrem Gerhardem Clementem Döckerem patentován první panelový systém s nosnou konstrukcí dřevěného rámu. Rám byl opláštěn „Döckerovým materiálem“, což byl z dochovaných pramenů nejspíše materiál velmi podobný dnešním cementovláknitým deskám. Svislé stěny byly napojovány na svou dobu značně pokročilým a efektivním způsobem přes zámek se západkou. Podobným spojem jsou dnešní skryté trámové spojky (Obr. 11). Přes spáry mezi panely se pomocí šroubů a křídlových matek upevňovaly lišty. Vrcholový spoj střešních panelů byl řešen speciální svorkou. Montáž i demontáž staveb s tímto systémem byla velmi snadná a rychlá, panely navíc bylo možné pro účely přepravy libovolně stohovat. Döckerovy domy tedy byly jednou z prvních podob mobilních domů, díky čemuž našly uplatnění jako mobilní lazarety, později i válečné polní ležení a nemocnice (Obr. 12). (Liška, 2012)



Obr. 11: Porovnání: Vlevo – Döckerův spoj svislých stěn (KORYCIŃSKI, et al., 2017), vpravo trámová skrytá spojka Rothoblaas (ROTHOBLAAS, 2023)



Obr. 12: Dobové foto realizace (vlevo)a fragment výkresové dokumentace (vpravo) Döckerova patentu (KORYCIŃSKI, et al., 2017)

Konec průmyslové revoluce je take počátkem prvních modulárních staveb. Roku 1896 byla ve Francii zahájena sériová výroba prefabrikovaných železobetonových modulárních buněk. Prozatím se ale jednalo převážně o samostatně stojící jednotky a dřevo v této oblasti využití nenalezlo. (Huß, 2019)

Počátkem 20. století bylo třeba vyřešit otázku rychle rostoucí populace a pozdější zlatá dvacátá léta volala po cenově dostupném luxusním bydlení. Prefabrikované dřevostavby dokázaly odpovědět na obojí. Průmyslovou revolucí rozvinutá tovární výroba vedla především v Americe ke vzniku řady firem nabízejících typové katalogové domy. Např. The Aladdin Company (Aladdin Readi-Cut Houses) byla první společností, která již v roce 1906 nabízela prefabrikované domy na veřejném trhu. Velmi známé jsou také stavebnicové zásilkové domy Sears, Roebuck & Co (Obr. 13). Návrhy společnosti nabízely značnou variabilitu a dokázaly pokrýt vzrůstající potřebu individuality a jedinečnosti soukromého bydlení. Domy byly dodávány jako kompletní sady jednotlivých stavebních komponent včetně spojovacích prostředků a nátěrových barev. Historické prameny uvádí přibližně 450 různých typů domů Sears a vice než 70 tiscíc realizovaných staveb. (Marquit, 2013)

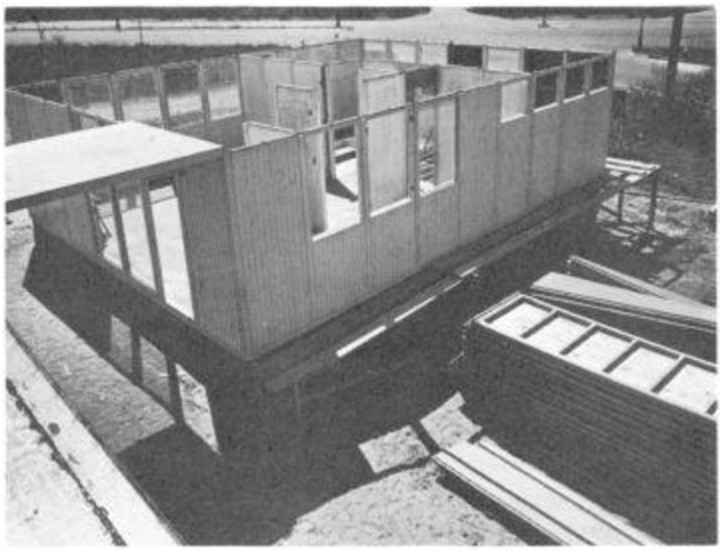
Obr. 13: Katalogový dům Hamilton, číslo 102 (Sears Archives, 2023)

U panelů se sloupkovou rámovou konstrukcí začaly postupně vycházet najevo mnohé nedostatky. Hlavní komplikací těchto panelů byla jejich nehomogenita, která způsobovala tepelné a vlhkostní mosty a pevně daná nosná konstrukce znemožňovala další dělení nebo výraznější dodatečné úpravy. Postupně se začala navyšovat potřeba energetické úspory, což vedlo k vývoji tepelněizolačních skladeb. Začaly se objevovat alternativní technologie, kde nosnou funkci přebíralo buď oboustranné opláštění, nebo desky z vrstveného masivního dřeva. (Liška, 2012)

Ve 30. letech 20. století bylo v USA vyvinuto několik technologií tzv. SIPs (Structural Insulated Panels). Jde o panely, které neobsahují žádný dřevěný rám ani jiný konstrukční dřevěný prvek. Na začátku vývoje nebyl k dispozici dostatečně pevný a soudržny tepelněizolační materiál, a proto byly stavby řešené tímto způsobem pouze jednopodlažní. První SIPs panely byly vyrobeny slepením jádra z několika vrstev lepenky s pláštěm z překližky. Moderní podoba nahradila lepenkové jádro za polystyren a překližku nahradilo oboustranné opláštění OSB deskou (dnešní EUROPANEL).

Během 2. světové války se opět vrátila potřeba univerzálních mobilních, nebo snadno demontovatelných staveb polních nemocnic a ležení. Širokého uplatnění dosáhly v podobě vojenských kasáren a mobilních přívěsů prefabrikované konstrukce z plechu a dřevěných sbíjených panelů z křížem vrstvených prken. Šlo o jedny z prvních náznaků modulárních staveb dnešního typu. (Marquit, 2013)

Po 2. světové válce vyžadovala zničená města a tisíce lidí bez domova rychlou a levnou výstavbu. Dřevo se proto stalo opět značně atraktivním materiálem a nastal opětovný rozvoj panelových rámových dřevostaveb s vyšším stupněm prefabrikace. Již roku 1942 byl v Americe vyvinut sériově vyráběný panelový system „General Panel System" (Obr. 14), který našel uplatnění především v komerční bytové výstavbě. Součástí vývoje tohoto systému byla ve snaze o co největší zjednodušení montáže na staveništi i řada nových spojovacích prostředků. Podobné technologie se vzápětí začaly rozmáhat i v poválečné Evropě (Zahradníček, 2011a)



Obr. 14: Proces výstavby General Panel System (The General Panel Corporation, 2021)

Obr. 15: Přeprava komponentů General Panel System z továrny na staveniště v roce 1947 (The General Panel Corporation, 2021)

Druhá polovina 20. století byla dobou betonu a železa. Především v Evropě se staly hlavním trendem bytové výstavby zděné stavby a využití materiálů na bázi dřeva v prefabrikaci se přesunulo převážně do oblasti nábytku. Významně se ale začala rozvíjet modularita a její uplatnění ve výstavbě výškových budov. Značné architektonické i materiálové kreativity dosáhly modulární stavby v Japonsku, kde se z buňkových systémů dokonce rozvinul nový architektonický směr Metabolismus. V Americe našly dřevěné modulární prefabrikáty uplatnění alespoň na poli rekreačního a přechodného bydlení v podobě tzv. Mobilehousů. (Huß, 2019)

Doposud nejdramatičtější vývoj v prefabrikaci dřevostaveb přišel v 90 letech se zahájením výroby CLT panelů. Technologie CLT představuje křížem vrstvené masivní dřevo lepené do deskových formátů. Vznikla spoluprací rakouských výzkumných institucí a významných dřevařských firem. Dodnes je vývoji materiálu i jeho stavebnímu využití věnována maximální pozornost. V průběhu realizace je možné CLT využít pro každý stupeň prefabrikace stavby. V kombinaci s dalšími moderními technologiemi jako je lepené lamelové dřevo nachází uplatnění i u vícepatrových budov a nabízí plně konkurenční systémy železobetonové výstavbě. V současnosti nachází uplatnění po celém světě, téměř u všech druhů pozemních staveb. Stále bohužel naráží na výrazně xenofobní přístup široké veřejnosti, a to i té odborné. (Pavlas, 2016)

Modulární výstavba se v současné chvíli stává čím dál více atraktivní především v podobě menších levných staveb pro bydlení, a to hlavně z důvodů příznivější cenové dostupnosti, vlídnějších legislativních podmínek a eliminace většiny stavebních úkonů.

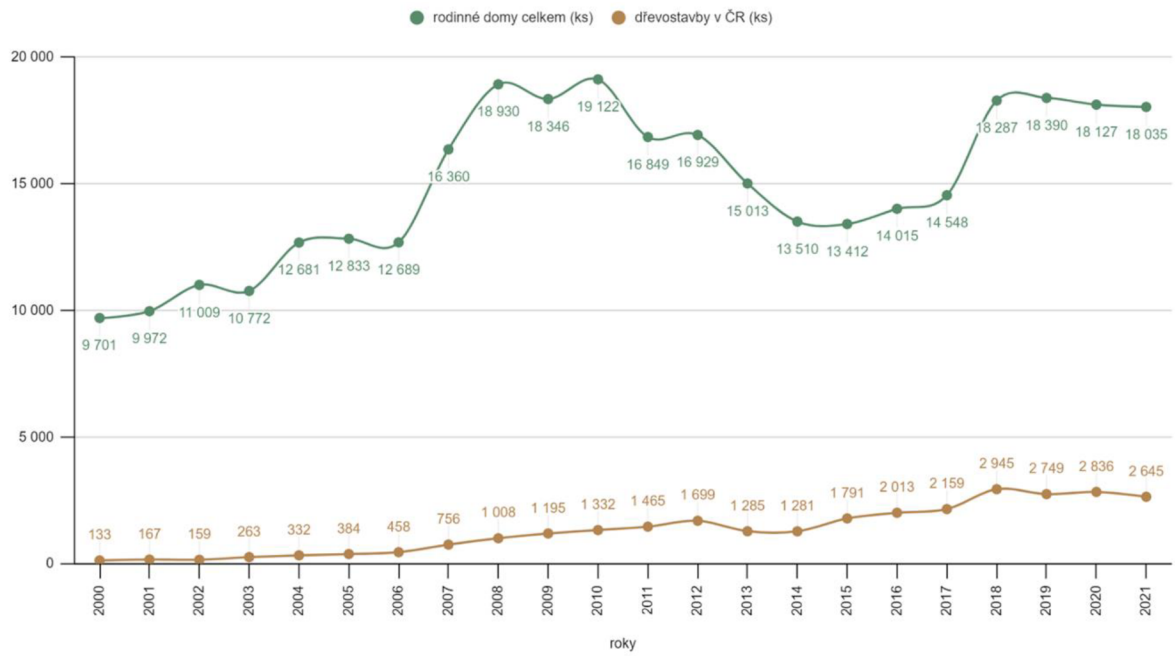
S příchodem nových technologií, jako jsou projekční BIM softwary (Building Information Modeling), automatizace a CNC zařízení (Computer Numerical Control), je nyní integrace stavební prefabrikace do procesu výstavby snazší než kdykoliv dřív. Dnešní moderní postupy zvládají výrobní kroky s maximální přesností, úsporou času, energie a především nákladů. Minimalizuje se množství výrobního odpadu, snižuje se podíl lidské práce a s ním spojená chybovost. (Marquit, 2013)

3.2.2 Prefabrikované dřevostavby v současnosti

Dnešní požadavky na tepelnou izolaci budov tlačí novostavby do extrémních tlouštěk stěn. Pro pasivní domy jsou proto nejvhodnější konstrukce, které dokážou zabezpečit dostatečnou izolační schopnost při co nejmenší tloušťce. Vhodným řešením jsou proto dřevostavby. Samotné dřevo má přibližně 10x lepší tepelně izolační vlastnosti než např. beton, v závislosti na zvoleném konstrukčním systému může tepelně izolační vrstva přebírat výplňovou funkci. (CENTRUM PASIVNÍHO DOMU, 2009)

Z Graf 1 je patrný vývojový trend výstavby rodinných domů v posledních desetiletích. Zatímco celková výstavba zažívala značné výkyvy, dřevostavby vykazují takřka kontinuální pozitivní vývoj. Poslední statistiky z roku 2021 hovoří o 14,7 % podílu na výstavbě rodinných domů. Dřevostavby se dostávají více do povědomí veřejnosti, která čím dál více reaguje na témata rychlé výstavby a udržitelného způsobu výstavby. (Kristová, 2022)

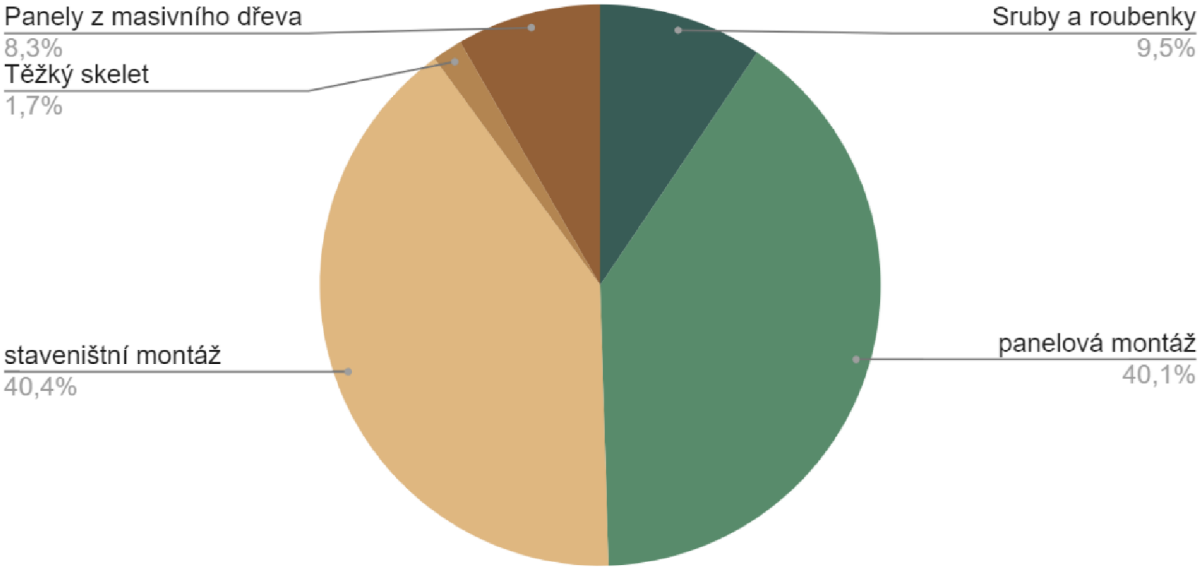
Graf 1: Výstavba rodinných domů v letech 2000–2021 (Trandová, 2021)



Právě požadavky na rychlost výstavby spolu s nedostatkem kvalifikované pracovní síly dnes čím dál více posilují tendence k dřevostavbám prefabrikovaným. Do této kategorie patří prefabrikace dřevopanelů CLT, sloupkové stěnové prefabrikáty, buňkové prefabrikáty a kompletní prefabrikované stavby. Graf 2 znázorňuje podíl jednotlivých konstrukčních systémů ve výstavbě rodinných domů v roce 2021. 40,1 % tvoří prefabrikovaná panelová montáž,

8,3 % výstavba panelů z masivního dřeva. Prefabrikabrikace v oblasti dřevostaveb dnes tedy představuje 50 % veškeré výroby. (Trandová, 2021)

Graf 2: Podíl jednotlivých konstrukčních systémů ve výstavbě dřevostaveb v roce 2021 (Trandová, 2021)



Nejvíce populární jsou moderní technologie předvýroby celých stěn ve výrobním závodě včetně zateplení, osazení oken a dveří, někdy i s fasádou. V prostředí výrobních hal bez vlivu počasí lze pomocí automatizované mechanizace dosahovat nižší pracnosti a zároveň vyšší přesnosti. Proces výroby trvá přibližně dva týdny. Hotové stěny se pak jen v řádu dnů smontují na stavebním pozemku. Např. v Rakousku je dle statistických údajů touto technologií postaven každý třetí dům. (Babor, 2015)

V dnešní době již tedy není otázkou, zda prefabrikovat, či nikoli, ale spíše kdy a do jaké míry. Vyšší stupně prefabrikovaných systémů dnes musí být certifikovány, což u některých technologií značně limituje architektonickou variabilitu. Atypická výroba poté představuje nákladné víceprace. Efektivita prefabrikace se pak tedy projeví pouze u sériové výroby. Z tohoto důvodu se postupně rozvíjejí i kombinace staveništní a halové montáže v podbě nižších stupňů prefabrikace formou kompletizovaných stropních dílců, střešních nosníků apod. (Zahradníček, 2011b)

3.2.3 Stupně prefabrikace

Stupeň 0: materiál

Předvýroba v tomto stupni probíhá pouze na úrovni přípravy hrubě opracovaného, případně formátovaného stavebního materiálu. Způsob výstavby je staveništní, hlavní podíl zde zastává lidská řemeslná činnost. Prefabrikace na této úrovni tedy představuje např. výrobu řeziva příslušných průřezů a úpravu požadované jakosti povrchu, výrobu deskových materiálů jako jsou sádrokarton, OSB desky, dřevovláknité izolace apod. (Staub-French, 2018)

Stupeň 1: komponent

Konstrukční elementy dřevostavby jsou již ve výrobních halách kráceny, předvrtány, upraveny a opracovány podle technických podkladů a výkresové dokumentace do požadované finální podoby. Součástí systémů prefabrikace této úrovně bývají i organizované značení jednotlivých dílů a systematická nakládka doplněné o montážní dokumentaci. To vede ke značnému zjednodušení a urychlení montáže na staveništi. Úprava nenosných materiálů, zhotovení skladeb konstrukcí a dokončovací práce probíhají až po montáži na staveništi. (Šopík, 2011)

Stupeň 2: sestava

Jednotlivé komponenty jsou smontovány do funkčních konstrukčních jednotek. Příkladem jsou stěnové, stropní a střešní prostorové díly nebo panely, příhradové nosníky nebo také třeba schodiště. V tomto stupni můžeme rozlišovat ještě určité podúrovně rozsahu předvýroby. Např. stěnové panely mohou být z výrobní fabriky expedovány ve formě od hrubé rámové konstrukce, přes opláštěné panely se zateplením až po panely s osazenými konstrukčními otvory a finalní povrchovou úpravou. Montáž na staveništi už vyžaduje specializovanou techniku, ale je velmi rychlá a jednoduchá. (Šopík, 2011)

Stupeň 3: modul

Do třetího stupně se řadí prostorové konstrukce, nejčastěji v podobě modulárních buněk. Stále ještě ovšem dochází k závěrečným stavebním úkonům až na staveništi. Velký potenciál využití mají v této oblasti moduly z CLT panelů, které se začínají hojně využívat ve Skandinavii pro stavbu vícepodlažních budov. Stěny a stropy jsou sestavením buněk do celku zpravidla zdvojeny, styky jsou specifickými spoji. Prefabrikovaná objemová konstrukce později tvoří nedělenou obytnou jednotku nebo místnost. (Staub-French, 2018)

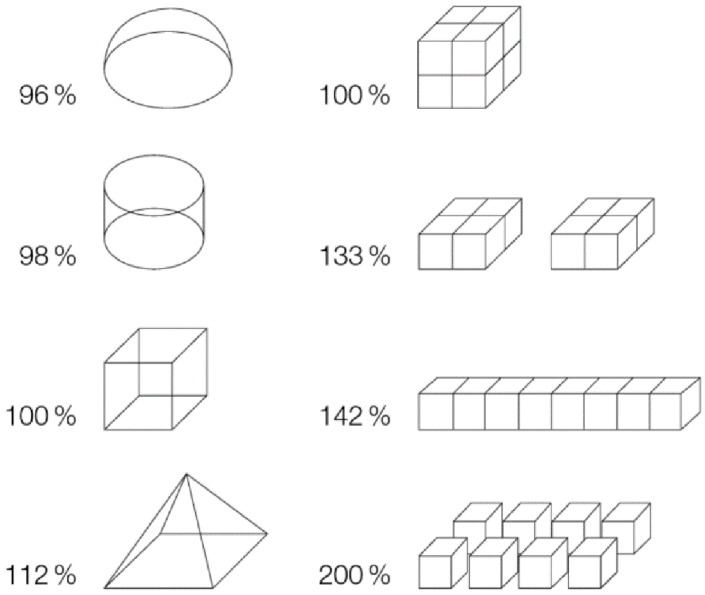
Využití samostatných modulů je v současnosti vzhledem k omezeným dispozičním a objemovým možnostem kvůli komplikované přepravě využíváno převážně pro výstavbu drobnějších dočasných nebo rekreačních objektů. (Šopík, 2011)

Stupeň 4: stavba

Ve čtvrtém stupni dochází k prefabrikaci dokončených trvalých nebo dočasných budov, případně infrastruktur. Objekty mohou být kompletizovány v hotových celcích, nebo také modulových segmentech. Součástí předvýroby je i většina dokončovacích prací, včetně osazení zařizovacími předměty. Transport na staveniště je jednorázový. (Šopík, 2011)

3.3 Tvarová optimalizace energetického návrhu budovy

Základem návrhového řešení každé stavby by měla být tvarová kompaktnost. Empirická hodnocení kompaktnosti zahrnují různé metodiky. Nejčastěji se ale uplatňuje posouzení poměru plochy vnějšího pláště budovy vůči vnitřnímu objemu A/V. Tato veličina se označuje jako tvarový faktor, přičemž odráží vztah mezi spotřebu energie a tvarem budovy. Obr. 16 procentuálně srovnává plochy obvodového pláště jednotlivých trojrozměrných těles vůči referenčnímu tvaru krychle.



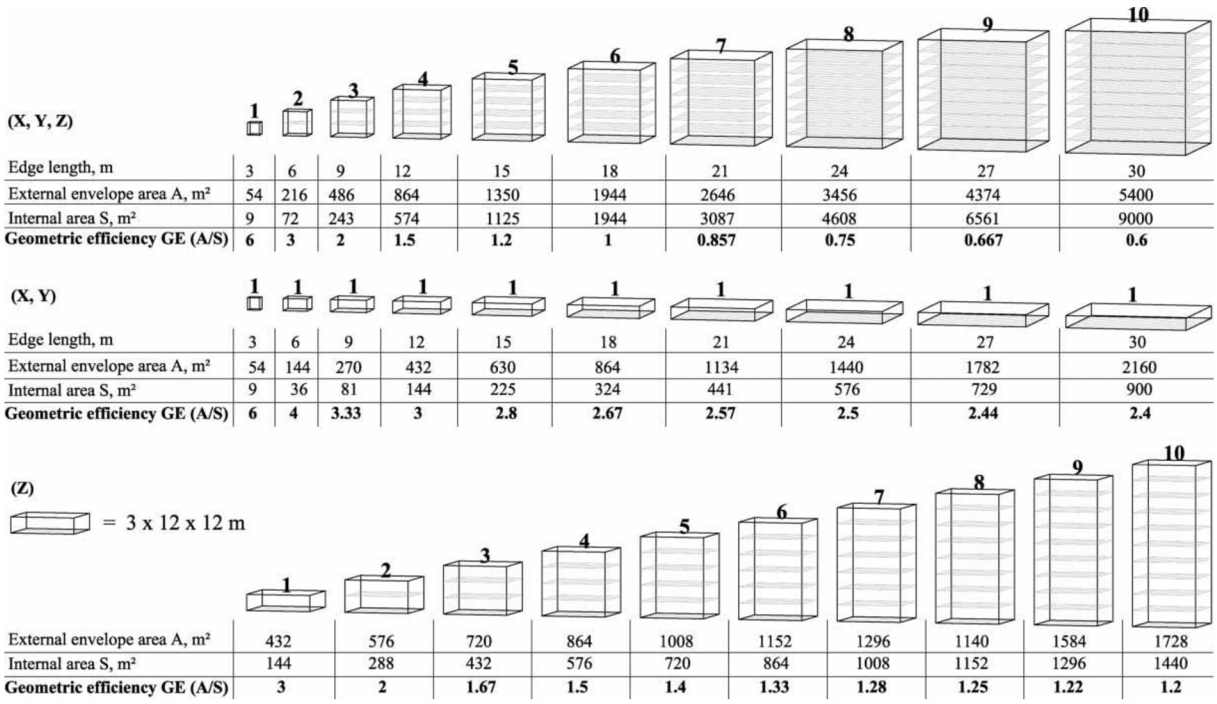
Obr. 16: Procentuální srovnání plochy obvodového pláště různých prostorových těles o totožném objemu vztažené k referenčnímu tvaru krychle (Hegger, 2008)

Tvarový faktor se dále používá pro výpočet na relativní kompaktnosti RC, která porovnává navrženou budovu s referenční čtvercovou budovou o stejném objemu s tvarovým koeficientem A/V_{ref}. Vzorec pro výpočet následující:

$$RC = \frac{(A/V)_{building}}{(A/V)_{ref}} = \frac{A_{ref}}{A_{building}}$$

Nabízí se však otázka, zda tvarový faktor A/V a odvozená hodnota RC jsou hodnotí kompaktnost objektu dostatečně, protože budovy se stejným architektonickým tvarem a objemem se mohou lišit v dispozičních řešeních a počtu pater. Logicky se tedy mohou lišit i užitné a vytápěné plochy objektu, což relativní kompaktnost RC nezohledňuje. Budova o větší

užitné ploše ve stejné obálce bude efektivnější a energeticky účinnější. Je proto vhodné posoudit kompaktnost spíše vztahem mezi plochou obvodového pláště budovy A její užitnou, případně vytápěnou podlahovou plochou S. Bezrozměrný poměr A/S = GE se označuje jako geometrická účinnost. Z výpočtů na Obr. 17 je patrné ze nejvýhodnější jsou jednoduché čtvercové tvary a co největší objemy.



Edge length, m	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
External envelope area A, m²	54	216	486	864	1350	1944	2646	3456	4374	5400
Internal area S, m²	9	72	243	574	1125	1944	3087	4608	6561	9000
Geometric efficiency GE (A/S)	**6**	**3**	**2**	**1.5**	**1.2**	**1**	**0.857**	**0.75**	**0.667**	**0.6**

Edge length, m	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
External envelope area A, m²	54	144	270	432	630	864	1134	1440	1782	2160
Internal area S, m²	9	36	81	144	225	324	441	576	729	900
Geometric efficiency GE (A/S)	**6**	**4**	**3.33**	**3**	**2.8**	**2.67**	**2.57**	**2.5**	**2.44**	**2.4**

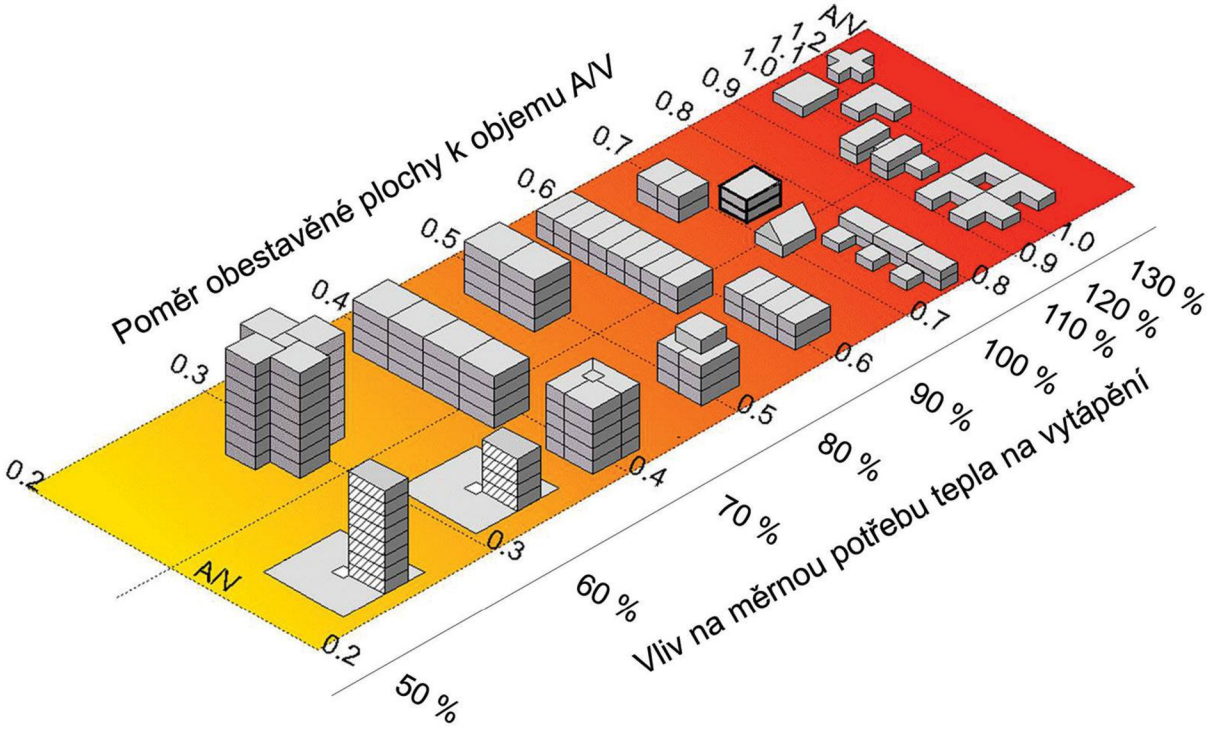
External envelope area A, m²	432	576	720	864	1008	1152	1296	1140	1584	1728
Internal area S, m²	144	288	432	576	720	864	1008	1152	1296	1440
Geometric efficiency GE (A/S)	**3**	**2**	**1.67**	**1.5**	**1.4**	**1.33**	**1.28**	**1.25**	**1.22**	**1.2**

Obr. 17: Vyhodnocení geometrické účninnosti GE pro různé ortogonální objemy (Parasonis, 2012)

Jako další ukazatel tvarové efektivity se zavádí relativní geometrická účinnost RGE. Podle níže uvedeného vzorce vyjadřuje odchylku GE navržené budovy od GE_{ref} referenční geometrické účinnosti optimálního tvaru krychle. Jak vyplývá z Obr. 16 tvar krychle není nejvýhodnější, ale je dispozičně praktičtější pro interiérová uspořádání než křivočaré objemy jako třeba kopule. (Parasonis, 2012)

$$\mathrm{RGE} = \frac{(A/S)}{(A/S)_{\mathrm{ref}}} = \frac{\mathrm{GE}}{\mathrm{GE}_{\mathrm{ref}}}$$

Seskupené objekty jako řadová zástavba nebo bytové domy dosahují energetické úspory snadněji než samostatně stojící objekty (Obr. 18). Rozsáhlé občanské stavby a panelové domy jsou pro energetické úspory přímo stvořené. Prvním řešením tvarové optimalizace je tedy shlukování stavebních jednotek do jednoho minimálně profilovaného celku. Z hlediska kompaktnosti stavby je nejvýhodnější vícepodlažní varianta, není však nutností. Účelově pro rodinné domy jsou relativně uspokojivé i přízemní stavby, pokud půdorysná plocha nepřesáhne 120 až 140 m². (CENTRUM PASIVNÍHO DOMU, 2009)



Obr. 18: Vliv tvaru objektu na potřebu tepla na vytápění – porovnání poměru ochlazovaných ploch vůči objemu stavby

Pokud je toto řešení z prostorových, urbanistických, účelových, nebo jakýchkoli jiných důvodů nevhodné, je možné přistoupit k optimalizaci formou změny základní geometrie. Z fyzikálního hlediska je ideálním tvarem koule. Poměr plochy povrchu vůči objemu je nejmenší. Vhodným řešením jsou tedy stavby typu kopule. Většina deskových stavebních materiálů, zařizovacích předmětů a nábytku je ovšem vyráběna v pravoúhlých tvarech. Z pohledu technického, dispozičního a ekonomického může být proto použití tohoto tvaru značně limitované a nepraktické. V současné stavební praxi pasivních a nízkoenergetických staveb je tedy optimálním řešením kvádr delší stranou orientovaný k jihu. (CENTRUM PASIVNÍHO DOMU, 2009)

3.4 Kopulové systémy s rámovou konstrukcí

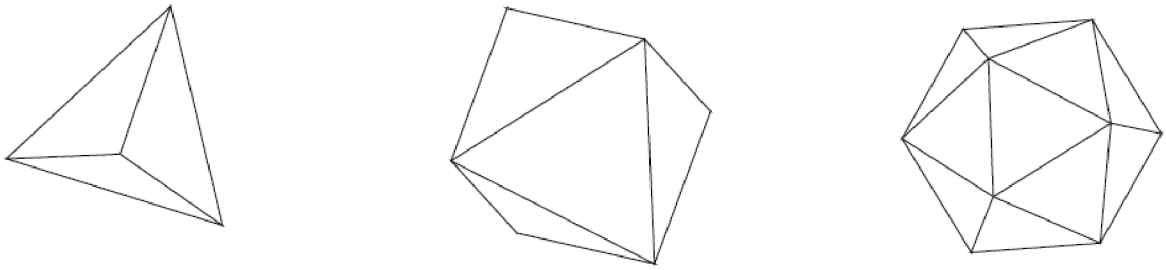
3.4.1 Obecné definice a hlavní charakteristiky

Kopule je synklastický povrch, tedy zakřivení v libovolném bodě na kopuli je ve všech směrech stejné. Povrch kopule je také nerozvinutelný. To znamená, že povrch kopule nelze zploštit do roviny bez deformace nebo natažení povrchu. Kopuli lze také definovat jako tvar pozitivního Gaussova zakřivení. Všechny tyto definice naznačují, proč není možné vytvořit žádnou konstrukční síť, kterou by tvořily prvky pouze jedné délky. Výhodou kopule je, že se v podstatě jedná o trojrozměrný oblouk. Tedy pokud je kopule konstruována správně, všechna aplikovaná zatížení se na konstrukční prvky přenášejí pouze v osových směrech. V prutech potom vznikají pouze tahová a tlaková namáhání, bez ohybových nebo torzních momentů. Jedná se o mimořádně atraktivní a efektivní konstrukční systém. (WAI HUNG, 2009)

3.4.2 Geodetické kopule

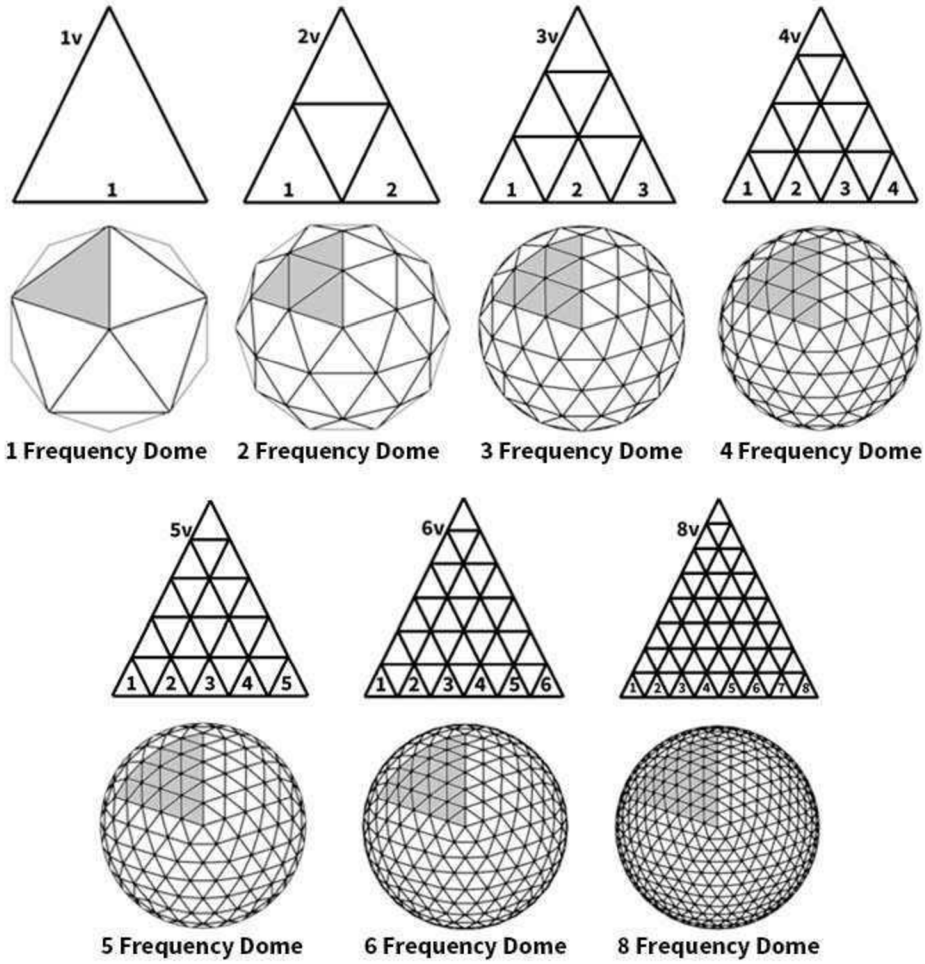
První kopule odpovídající geodetické struktuře byla postavena v roce 1926 v Německu. Šlo o stavbu planetária o průměru 25 m. Budova musela překlenout velký nedělený prostor a musela být velmi lehká, protože měla být umístěna na střechu stávající továrny výrobce optiky Zeiss, který byl investorem. Za hlavního průkopníka a popularizátora této prostorové konstrukce se ovšem považuje americký architekt, inženýr, designér, geometr, kartograf a filozof Richard Buckminster Fuller, který v roce 1951 tento systém patentoval a pojmenoval ho jako „geodetický“. (Makowski, 1984)

Geodetické konstrukce představují stejně jako všechny ostatní kopulové systémy prostorovou konstrukci. To tedy znamená, že povrch není možné rozložit na tvarově a rozměrově homogenní dílce. Použití geodetické sítě ovšem umožňuje alespoň převedení zakřiveného povrchu do základních rovinných útvarů. Klasické geodetické kopule vychází z takzvaných Platónských těles – pravidelných konvexních mnohostěnů neboli polyedrů a jejich následným členěním do jemnější tvarové struktury neboli frekvence. Nejčastěji používaným základním tvarem je ikosaedr, dále pak oktaedr a tetraedr (dvacetistěn, osmistěn, čtyřstěn), tedy tělesa s trojúhelníkovým tvarem základní stěny (Obr. 19). Ikosaedr umožňuje velmi malou variabilitu délek jednotlivých konstrukčních prvků a zároveň je nejpraktičtějším výchozím tvarem pro celkovou statickou stabilitu výsledné konstrukce. (Davis, 2011)



Obr. 19: Zleva – tetraedr, oktaedr, ikosaedr (Davis, 2011)

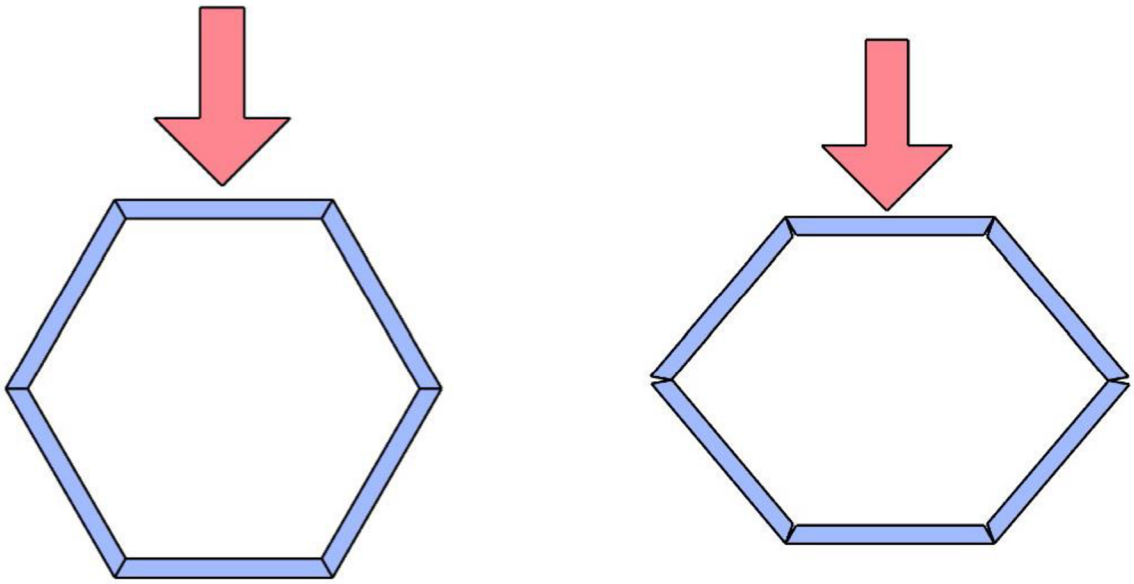
Frekvence geodetické kopule udává, kolikrát je každá strana základního trojúhelníku rozdělena. Pro zjednodušení se údaj frekvence zkracuje pouze na „V“. Frekvence 2V tedy znamená, že strana trojúhelníku je rozdělena na 2 části, frekvence 3V značí rozdělení na 3 části apod. Pro snazší odhad frekvence již navrženého systému také můžeme říci, že tento pojem deklaruje počet liniových prvků mezi středy dvou sousedících pětiúhelníků (Obr. 20).



Obr. 20: Schématické znázornění frekvenčního dělení geodetického systému (PACIFICDOMES, 2023)

Bez ohledu na velikost stavby platí, že čím vyšší frekvence, tím více je povrch zakřivený, tedy kulový a tím se celá struktura stává tužší a pevnější. Je ale třeba počítat s tím, že s navyšováním frekvence narůstá i variabilita délek komponent. Pro kopule odpovídající přesné polokouli je vhodné volit sudé frekvence 2V, 4V, 6V apod., protože u lichých frekvencí neleží vodorovné prvky v jedné rovině. Geodetickou strukturu vycházející z dvacetistěnu je poté třeba modifikovat a přizpůsobit potřebám založení. (Davis, 2011)

Architektonicky jsou velmi zajímavé také konstrukce dodekaeadronu (dvanáctistěnu) o hexagonovém základu. Jejich geometrie ovšem naráží na tendence k borcení (Obr. 21). Tupé rohy šestiúhelníku 6x 120 stupňů činí tvar slabým a snadněji se deformuje než trojúhelník 3x 60 stupňů s ostrými rohy. Při jakémkoli směru působení silového namáhání hrana trojúhelníku funguje jako kompresní nebo tažená vzpěra, což se u šestiúhelníku neděje a veškeré deformační síly se přenáší do rohových spojů. Styčníky proto musí být řešeny jako vetknuté. (Haghnazar, 2014)



Obr. 21: Princip deformace šestiúhelníkové geometrie při silovém namáhání (WangerFlange, 2023)

Mezi výhody geodetických kopulí patří velká nosnost při malých průřezech nosných prvků a možnost překlenout takřka libovolné rozpětí při použití minimálního objemu stavebních materiálů. Oproti běžným stavbám mohou úspory materiálu činit až 40 %. U geodetických struktur je také velmi efektivní a snadná prefabrikace, protože použité prvky mohou mít všechny jeden a ten samý průřez a délky prvků zahrnují pouze několik variant

v závislosti na frekvenci dělelní kopule. Kromě toho je rozložení systému velmi pravidelné a při zatížení dochází k rovnoměrnému rozložení napětí. Komponenty jsou obvykle lehké, a proto se s nimy snadno manipuluje. Rychlost instalace, je ve srovnání s tradičními metodami výstavby budov vysoká. (Narayanan, 2006)

Dalším pozitivem je, že koule optimalizuje objem ve vztahu k obsazené ploše. Díky sférickému tvaru je také efektivnější větrání a vytápění má menší ztráty. Geodetické kopule jsou schopny ušetřit až 50 % nákladů na energii ve srovnání s jinými konstrukčními tvary se stejným objemem. Neopomenutelnou výhodou tohoto tvaru je také jeho aerodynamika. Aerodynamický tvar a nízké těžiště činí geodetickou kopuli extrémně odolnou vůči silnému větru, tornádům, hurikánům i zemětřesením. (Balbaert, 2016)

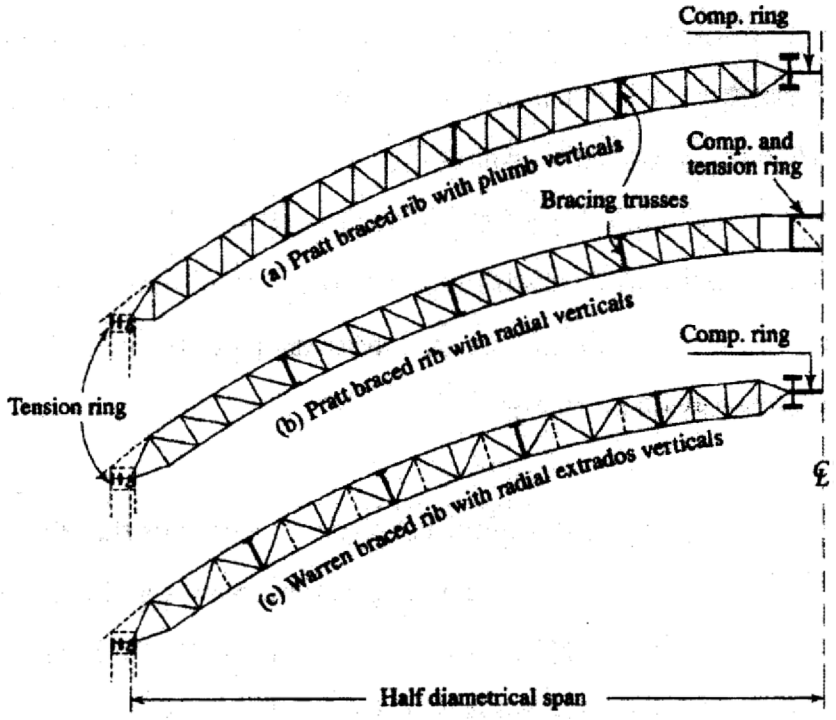
Hlavní nevýhoda těchto konstrukcí zmíněná již v kapitole 3.3 spočívá v tom, že výroba moderních stavebních materiálů je s ohledem na pravoúhlou geometrii budov orientovaná rovněž na pravoúhlé tvary (překližka, OSB, sádrokarton, sklo apod.). Trojúhelníkové nebo polygonální stěnové útvary tedy povedou k většímu prořezu a zbytečnému navyšování stavebního odpadu. Samotná konstrukční technologie tedy sice spotřebuje stavebního materiálu méně, ale jeho vstupní množství a náklady zůstanou téměř stejné. Stejně tak osazení stavebních otvorů bude vždy vyžadovat atypické výrobky. Za v některých ohledech komplikovanější by se dalo označit také spojování nosných prvků. Tesařské dřevěné spoje v praxi neexistují a jejich technologie by byla pravděpodobně značně složitá a neekonomická. Jediným řešením uzlových spojů jsou proto různé varianty více či méně složitých ocelových nebo plastových prefabrikovaných konektorů. Samotná prefabrikace je samozřejmě benefitem a urychluje výstavbu, tyto spojky jsou ale obvykle znatelně finančně nákladnější. Alternativou může být podélné spojování předpřipravených trojůhelníků nejčastěji za pomoci vrutů nebo hřebíků, tento přístup ovšem vede ke zdvojování konstrukce, což výrobu mírně komplikuje. (Zhivotov, 2020)

3.4.3 Příklady dalších konstrukčních systémů

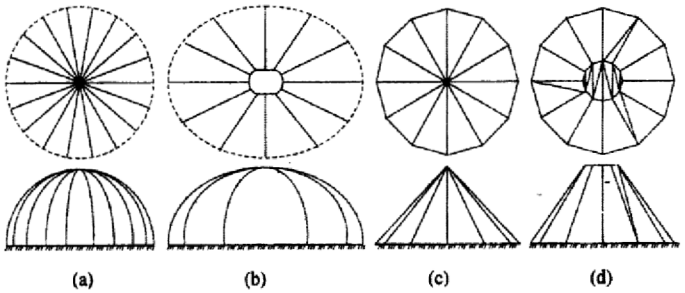
Žebrové příhradové kopule

Příhradová kopule se skládá z radiálně vyztužených žeber, která jsou obvykle tvořena různými typy příhradových vazníků. Existuje mnoho variací, které se odvíjí od parametrů stavby a působících napětí. Obr. 22 ukazuje některé typické řezy. Pro vysoce namáhané

konstrukce mohou být přidány prvky, jako jsou vzpěry a táhla. Tento typ kopule obecně vyžaduje začlenění tahového prstence u základny. Tahové prstence jsou obvykle vyrobeny z předpjatého betonu, železobetonu nebo ocelových profilů. Reakce od žeber směrem k základům se poté skládá pouze z vertikálních sil. Horizontální reakce v kopuli zcela břebírá prstenec. Geometrie některých typických příhradových kopulí je znázorněna na Obr. 23. Nevýhodou tohoto systému je vrcholové spojení obvykle příliš velkého počtu žeber. Proto může být zapotřebí začlenění vrcholového kompresního prstence. Většina žeber je potom zakončena u věnce, pouze několik prochází až k vrcholu. (Narayanan, 2006)



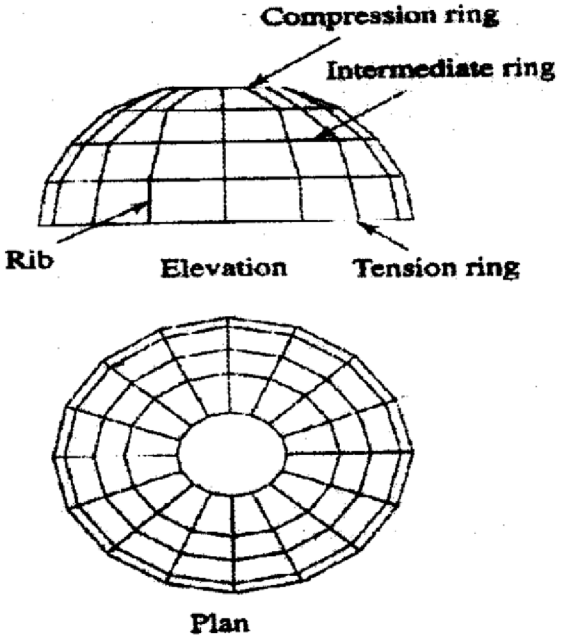
Obr. 22: Příklady konstrukčních řešení příhradových kopůlí (Narayanan, 2006)



Obr. 23: Příklady geometrie příhradových konstrukcí (Narayanan, 2006)

Žebrové masivní kopule

Konstrukce se sestává z uspořádání podobného příhradové variantě. Hlavní rozdíl je v tom, že žebra tvoří zpravidla plnostěnné válcové nebo hraněné vazníky, případně I nosníky. Opět je třeba použít základový tahový a vrcholový tlakový prstenec. Na rozdíl od příhradových vazníků jsou masivní průřezy náchylné ke vzpěrnému vybočování, proto se obvykle používají také průběžné meziprstence, které celou konstrukci prostorově ztuží (Obr. 24). Konstrukce tohoto typu se všeobecně považují za designové a estetické, proto se často nechávají přiznané. (Narayanan, 2006).



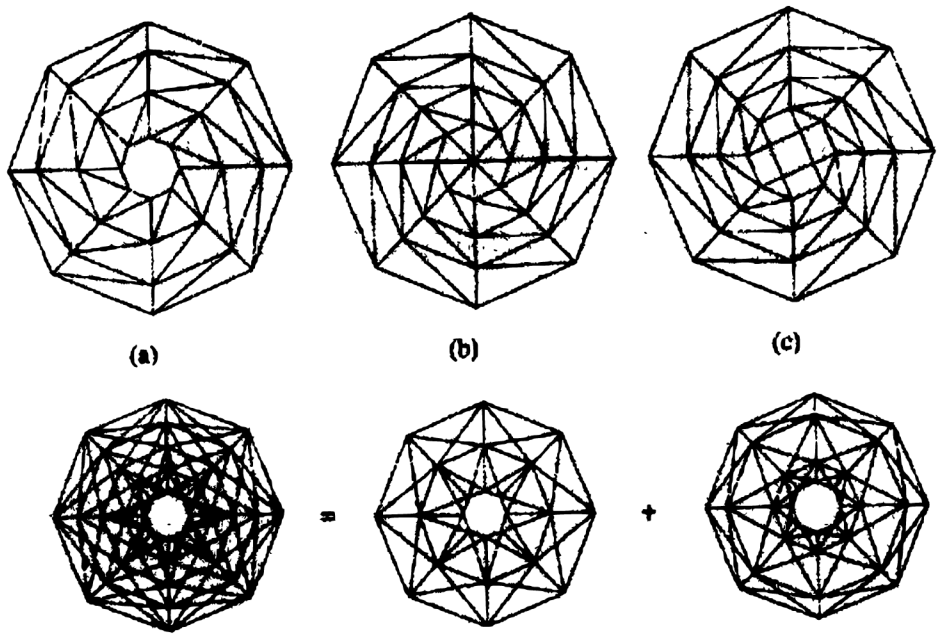
Obr. 24: Schéma konstrukčního řešení žebrové kopule z masivních prvků (Narayanan, 2006)

Schwedlerova kupole

Schwedlerova kopule je pojmenována po německém inženýrovi J.W. Schwedlerovi, který v roce 1863 v Berlíně navrhl konstrukci nad střechou plynárny (Obr. 25). Konstrukci tvořil inovativní sférický systém složený z rovných nebo obloukových žeber spojených na rovnoběžnících polygonálními prstenci. Tyto poledníkové a rovnoběžníkové prvky společně tvoří lichoběžníkové sekce, které mohou být vyztuženy jednou nebo dvěma diagonálami. Bez úhlopříčného zavětrování by konstrukce byla nestabilní.

Obr. 25: Schwedlerova kopule na střeše plynárny – Fichtebunker, Berlin (Macdonald, 2017)

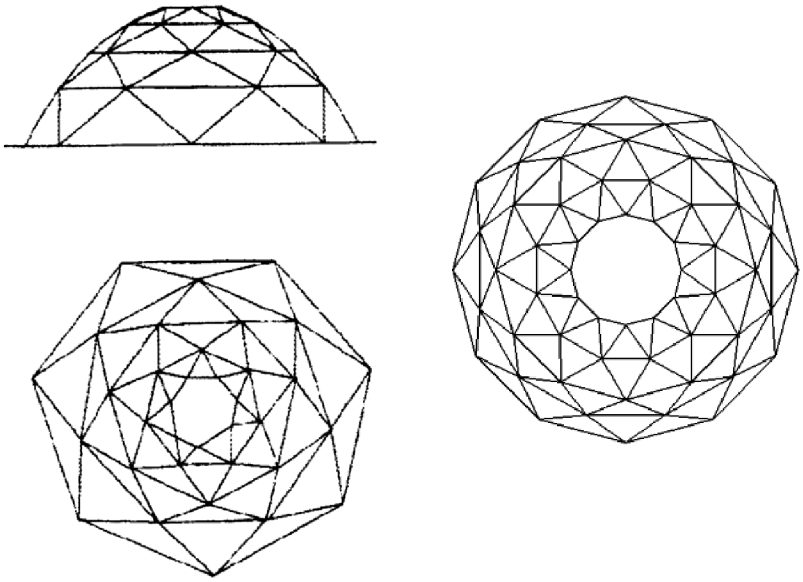
Pro statickou analýzu se provádí dvojí zjednodušení. Prvním krokem je předpoklad, že všechny spoje jsou kloubové, druhý krok se týká úhlopříček. Bez ohledu na to, zda jsou diagonály řešeny jako pevné pruty, nebo ocelová lana, se předpokládá, že jeden z těchto prvků je namáhan tlakem, druhý tahem. U tlačeného členu dále předpokládáme selhání z důvodu vybočení, proto posuzujeme pouze člen tažený. Některé typické geometrické konfigurace jsou znázorněny na Obr. 26. (WAI HUNG, 2009)



Obr. 26:Schémata typických geometrií Schwedlerovy kopule (Narayanan, 2006)

Föpplova kopule

Föpplova kopule je v podstatě variantou typu Schwedler. Geometrie je tvořena otočením každého pole Schwedlerovy kopule o úhel π/n vzhledem k rovnoběžně probíhajícímu prsteneci, kde n se rovná počtu stran. Jak je patrné z Obr. 27, tato transformace pak vytváří vždy 2 trojúhelníky ležící v různých rovinách. Tímto způsobem jsou všechny konstrukční prvky namáhány tlakem. Föpplův systém je tedy efektivnější než Schwedlerova konstrukce. Je ovšem obtížnější ji sestavit. Zajímavostí Föpplovy síťové kopule je její stabilita pouze s lichým počtem kloubových spojů. (Narayanan, 2006)

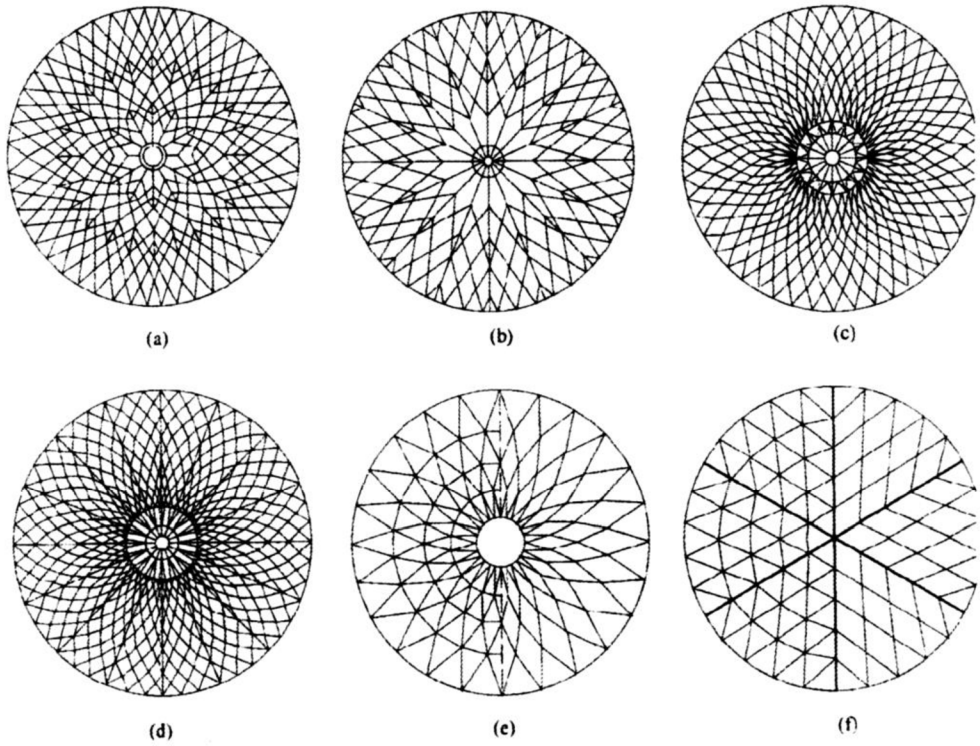


Obr. 27: Základní geometrie Föpplovy kopule (Narayanan, 2006)

Lamelové kupole

Lamelový systém vynalezl v roce 1906 německý architekt Friedrich Zollinger. V Německu se stal před 2. světovou válkou velmi populární a rozšířil se do severních zemí jako Švédsko, Norsko, Holandsko a Švýcarsko. Ve Spojených státech se poprvé uplatnil v roce 1925 díky architektovi G. R. Kiewittovi, který zkonstruoval stovky nejen kopulových staveb ze dřeva a oceli. Lamelové konstrukce jsou vhodné pro téměř jakýkoli tvar skořepiny a velmi dobře odolávají větru, ohni a seismicitě. Dnes jsou lamelové konstrukce předmětem mnoha designových architektonických staveb. Systém je tvořen množstvím podobných prvků nazývaných lamely uspořádaných do kosočtvercového vzoru (Obr. 28). Výhoda spočívá v tom,

že ve vrcholové části kopule se sbíhá menší počet prvků. Kromě toho dochází k rovnoměrnému rozložení napětí do celé konstrukce. (Narayanan, 2006)



Obr. 28: Příklady geometrie lamelových systémů (Narayanan, 2006)

3.4.4 Zhodnocení základních stavebních materiálů

Materiály na bázi dřeva

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, dřevo je jedním z nejstarších stavebních materiálů vůbec. Přesto se jeho potenciálu a možnostem využití v oblasti kopulových staveb v minulosti věnovala jen minimální pozornost. V poslední době však s ohledem na udržitelnost a ekologickou stránku tohoto materiálu dochází k masivnímu rozvoji stavebních technologií, které se dřevem pracují jako s primární stavební surovinou a postupně své uplatnění začíná nacházet i v systémech kopulových konstrukcí. Tato oblast se stává také velmi populárním tématem výzkumných studií. (Narayanan, 2006)

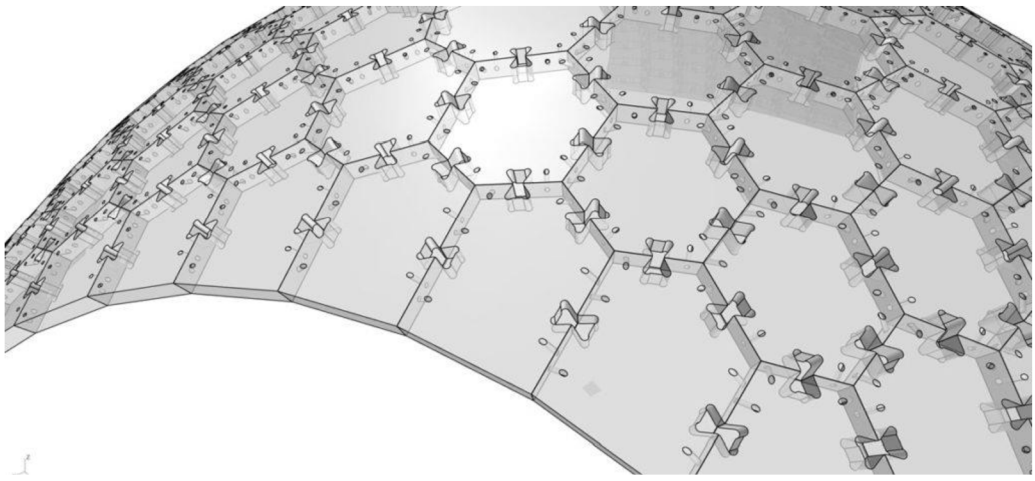
V kontextu ostatních konstrukčních materiálů bývá dřevo často odsuzováno kvůli nižší pevnosti a také předpokládané nižší životnost. Široké veřejnosti, a dokonce i té odborné, ovšem mnohdy není známo, že dřevo má ve skutečnosti vysoký poměr pevnosti vůči hmotnosti a téměř nulovou tepelnou roztažnost. Také má velmi příznivé akustické vlastnosti, což je mimořádný

benefit na místech jako jsou hudební haly nebo schromažďovací prostory. Dalším pozitivem jsou tepelně izolační vlastnosti dřeva a stím spojená výrazná eliminace tepelných mostů. (Narayanan, 2006)

U geodetických systémů se úplatňují poměrně krátké nosné prvky. Běžné rámové konstrukce vyžadují nosné sloupky a trámy v délkách jednotek až desítek metrů. V takových dimenzích se potom snadno začnou projevovat negativa dřeva jako rozměrové změny, kroucení, vliv anatomických vad dřeva apod. a je nezbytné používat lepené stavební dřevo nebo I nosníky. Prvky geodetických konstrukcí oproti tomu dosahují délek jednotek metrů, vady dřeva je tedy poměrně snadné eliminovat výřezem a případné rozměrové změny se takřka neprojeví. Stejně kvalitní práci tedy mnohdy odvede i stavební řezivo. (Narayanan, 2006)

Vhodné využití ve výstavbě kopulí nachází rovněž CLT panely. Jejich aplikace je prozatím především v oblasti výzkumu a designových staveb, dobudoucna skýtají velký potenciál. Moderní systémy a pokročilé digitální technologie napomáhají minimalizaci výrobního odpadu, přesto není možné eliminovat přebytky, které vznikají např. pří výřezech pro stavební otvory. V praxi jsou časté snahy využít tyto přebytky pro účely stavebně truhlářské výroby jako jsou schodiště, vestavěné skříně, kuchyňské linky apod. Většina odpadového materiálu se ale nevyužije. (Robeller, 2020)

V roce 2019 proběhl výzkum a následná realizace revolučního skořepinového konstrukčního systému. Studie představuje obecné aplikační možnosti vyvinutého CAD systému a také reálnou demonstraci v podobě geodetické konstrukce o rozponu 12 metrů složenou z 229 šestihranných desek. Základní výrobní surovinou jsou pouze dveřní a okenní výřezy CLT. Stavba je sestavena jen za pomoci speciálních dřevěných klínových spojů, tedy zcela bez jakýchkoli běžných spojovacích prostředků typu vruty či svorníky. (Robeller, 2020)



Obr. 29: CAD model experimentální stavby Recycleshell (Digital Timber Construction, 2019)

Ocel

Ocel umožňuje výstavbu velkorozponových kopulových konstrukcí. Hlavními výhodami jsou jednoduchost výroby a možnost prefabrikace všech komponentů, dále pak snadné a levné způsoby spojování nejčastěji nýtováním a metrickými šrouby. (Narayanan, 2006)

V současné době se také významně rozmáhají jednoduché geodetické systémy menších rozměrů (Obr. 30), které se stávají velmi oblíbeným řešením pro sezónní či přechodné ubytovací služby. Jedná se v podstatě o vetší stany o průměru 5–20 m. Bezkonkurenční výhodou těchto drobných staveb je jednoduchá a rychlá montáž i demontáž (Obr. 31).

Obr. 30: Lehká ocelová konstrukce geodetické kopule s využitím RBNB (GLAMPING-DOME-TENTS, 2023)

Obr. 31: Montáž stanu geodetické kopule (vlastní fotografie)

Hliník

Slitiny hliníku jsou skupinou velmi kvalitních materiálů, které jsou narozdíl od oceli odolnější vůči atmosférickým vlivům a nepodléhají korozi. V porovnání s ocelí také stavební slitiny hliníku poskytují výrazně lepší mechanické vlastnosti při nižší hmotnosti materiálu a také rozměrovou stabilitu i při teplotních výkyvech. Hliníkové kopulové systémy nachází využití především u menších staveb o rozponech přibližně do 30 m jako jsou např. nástavby pochozích střech, skleníky, zakryté terasy apod. Převážně se jedná o stavby dále kombinující nepružné materiály (sklo, cementovláknité desky aj.), které jsou jinak nepřípustné u ocelových konstrukcí (Obr. 32). Ty jsou oproti hliníku pružnější a při změnách teplot rozměrově nestabilní. Hlavní nevýhodou hliníku je finanční náročnost. Ve výstavbě kopulových staveb se tedy využívá spíše pro architektonické a designové účely nebo právě tam, kde jsou nezbytné jeho bezkonkurenční materiálové vlastnosti. Vhodným systémem jsou pro hliník geodetické kopule, které dovolují použití slabších profilů než u většiny sférických systémů. (WAI HUNG, 2009)

Obr. 32: Kopůle s hliníkovou konstrukcí a celoplošným zasklením o průměru 23 m (VIKING DOME, 2023)

Železobeton

Konstrukce železobetonových kopulí jsou nepraktické. Jejich výstavba je náročná a v porovnání s ostatními materiály i značně zdlouhavá. Nejnáročnější je potřeba komplikovaného bednění, které je obtížné přizpůsobit požadovanému tvaru kopule a zajistit jeho stabilitu po celou dobu technologického procesu vytvrzení betonu. Samotné bednění je potom mnohem výraznější cenovou položkou, než je u betonových staveb běžné. Dalším negativem je vlastní zatížení, které je u železobetonových kopulí rovněž mnohem větší než u jiných typů materiálů. Tyto, i některé další faktory vedou k tomu, že železobetonová kopule obvykle není považována za výhodnou a ekonomickou variantu. (Makowski, 1984)

Obr. 33: Železobetonová kopule – Bellinzona Švýcarsko (vlastní fotografie)

3.5 Konopný beton

Technologie konopného betonu se začala rozvíjet v průběhu 90. let 20. století ve Francii a Belgii. V současnosti má největší uplatnění pravděpodobně v Anglii, kde získává prestiž díky své ekologičnosti a rustikálnímu charakteru zhotovených staveb. (Bevan, 2008)

Jedná se o difuzně otevřený tepelně izolační stavební materiál. Pro jeho mimořádné vlastnosti by se dalo říct, že jde o jeden z nejambicióznějších stavebních materiálů z kategorie kompozitních materiálů na bázi přírodních surovin. Jeho základem je konopné pazdeří v podobě třísek a vláken a minerálního pojiva nejčastěji na bázi vápna, ale může být také na bázi jílu, někdy i cementu. Tyto přísady se smíchají s vodou, což umožní obalení matrice vápennou směsí. Následně dochází k vytvrzení pojiva v důsledku chemické reakce mezi vápnem a vodou a slepení konopných částic dohromady. Byť by tedy mohl název mylně napovídat, že se jedná o alternativu klasického betonu, není tomu tak. Cementové směsi narušují přírodní procesy konopné složky během vyzrávání, a proto se tato kombinace neosvedčila. Oproti tomu zrání a tvrdnutí hydraulického vápna fungují s konopnou složkou velmi dobře. Na rozdíl od standardního betonu, kde cementová složka zastává také výplňovou funkci, funguje vápno skutečně pouze jako pojivo. Vysledný materiál je proto velmi porézní, díky čemuž má příznivé tepelně izolační vlastnosti, ale zároveň horší pevnostní charakteristiky. Konopný beton tedy neslouží jako nosný materiál, ale pouze výplňový. Nosnou fuknkci může u staveb z konopného betonu zastávat ocelová, nebo také zděná konstrukce, nejvhodnější volbou je varianta sloupkové dřevostavby. (Magwood, 2016)

Mezi hlavní pozitiva tohoto materiálu patří mimo výše zmíněnou obnovitelnost a udržitelný charakter např. požární odolnost. Dle ČSN EN 13501-1 požární klasifikace spadá konopný beton do třídy reakce na oheň B-s1, d0, jde tedy o nehořlavý materiál. (Majringer, 2019)

Konopný beton je hygroskopický materiál, který lze použít jako komplexní stěnovou výplň. Při homogenní skladbě obvodového pláště zajišťuje rovnoměrný teplotní i vlhkostní spád a svou skladbou nahrazuje sestavy tepelných izolací, parozábran i požárních obkladů. Řada studií poukazuje na mimořádnou kombinaci tepelně a akusticky izolačních i akumulačních vlastností takové skladby. Díky difuzní otevřenosti může stavba přirozeně pracovat s vlhkostí v interiéru v reakci na změny atmosférických tlaků, čímž odpadá potřeba systémů nuceného větrání. Této problematice věnují pozornost mnohé výzkumy, které se snaží empiricky prokázat také pozitivní vliv takového systému na zdraví obyvatel. Jak je známo, vápno má zároveň dezinfekční účinky a konopnému betonu zaručuje odolnost vůči usazování

mikrobů a plísní a zvyšuje jeho odolnost vůči biologické degradaci. Unikátní je také schopnost zpětné sekvestrace uhlíku během dozrávání vápenné složky. (Bevan, 2008)

3.5.1 Výrobní specifikace konopného betonu

Konopné pazdeří

Pazdeří je dřevité jádro rostliny konopí. Toto jádro tvoří asi 60–70 % objemu stonku, zbylých 30–40 % tvoří lýková vlákna. Výsledky chemických analýz ukazují, že konopné pazdeří obsahuje 44,0 % alfa-celulózy, 25,0 % hemicelulóz, 23,0 % ligninu, 4,0 % extraktiv (oleje, bílkoviny, aminokyseliny, pektin) a 1,2 % popelovin. V průmyslovém zpracovávání konopí je pazdeří vedlejším produktem výroby, nebo také výrobním odpadem. Primárním produktem je pro konopné vlákno (lýko) nebo konopná semena. (Magwood, 2016)

V České republice prozatím neexistují žádné legislativní či normativní požadavky na kvalitu nebo vlastnosti konopného pazdeří pro stavební využití. Níže popisované informace vyplývají pouze z charakteristik certifikovaných produktů, informací plynoucích z praktických zkušeností firem, které se výstavbou z konopného betonu zabývají a zahraničních doporučení.

Základem zpracování konopného pazdeří pro stavební účely je rozměrová selekce částic a odstranění jemných lýkových vláken a prachu. V praxi se nejvíce osvědčily frakce o délce cca 10–25 mm a šířce 1–5 mm. Třídění a distribuce velikosti částic ovlivňuje mnoho výkonnostních aspektů včetně pevnostních a tepelných vlastností. Cestou k vysoké kvalitě je směs s rovnoměrnou distribucí malých, středních a velkých částic. Sypná hmotnost pazdeří pro konopný beton se pohybuje mezi 110 až 115 kg/m3.V ideálním případě by mělo být méně než 0,5 % hmoty tvořeno jemnými částicemi menšími než 0,5 mm. Nadměrná prašnost může mít výrazný dopad na soudržnost výplně z konopného betonu. V extrémních případech může dojít až ke zborcení. Narušení strukturální integrity nastává již ve fázi přípravy mokré směsi, kdy prach absorbuje vysoký podíl vodní složky. To způsobí nerovnoměrnou distribuci a zhoršení vlastností pojiva. Jediným způsobem, jak se těmto problémům při nekvalitní dávce konopného pazdeří vyhnout, je kompenzace větším množstvím vody, což ovšem značně prodlouží dobu schnutí. Výsledná kvalita je navíc nespolehlivá, podíl prachu v konopném pazdeří je proto třeba maximálně eliminovat. (Stanwix, 2014)

Dle doporučení certifikovaných výrobků by se konopí mělo skladovat v suchu, a to i v případě kompaktně uzavřeného igelitového balení. Je tomu tak proto, aby vlhkost pazdeří

zůstala rovnoměrně rozdělena až do procesu míchání mokré směsi, a i následné vysychání probíhalo rovněž rovnoměrně. Stejně jako u všech stavebních materiálů na bázi celulózy by relativní vlhkost před zpracováním neměla přesahovat 18 %. Krátkodobé vystavení vlhkému prostředí ani rozdílná vlhkost suché směsi by ale neměla ovlivnit kvalitu stavby. Dlouhodobá expozice zvýšené vlhkosti přináší rizika biologické degradace a hniloby. (Bevan, 2008)

Pojivo

Existuje několik možností anorganických pojiv, které lze použít do směsí konopného betonu. Pro své vlastnosti se nejčastěji využívají vápna, prozatím ale není veden žádný normový předpis, který by použití vápna v konopném betonu nařizoval. Při zvažování vápenných pojiv je důležité chápat rozdíly mezi hydraulickým vápnem a hydratovaným neboli hašeným vápnem.

Hašené vápno vytvrzuje chemickou resorpcí CO2, který byl vyloučen během výroby. K tomu, aby tento proces proběhl správně, musí být vápno ve volném kontaktu se vzduchem. Tento proces, tzv. sekvestrace uhlíku probíhá poměrně dlouhou dobu. Malty a omítky na bázi hašeného vápna vytvrzují v průběhu měsíců i let, k úplnému dozrání může docházet až po desetiletích. V případě konopného betonu dochází ke stejným procesům, a porto by se hašené vápno nemělo používat jako jediná pojivová složka. Ve střední části silných vrstev může docházet k nedostatečné, nebo velmi pomalé reakci kvůli omezenému přístupu CO2 a konopný beton by tak nebyl schopen dosáhnout potřebných vlastností. Proto se do těchto směsí přidává také podíl hydraulického vápna, které chemicky reaguje a dozrává za přítomnosti vody.

Hydraulické vápno vytvrzuje taktéž chemicky, částečně reakcí s vodou za vzniku nové sloučeniny a částečně sekvestrací úhlíku. Hydraulický soubor tohoto typu vápna vzniká díky přítomnosti jílových složek, které se během výrobního procesu žíhání mění na křemičitany. Jejich zastoupení poté vápnu umožňuje chemicky reagovat i ve ztížených podmínkách bez přístupu vzduchu. Hydraulické vápno je nejčastěji používaným pojivem pro konopný beton.

V některých případech např. v Severní Americe se směs konopného betonu míchá s cementovými pojivy. Přírodní cement je podobný hydraulickému vápnu, ale výrazně rychleji tvrdne. Proto se kombinuje ještě s retardéry schuntí. Portlandský cement není pro konopný beton příliš vhodný. Hlavním problémem je distribuce vody mezi matrici a pojivo. Snadno může docházet k převlhčení konopné složky a příliš suchému nerozmíchanému cementu zároveň. Některé experimentální projekty zkoušely obohatit směs o složku písku, výsledný materiál ale ztratil téměř všechny benefity konopného betonu. Stal se tvrdý, těžký, neprodyšný

a rapidně se zhoršily jeho tepelně izolační vlastnosti. V některých případech se portlandský cement přidává do směsí s vápnem pro zvýšení pevnosti, nemělo by se ale jednat o více než 25 %. (Stanwix, 2014)

Směs

Směsi s velmi nízkou hustotou 150 až 200 kg/m^3 jsou vhodné pouze pro volné aplikace, kde není potřeba žádná soudržnost nebo strukturální vlastnosti. Typickým využitím je volné foukání nebo spíše stříkání na ploché půdní prostory, podlahové trámové systémy nebo oboustraně opláštěné konstrukce stěn.

Směsi s nízkou hustotou 200 až 250 kg/m^3 jsou vhodné rovněž pro oboustranně opáštěné stěnové systémy, zároveň už ale vykazují alespoň minimální soudržnost. Jsou proto vhodné jako izolační materiál šikmých střech, protože na rozdíl od směsí s hustotou pod 200 kg/m^3 u nich nedochází k sesedání.

Směsi střední hustoty 250 až 350 kg/m^3 už jsou dostatečně samonosné a při aplikaci ve stěnových systémech umožňují oboustranné nanesení omítky bez rizika sedání materiálu a praskání. Soudržnost je ale třeba před aplikací vždy překontrolovat, povrchové vrstvy se při dotyku nesmí drolit.

Směsi s vysokou hustotou 350 až 500 kg/m^3 jsou schopné přenést běžné užitné zatížení a používají se jako tepelné izolace mezi podlahou a základovou deskou. Zda je směs dostatečně únosná pro použití u konkrétní staby by ovšem měl vždy rozhodnout statik. (Magwood, 2016)

3.5.2 Aplikace konopného betonu

Konopný beton se aplikuje několika způsoby, a to odléváním a pěchováním do připraveného bednění, foukáním, respektive nástřikem a ve formě prefabrikovaných tvarovek.

Vnější i vnitřní povrchové úpravy by měly být prodyšné (mikroporézní) a nemá smysl nanášet barvy na bázi plastu/polymeru nebo jiné povrchové úpravy, které mohou ohrozit prodyšnost a difuzní otevřenost materiálu. Stěny z konopného betonu mohou být snadno dokončeny jednoduchou vápenou omítkou. Ta se obvykle nanáší přímo, protože vápno má dobrou paropropustnost, která je nezbytná pro tepelně vlhkostní vlastnosti konopného vápna. Pokud je konopný beton odléván opatrně, nemusí být z interiérové strany omítáno vůbec. Typická hrubá struktura je mnohdy považována za atraktivní, navíc poskytuje velmi dobrou akustickou pohltivost. (Bevan, 2008)

Aplikace odléváním

Kompozitní výplň při tomto způsobu aplikace obvykle neplní nosnou funkci. Směs se odlévá kolem rámu, který přenáší veškerá zatížení od střechy a horních pater až k základům. Rámu ovšem dodává prostorovou tuhost a není proto třeba dalšího vyztužení. Vápenná směs poskytuje dřevu přirozené ochranné prostředí vůči biologickým činitelům a nejsou proto nezbytné další chemické úpravy. Mokrá směs se nalévá do dočasného nebo trvalého bednění a lehce se zhutní. Pěchování by se mělo provádět po vrstvách o tloušťce 200 mm až 300 mm. Bednění by se mělo ponechat alespoň 24 hodin, ačkoli materiál se stává samonosným obvykle už dříve. (Bevan, 2008)

Obr. 34: Vlevo – zhutněný konopný beton v dočasném bednění, vpravo – povrch po odbednění (THE LAST STRAW, 2014; OZHEMP, 2020)

Aplikace nástřikem

Pokud jsou stěny z konopného vápna řešeny pomocí techniky stříkání, jednou z možností je použití ztraceného bednění, proti kterému lze směs nastříkat. K tomu lze použít řadu různých technik bednění, ty ale musí být schopny vyrovnat se s množstvím vlhkosti ve směsi. Ze strany aplikace se někdy používa pojistná síťovina, která nástřik zajistí proti odpadávání. Konopný beton při této technologii nikdy nemá nosnou funkci. Volné stříkání na ploché půdní prostory se provádí obdobně jako aplikace foukaných tepelných izolací. Nástřik vyžaduje speciální vybavení a je nejlepší, když tuto činnost provádí vyškolení pracovníci. (Bevan, 2008)

Obr. 35: Aplikace konopného betonu nástřikem (Lupu, 2022)

Tvarovky

Tvarovky mohou být u určitých typů budov vhodnější než odlévání a foukání, ve většině případů se ale jedná o nákladnější variantu. Hlavní nevýhodou je lepení na maltové lože, což vede k nehomogenní struktuře stěny a riziku vzniku netěsných spár. Použitá směs navíc musí mít vyšší hustotu, což zhoršuje tepelně izolační vlastnosti. Významným benefitem je ale možnost prefabrikace a zajištění homogennosti všech vyrobených tvarovek, případně dílců, což je při přípravě na stavbě často obtížné zajistit. Při vhodně zvoleném způsobu použití tato technologie tedy rozhodně má svůj význam. (Bevan, 2008)

Obr. 36: Nosný stěnový systém z prefabrikovaných tvarovek na bázi konopného betonu (HempBuild Magazine, 2021)

3.5.3 Technické parametry

Technologické vlastnosti konopného betonu jsou velmi proměnlivé a odvíjí se od způsobu přípravy, míchacího poměru, hustoty materiálu a způsobu aplikace. Dodavatlé certifikovaných výrobků, proto ve svých technických listech uvádí zpravidla hodnoty v určitých rozmezích, případně hodnoty s možnou procentuální odchylkou. Tyto hodnoty dále podmiňují dodržením doporučeného postupu přípravy.

Konopný beton je vhodné označovat primárně za výplňový. Kategorizace mezi tepelně izolační materiály je komplikovanější. V Tab. 1 je na základě dat z technických listu výrobců zpracováno porovnání vybraných tepelně izolačních materiálů a certifikovaného výrobku konopného betonu Hempcrete®.

Tab. 1: Srovnání materiálovych charakteristik certifikovaného produktu konopného betonu a vybraných tepelněizolačních materiálů (Majringer, 2019; STEICO SE, 2019; ISOVER SAINT-GOBAIN, 2021)

Parametr		Konopný beton Hemcrete®	Dřevovláknitá izolace STEICOprotect dry	Minerální izolace ISOVER Uni
Objemová hmotnost	ρ (kg/m³)	330 ± 10	180	40
Součinitel tepelné vodivosti při 10° (deklarovaný)	λ (W/m.K)	0,0697 ±5%	0,045	0,35
Měrná tepelná kapacita	c (J/kg.K)	1550 (0% R.H) až 1700 (65% R.H)	2100	800
Faktor difuzního odporu	μ	4,85 ± 0,24	3	1
Třída reakce na oheň		B	E	A1

Z tabulky vyplývá, že konopný beton je téměř ve všech parametrech hoším materiálem než běžně používaná minerální izolace. Jediný parametr, ve kterém ji předchází je faktor difuzního odporu. Pokud uvážíme předpoklad, že chceme v difuzně otevřené skladbě stěny vynechat parobrzdnou vrstvu, je potřeba, aby faktor difuzního odporu byl vyšší. Konopný beton je tedy v tomto ohledu vhodnější.

Ve srovnání s dřevním vláknem při přibližně o 1/3 větší objemové hmotnosti vykazuje horší parametr součinitele tepelné vodivosti. Vrstva tepelné izolace ve stejné tloušťce by tedy byla o více než 1/3 težší, pro stejnou hodnotu součinitele prostupu tepla by navíc vrstva musela být silnější. Zároveň dosahuje nižších hodnot měrné tepelné kapacity, konopný beton má tedy horší tepelně akumulační vlastnosti.

Jak dokládá Tab. 2 převzatá z oficiálně udávaných informací k produktu Hemcrete®, je hraniční tloušťka vrstvy konopného betonu potřebná ke splnění požadavků pro pasivní stavby dle ČSN 73 0540-2 je 450 mm.

Tab. 2: Hodnoty součinitele prostupu tepla materiálu Hemcrete® pro různé tloušťky (Majringer, 2019)

Tloušťka zdiva (mm)	Součinitel prostupu tepla U (W/m^2·K)
300	0,27
350	0,23
400	0,205
450	0,180
500	0,165

Pokud ovšem v Tab. 3 porovnáme variantu tvarovek z konopného betonu s tvárnicemi doporučovanými pro výstavbu pasivních staveb, můžeme konopný beton hodnotit jako plně konkurenční přírodní obnovitelnou alternativu. Je samozřejmě stále nutné zvažovat skutečnost, že konopné tvarovky jsou nenosné a zároveň splňují nižší třídu reakce na oheň. V parametru objemové hmotnosti je tento materiál srovnatelný s tvárnicemi YTONG a má dokonce lepší tepelně izolační a akumulační schopnosti. Měrná tepelná kapacita, tedy parametr odpovídající tepelně akumulačním schopnostem, je vyšší dokonce i v porovnání s pálenou cihlou Porotherm.

Tab. 3: Srovnání materiálovych charakteristik certifikovaných tvarovek z konopného betonu a běžných variant tvrarovek pro pasivní domy (LAUDATOSI, 2023; Wienerberger, 2023; Xella CZ, 2022)

Parametr		**Konopný blok Blocco Ambiente®**	**Cihla Porotherm 50 T Profi**	**Tvárnice YTONG Lambda YQ 500**
Objemová hmotnost	ρ (kg/m³)	330	670	250 až 300
Součinitel tepelné vodivosti při 10° (deklarovaný)	λ (W/m.K)	0,07	0,064	0,077
Měrná tepelná kapacita	c (J/kg.K)	1280	1000	1000
Faktor difuzního odporu	μ	4,5	5/10 (ČSN EN 1745)	5/10 (ČSN EN 1745)
Charakteristická hodnota pevnosti v tlaku	f_k N/mm^2	0,4	3,5	1,25
Třída reakce na oheň		B - s1, d0	A1	A1

Mechanické vlastnosti konopného betonu nebyly doposud dostatečně ověřeny. Respektive výsledky dosavadních výzkumů ukazují na nižší pevnosti, a především jsou natolik variabilní, že tento materiál nemůže být hodnocen jinak než jako mechanicky nespolehlivý. Z tohoto důvodů se používá převážně jako nenosný. Při směsích střední hustoty je konopný beton natolik soudržný, že rámovým dřevěným konstrukcím napomáhá v prostorové tuhosti a omezuje namáhání na vzpěr nosných sloupků. (Bevan, 2008)

V některých zemích se konopný beton využívá jako nosný, jde ovšem pouze o formu konopných tvárnic vyrobených ze směsi s větším podílem pojiva a přísměsí portlandského

cementu a písku. Tyto tvárnice mají charakteristickou pevnost v tlaku obvykle do N/mm^2. (Bevan, 2008)

Výsledky studií uvádí korelaci mezi pevností v tlaku a hustotou vyzrálého konopného betonu. Vliv na Yungův modul pružnosti je velmi variabilní a odvíjí se především od prašnosti vstupní suroviny pazdeří. Vztah mezi pevností v tlaku a hustotou znázorňuje Tab. 4. Bylo také prokázáno, že výslednou hustotu a tím i pevnost ovlivňuje počáteční obsah vody. Čím vyšší je obsah vody, tím menší bude hustota vyzrálého konopného betonu. Dále byl prokázán vliv velikosti částic, konkrétně že menší velikost částic vede k lepším mechanickým vlastnostem konopného betonu. (Niyigena, 2016)

Tab. 4: Závislost mechanických a tepelných vlastností konopného betonu na jeho hustotě a míchacím poměru (Lupu, 2022)

Application	Shiv : binder proportion (by mass)	Target density [kg/m^3]	Typical ultimate compressive strength [N/mm^2]	Typical thermal conductivity λ [W/mK]
Roof	1:1	220	0.05	0.06
Wall	1:1.5	275	0.11	0.06 - 0.09
Wall	1:2	330	0.22	0.09 - 0.115
Wall	1:2 compressed	440	0.35	0.115
Floor	1:3	500	0.8	0.13
Floor	1:4	600	1.15	0.14
Pre-cast Structural	1:4 compressed	600-1000	2 - 6	0.14 - 0.27

4 Metodika

Praktická část závěrečné diplomové práce se zabývá těmito oblastmi:

1. Dílčí část projektové dokumentace pro realizaci staveb
    a. Technické zprávy
    b. Kompletní výkresová část (M 1:100, M 1:50)
2. Tepelně technické a vlhkostní posouzení obvodových konstrukcí
3. Statický posudek konkrétních zvolených nosných prvků a třech detailů vybraných spojů
4. Návrh rozpočtu pro konstrukční část objektu

4.1 Arichetktonicko-stavební řešení formou realizační dokumentace

Závěrečný diplomový projekt byl zpracován podle platného znění vyhlášky č. 499/2006 Sb. o dokumentaci staveb, zákona č. 183/2006 Sb.Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). Textová i výkresová část jsou inspirovány požadavky na Dokumentaci pro společné povolení, konkrétně technická zpráva odpovídá části B Souhrnná technická zpráva. Výkresová část je dále rozšířena o výrobní dokumentaci v podobě kusovníku pro jednotlivé varianty nosných konstrukčních prvků a panelových výplní z konopného betonu.

Pro zpracování výktresové části byly použity softvary Blender na tvorbu geodetické prostorové struktury, AutoCAD 2023 pro situační výkresy a Revit 2023 pro výkresy stavebního objektu.

4.2 Tepelně technické a vlhkostní posouzení obvodových konstrukcí

Návrh pracuje efektivním řešením obvodového pláště, který tvoří pouze jedna skladba, variantně potom se sendvičovou skladbou s jádrem z foukané celulózy. Obě skladby byly posouzeny v softwaru Teplo 2017 z pohledu prostupu tepla a vlhkosti, výsledky byly posouzeny podle ČSN EN 73 0540.

Parametry konopného betonu normy platné v ČR neevidují, tudíž nejsou ani v katalogových hodnotách softwaru Teplo 2017. Dle zpětných výpočtů oficiálně udávaných hodnot produktu Tradical® bylo zjištěno, že pro přepočet deklarovaných hodnot na návrhové je uvažována 15 % přirážka. V provedených výpočtech byl proto přepočet proveden obdobně.

4.3 Statický posudek

Vypočty jednotlivých zatěžovacích stavů by byly provedeny ručně za pomoci softwaru MS Excel. Dále byl vytvořen 3D model konstrukce geodetické kopule v prostředí softwaru RFEM společnosti Dlubal Software. S ohledem na tvarovou variabilitu jednotlivých ploch by bylo velmi obtížné zadávat zatížení na prvky konstrukce přepočtené na zatěžovací šířku, proto byla vypočtená zatížení aplikována jako volná zatížení působící na jednotlivé plochy. Metodou konečných prvků byly vyhodnoceny vnitřní síly na jednotlivých prvcích.

Všechny výpočty byly vyhotoveny v souladu s platnými zněními soustavy následujících normativních předpisů:

Eurokód 0: ČSN EN 1990 - Zásady navrhování konstrukcí

Eurokód 1: ČSN EN 1991 - Zatížení konstrukcí

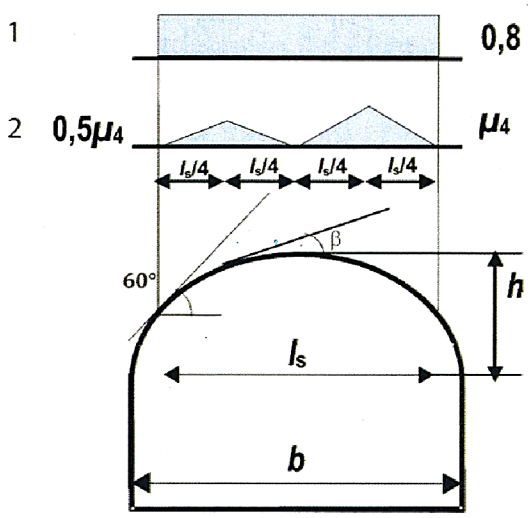
Eurokód 5: ČSN EN 1995 - Navrhování dřevěných konstrukcí

4.3.1 Vlastní tíha a užitné zatížení

Zatížení vlastní tíhou a užitá zatížení byly vyhodnoceny pouze pro konstrukci kopule. Interiérové kostrukce zdí a stropu 1NP jsou navrženy formou interiérové konstrukčně nezávislé vestavby, a to z toho důvodu, že zavěšení na nosnou konstrukci stavby by vedlo k narušení rovnoměrného rozložení silových působení, což je jeden z hlavních benefitů tohoto konstrukčního řešení. Vypočet byl proveden podle ČSN EN 1991-1-1.

4.3.2 Zatížení sněhem

Norma ČSN EN 1991-1-3 pro výpočty zatížení sněhem neuvažuje konstrukce tvaru kopule. Použil jsem tedy adaptovaný výpočet pro válcové střechy. Příslušné plošné zatížení bylo aplikováno na jednotlivé plochy orotováním kolem vrcholu ve vzdálenostech $l_s/4$. Tento postup vyplýva z principu určování tvarového součinitele zatížení sněhem pro válcovou střechu (Obr. 37). Pro zjednodušení výpočtu a zajištění předpokladu, že posudek je na straně bezpečnosti, bylo počítáno pouze s větším z vypočtených zatížení.



Obr. 37: Tvarové součinitele zatížení sněhem pro válcovou střechu (ČSN EN 1991-1-3 ed. 2, 2022)

4.3.3 Zatížení větrem

Zatížení větrem bylo vyhodnoceno ručně za pomoci programu MS EXCEL na základě výpočetu pro klenbové střechy a kopule dle ČSN EN 1991-1-4.

4.3.4 Posouzení dvou konstrukčních prvků

V rámci posudku prvního z nosných prvků byla za pomoci softwaru Dlubal RFEM provedena analýza celého nosného systému s posouzením pro dřevěné konstrukce.

Jako druhý prvek byl zvolen sloup namáhaný na vzpěr od vlastní tíhy interiérové konstrukce stropu a užitného zatížení.

Výpočty byly provedeny podle ČSN EN 1995-1-1 a ČSN 73 1702. Materiálové charakteristiky odpovídají hodnotám uvedeným v ČSN EN 338.

4.3.5 Posouzení konstrukčních spojů

Posudek zvolených konstrukčních spojů byl proveden ručně za pomoci programu MS EXCEL podle ČSN 73 1702. Pro výpočet byl zvolen styčník, ve kterém dle výsledků MKP analýzy konstrukce dochází k největšímu namáhání, dále bylo vyhodnoceno řešení spoje ve dvou variantách:

1. typizovaný spoj pro geodetické kopule – jednsotřižný spoj dřevo/ocel
2. variantní typizovaný spoj pro geodetické kopule – dvojstřižný spoj dřevo/ocel

Jako třetí spoj bylo vybráno kotvení do základové desky přes ocelový šroub.

4.4 Cenový rozpočet konstrukční části

Rozpočet byl proveden za pomoci programu KROS 4, a to v rozsahu položkového rozpočtu nákladů na realizaci, tedy materiál a stavební práce. Součástí rozpočtu nejsou položky techniky prostředí staveb a zařizovacích předmětů.

5 Výsledky

5.1 Stavebně konstrukční řešení

5.1.1 Urbanistické a architektonické řešení

Projekt byl vypracován v návaznosti na stavební záměr vybudování areálu Centra ekologické výchovy v Pražské Tróji.

Navrhovaná stavba se nachází ve střední části pozemku ve směru sever-jih a přibližně v jedné třetině ve směru východ-západ blíže k východní části a vjezdu na pozemek

K objektu je příjezd po zpevněné komunikaci. S pohybem osoby s omezenou schopností pohybu není uvažováno.

Zastavěná plocha objektu je 135,2 m2. Výška hřebene je + 6,600 m od podlahy 1. NP.

Objekt má 1 nadzemní podlaží a podkroví. Soustava obvodového zdiva a střechy je společně tvořena kopulovitou konstrukcí o vnějším průměru 13,1 m. Objekt je nepodsklepený. Pata obvodového zdiva je založena ve výškovém odsazení 300 mm v nejvyšším bodě okolního terénu.

V 1NP se nachází hlavní i vedlejší vstup do objektu, centrální obytný prostor, kuchyně, 2x samostatné WC, 2x koupelna a technická místnost. Ve 2.NP se nachází otevřený prostor určený k přespávání osob. Obě podlaží jsou propojena centrálním schodištěm.

Na střeše je navržena krytina asfaltový šindel Gutta Guttatec Rectangular.

5.1.2 Konstrukční a materiálové řešení

Výsledné řešení představuje kopulovou stavbu s geodetickým nosným systémem. Konstrukce obvodového pláště byla navržena z konstrukčních hranolů C24 průřezu 100x100 mm. Po statické analýze bylo nezbytné optimalizovat průřez diagonálních prvků v místě narušení geodetické struktury pro dveřní otvor. Optimalizovaný průřez je 120x120 mm.

Finální skladba obvodového pláště je tvořena vápennou omítkou, vrstvou konopného betonu, difuzní pojistnou hydroizolací, provětrávanou mezerou, bedněním pláště z OSB a krytinou z asfaltového šindele.

Interiérové stěny jsou řešeny jako přiznaná sloupková konstrukce z řeziva C24 vyplněná konopným betonem.

Strop je trámový s přiznaným pohledovým záklopem z biodesky a akustickou izolací formou potěru z konopného betonu.

Více informací ke stavebně konstrukčnímu řešení je uvedeno v Příloze 1 a Příloze 3.

5.2 Statická analýza

5.2.1 Vlastní tíha a užitné zatížení

Plošné materiály					
Materiál	Objemová hmotnost (kg/m^3)	Tloušťka vrstvy (m)	Plošná hmotnost (kg/m^2)	Charakteristické zatížení (kN/m^2)	Návrhové zatížení (kN/m^2)
Omítka	1400	0,02	28	0,280	0,3780
Konopný beton	300	0,45	135	1,350	1,8225
OSB	600	0,02	12	0,120	0,1620
Asfaltový šindel	-	-	9,2	0,092	0,1242
Liniové materiály					
Materiál	Objemová hmotnost (kg/m^3)	Celková délka (m)	Celková hmotnost (kg)	Charakteristické zatížení (kN/m^2)	Návrhové zatížení (kN/m^2)
Nosná kce. (100x100mm)	420	448	1883	0,083	0,1124
Laťování (50x30mm)	420	466	293	0,012	0,0162
Zatížení vlastní tíhou:				**1,94**	**2,62**

5.2.2 Zatížení sněhem

Sněhová oblast		I
Char. hodnota zatížení sněhem	S_k	0,7
Typ krajiny - normální	C_e	1
Součinitel teploty	C_t	1
Tvarový součinitel pro sníh plný	μ_1	0,8
Tvarový součinitel pro navátý sníh	μ_3	2
Char. zatížení sněhem - ZS1	**$S_{k,1}$**	**0,56**
Char. zatížení sněhem - ZS2	**$S_{k,3}$**	**1,4**
Char. zatížení sněhem - ZS3	**$S_{k,3,1/2}$**	**0,7**

5.2.3 Zatížení větrem

Větrná oblast		I	
Základní rychlost větru výchozí	$v_{b,0}$	22,5	m/s
Součinitel směru větru	c_{dir}	1	
Součinitel ročního období	c_{season}	1	
Základní rychlost větru	v_b	22,5	m/s
Kategorie terénu		III	
Výška hřebene	Z	6,000	m
Parametr drsnosti terénu	Z_0	0,300	m
Minimální výška	Z_{min}	5,000	m
Maximální výška	Z_{max}	200,000	m
Součinitel terénu	k_r	0,215	
Součinitel drsnosti terénu	C_r	0,645	
Součinitel orografie	C_O	1,000	
Střední rychlost větru	v_m	14,518	m/s
Součinitel turbulence	k_1	1,000	
Intenzita turbulence	I_v	0,334	
Měrná hmotnost vzduchu	ρ	1,250	kg/m^3
Základní dynamický tlak větru	q_b	316,406	m^{-2}
Součinitel expozice	C_e	1,389	
Maximální dynamická tlak	q_p	0,440	kN/m^2
Součinitel vnějšího tlaku větru A	$C_{pe,10,A}$	0,8	
Součinitel vnějšího tlaku větru B	$C_{pe,10,B}$	-1,2	
Součinitel vnějšího tlaku větru C	$C_{pe,10,C}$	0	
Tlak větru na vnější plochy A	**$w_{e,A}$**	**0,35164223**	**kN/m^2**
Tlak větru na vnější plochy B	**$w_{e,B}$**	**-0,5274634**	**kN/m^2**
Tlak větru na vnější plochy C	**$w_{e,C}$**	**0**	**kN/m^2**

5.2.4 Posouzení konstrukčních prvků

Viz Příloha 5

5.2.5 Posouzení konstrukčních spojů

Viz Příloha 5

5.3 Tepelně technické zhodnocení obvodového pláště

Tepelně technické posouzení varianty s homogenní vrstvou konopného betonu splnilo normou stanovené požadavky. Z posudku vyplývá riziko kondenzace při teplotě -13°C ve vzdálenosti přibližně 10 cm od vnějšího okraje. Tento výsledek je uspokojivý, riziko je malé.

Variantní řešení panelu jádrem z foukané celulózy prošlo tepelně technickým posouzením. Riziko vzniku kondenzátu ovšem nastává již při -5°C. Na povrchu vnitřní strany vnější vrstvy konopného betonu. Toto riziko je příliš vysoké, tato varianta nepřichází v úvahu.

5.4 Cenový rozpočet konstrukční části

Výsledná cena konstrukční části navrženého objektu včetně realizace je 6 079 203,73 Kč bez DPH. Detailní výpis jednotlivých položek je v Příloze 6.

6 Diskuze

Zvolené návrhové řešení nalezlo více než uspokojivou možnost tvarové optimalizace stavebních objektů. Teorie říká, že prokazatelně nejperspektivnějším tvarem pro úsporu energie je koule, ve stavebním pojetí ideálně polokoule. Řada odborníků například z Centra pasivního domu ovšem podotýká, že výroba výhradně pravoúhlých a rovinných stavebních materiálů použití tohoto tvaru téměř vylučuje. Vypracované řešení a navržená technologie prefabrikovaných trojúhelníkových dílců aplikovaných na geodetickou strukturu tento problém ovšem úspěšně obchází.

V práci byly porovnány dvě varianty skladeb prefabrikovaných dílců. Varianta homogenního kompaktního panelu z konopného betonu vyhověla v tepelně technickém a vlhkostním posouzení, nicméně představuje poměrně náročné řešní z pohledu velké hmotnosti a rozměrových dimenzí. Pro manipulaci na staveništi bude nezbytná i drobnější manipulační technika, např. auto s rukou. Vyšší hmotnost obvodového pláště navíc vylučuje jednu z variant konstrukčního spoje, konkrétně spoj dvojitým ocelovým plechem a vruty.

Hlavní myšlenka druhé varianty, tj. sendvičová skladba panelu v sobě skýta velký potenciál právě kvůli předpokladu nižší hmotnosti a zároveň pravděpodobně lepší finanční dostupnosti. Konopný beton je totiž velmi zajímavý a perspektivní materiál, dle vyjádření hlavního českého prodejce konopného betonu a certifikovaného produktu Hempcrete ® pana Majnera totiž současná legislativa a nedostatek konopného pazdeří řadí tento materiál mezi dražší alternativní stavební suroviny. Pro širší implementaci konopné technologie do stavebnictví by tedy bylo vhodné kombinovat konopný beton s dalšími levnějšími přírodními materiály.

Sendvičová varianta s jádrem z foukané celulózy se bohužel jeví jako riziková, a to z důvodu pravděpodobnosti vzniku kondenzátu na vnitřní straně vnějšího pláště panelu. Kombinace alternativních materiálů a vývoj sendvičových skladeb by ovšem zcela jistě měly být v budoucnu předmětem dalších výzkumů.

7 Závěr

Hlavní myšlenkou této práce je implementace alternativních stavebních materiálů a inovativních technologií do stavebnictví za účelem snižování uhlíkové stopy a environmentálních dopadů stavebního sektoru. Jednou z možných odpovědí na toto téma je projekt zpracovaný pro účely této práce. Návrh vychází z několika předem stanovených cílů, kterými jsou: konopný beton jako majoritní surovina použitá při výstavbě objektu, vhodně zvolená podoba a stupeň prefabrikace stavebních dílců a celkové tvarově optimalizované řešení. Po teoretické analýze jednotlivých oblastí bylo navrženo řešení v podobě geodetické kopule složené z 6 základních variant prefabrikovaných dílců a 14 délkových variant nosných prvků.

Tepelně technické a vlhkostní posouzení prokázalo, že navržená skladba je funkční a pro dřevěnou konstrukci bezpečná. Kromě toho byla skladba dimenzována na horní hranici stanoveného součinitele prostupu tepla U=0,18 W/m^2K, splňuje tedy požadavek na pasivní stavby.

Kompletní statická analýza celé konstrukce prověřila její odolnost, byly vyhodnoceny nejrizikovější oblasti a provedena optimalizace. Statický posudek ověřil jeden z hlavních benefitů geodetické konstrukce, kterým je vysoká únosnost při malém průřezu nosných prvků. Riziková oblast vzikla v místě narušení geodetické struktury pro dveřní otvor, s mírnou optimalizací průřezu ovšem konstrukce vyhověla. Následně byla vyhodnocena ideální varianta konstrukčního spoje, kterou je ocelový plech jako střední prvek kombinovaný se 4 svorníky.

Z cenového rozpočtu je zřejmé, že stavba je cenově nákladnější, v budoucnu by ale bylo možné provést další tvarové i materiální optimalizace, případně prověřit další varianty konstrukčních spojů, což by mohlo vést ke snížení nákladů.

Vypracovaná projektová dokumentace je při doplnění profesních částí plně využitelná pro účely stavebního povolení a zároveň jako výrobní dokumentace prefabrikátů.

8 Literatura

3AE: Rodinný dům Dobříš [obrázek], 2022. In: *3AE* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://3ae.cz/projekty/rodinny-dum-kytin/

BABOR, Michal, 2015. Konstrukce dřevostaveb: Prefabrikace. In: *Dřevo&stavby.cz* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/3334-prefabrikace

BALBAERT, Joppe, Jaehyun PARK, Ramon MARIMON et al., 2016. Design of sustainable domes in the context of EPS@ISEP. *Proceedings of the Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality* [online]. New York, NY, USA: ACM, 105-112 [cit. 2023-03-16]. ISBN 9781450347471. Dostupné z: doi:10.1145/3012430.3012504

BeautexWood: What Are Glulam Timbers and How They Are Used? [obrázek], 2020. In: *BeautexWood* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://beautexwood.com/what-are-glulam-timbers-and-how-they-are-used/

BEVAN, Rachel a Tom WOOLLEY, 2008. *HEMP LIME CONSTRUCTION: A guide to building with hemp lime composites Rachel Bevan and Tom Woolley*. IHS BRE Press. ISBN 978-1-84806-033-3.

BÖHM, Martin, Jan REISNER a Jan BOMBA, 2012. *Materiály na bázi dřeva*. 1. vyd. Praha: ČZU Praha. ISBN 978-80-213-2251-6.

CENTRUM PASIVNÍHO DOMU: PASIVNÍ DOMY - TECHNICKÉ A DISPOZIČNÍ ŘEŠENÍ, 2009. In: *Pasivnidomy.cz* [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://www.pasivnidomy.cz/technicke-a-dispozicni-reseni/t338

CLT SLOVAKIA: CLT panely [obrázek], 2023. In: *CLT SLOVAKIA* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.cltsk.info/produkty/drevene-clt-panely/

ČeskýTesař.cz: Dřevěné I nosníky [obrázek], 2023. In: *ČeskýTesař.cz* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.ceskytesar.cz/

ČSN EN 1991-1-3 ED. 2, 2022. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1- 3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

Dataholz.eu [online], 2023. Austria: Holzforschung Austria [cit. 23-03-14]. Dostupné z: https://www.dataholz.eu/en.htm

DAVIS, Tom, 2011. *Geodesic Domes* [online]. In: . [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: http://www.geometer.org/mathcircles

Digital Timber Construction: Recycleshell [obrázek], 2019. In: *Digital Timber Construction* [online]. Kaiserslautern [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.architektur.uni-kl.de/dtc/2019/09/05/recycleshell/

DŘEVO SMUTNÝ: Co jsou to KVH hranoly? [online], 2023. In: . [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://drevosmutny.cz/kvh-hranoly/#prettyPhoto

GLAMPING-DOME-TENTS: Experience Luxury & Nature Accommodation in Eco Friendly Glamping Dome Cabins [obrázek], 2023. In: *BDIR* [online]. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://www.bdir.com/product/experience-luxury-nature-accommodation-in-eco-friendly-glamping-dome-cabins

HAGHNAZAR, Ramtin, Hoshyar NOOSHIN a Mahmood GOLABCHI, 2014. Improving the Regularity of Geodesic Domes Using the Concept of Stepping Projection. *International Journal of Space Structures* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: doi:DOI: 10.1260/0266-3511.29.2.81

HEGGER, Manfred, Matthias FUCHS, Thomas STARK a Martin ZEUMER, 2008. *Energy manual: sustainable architecture* [online]. 1st. Basel, Munich: Walter de Gruyter GmbH [cit. 2023-03-15]. ISBN 9783034614542. Dostupné z: https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1075583

HempBuild Magazine: As Lumber Prices Surge, Hemp Blocks Get a Closer Look [obrázek], 2021. In: *HempBuild Magazine: "Your GreenBuilt Revolution"* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.hempbuildmag.com/home/as-lumber-prices-surge-hemp-blocks-get-a-closer-look

HOTOVEDOMY.CZ: Prefabrikace, 2023. In: *HOTOVEDOMY.CZ* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: https://www.hotovedomy.cz/ceniky/ceniky/poradna/slovnik-pojmu/1-prefabrikace/

HUß, Wolfgang, Matthias KAUFMANN a Konrad MERZ, 2019. *Building in Timber Room Modules*. 1st edition. Mnichov: DETAIL Practice. ISBN 978-3-95553-495-0.

ISOVER SAINT-GOBAIN: ISOVER Uni Minerální izolace z kamenných vláken, 2021. In: *ISOVER SAINT-GOBAIN* [online]. Praha 8 – Libeň: Saint-Gobain Construction Products CZ a.s. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.isover.cz/dokumenty/technicke-listy/tl-isover-uni-cz.pdf

KORYCIŃSKI, ET AL., WOJCIECH, 2017. Portable wooden buildings at the turn of the 20th century – a historical review of structural solutions: [obrázek]. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Forestry and Wood Technology* [online]. Warsaw, **2017**(100176-183) [cit. 2023-02-25]. ISSN 1898-5912. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321159110

KRISTOVÁ, Markéta, 2022. I přes mírný pokles trhu dřevostaveb se v loňském roce stavělo více domů ze dřeva. In: *Dřevo&stavby.cz* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/doporucujeme/6998-statistika-admd-2021-podil-drevostaveb-na-trhu

LAUDATOSI: Blocco Ambiente® [technický list], 2023. In: *LAUDATOSI: ZDRAVÉ KONOPNÉ STAVBY* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://konopny.sk/wp-content/uploads/2022/03/konop.BLOKY_tech.list_.pdf

LIŠKA, Luděk, 2012. Historie panelových dřevostaveb. *Tepelná ochrana budov*. 10. ISSN 1213-0907.

LUPU, M L, D N ISOPESCU, I-R BACIU, S G MAXINEASA, L PRUNA a R GHEORGHIU, 2022. Hempcrete - modern solutions for green buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. **1242**(1) [cit. 2023-03-20]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1242/1/012021

MACDONALD, Fiona, 2017. Fichtebunker, Berlin: [obrázek]. In: *BBC.com* [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: https://www.bbc.com/culture/article/20170106-incredible-rooftops-around-the-world

MAGWOOD, Chris, 2016. *Essential hempcrete contruction: the complete step-by-step guide*. Gabriola Island: New Society Publishers. Sustainable building essentials. ISBN 978-0-86571-819-7.

MAJRINGER, Patrik, 2019. HempCrete a Tradical ® Hemcrete ®. In: *Konopny-beton.cz* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.konopny-beton.cz/produkty/20-konopny-beton

MAKOWSKI, Zygmunt Stanislaw, 1984. *Analysis, Design, and Construction of Braced Domes*. London: Nichols Publishing Company. ISBN 089397191X.

MARQUIT, Amanda, 2013. *From Sears & Roebuck to Skyscrapers: A History of Prefabricated and Modular Housing* [online]. In: . s. 16 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: https://a860-gpp.nyc.gov/concern/nyc_government_publications/9g54xh844?locale=zh

NARAYANAN, Subramanian, 2006. *Space Structures: Principles and Practice*. 2. Brentwood: Multi-Science Pub., 844 s. ISBN 9780906522424.

Naturally:wood: Prefabricated wood building systems, 2023. In: *Www.naturallywood.com* [online]. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: https://www.naturallywood.com/topics/prefabrication/

NIYIGENA, César, Sofiane AMZIANE, Alaa CHATEAUNEUF et al., 2016. Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Materials Today Communications* [online]. **7**, 122-133 [cit. 2023-03-20]. ISSN 23524928. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtcomm.2016.03.003

OZHEMP: TRADICAL® HEMPCRETE CONSTRUCTION [obrázek], 2020. In: *OZHEMP* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://ozhemp.com.au/construction/

PACIFICDOMES, 2023. Geodesic Dome Frequencies Explained: [obrázek]. In: *Pacificdomes.com* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://pacificdomes.com/knowledge-base/geodesic-dome-frequencies-explained/

PARASONIS, Josifas, Andrius KEIZIKAS a Diana KALIBATIENE, 2012. The relationship between the shape of a building and its energy performance. *Architectural Engineering and Design Management* [online]. **8**(4), 246-256 [cit. 2023-03-15]. ISSN 1745-2007. Dostupné z: doi:10.1080/17452007.2012.675139

PAVLAS, Marek, 2016. *Dřevostavby z vrstvených masivních panelů: technologie CLT*. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-802-7100-552.

POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK, 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda. ISBN 80-07-00960-4.

PUUINFO: Products | Glued laminated timber [obrázek], 2022. In: *PUUINFO* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://puuinfo.fi/tuotteet/engineered-wood-products/glued-laminated-timber/verso-glulam-products/?lang=en

ROBELLER, Christopher a Niklas HAAREN, 2020. Recycleshell: Wood-only Shell Structures Made From Cross-Laminated Timber (CLT) Production Waste. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* [online]. [cit. 2023-03-06]. ISSN 1996-9015. Dostupné z: doi:10.20898

ROTHOBLAAS: UV-T CONCEALED HOOK TIMBER-TO-TIMBER CONNECTOR [obrázek], 2023. In: *Www.rothoblaas.com* [online]. © ROTHO BLAAS SRL [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/concealed-connections/uv-t

RŮŽIČKA, Martin, 2006. *Stavíme dům ze dřeva*. První. Praha: Grada. ISBN 80-247-1461-2.

Sears Archives: The Hamilton - Model Nos. 102 [obrázek], 2023. In: *Http://www.searsarchives.com* [online]. Chicago: Sears, Roebuck & Co [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: http://www.searsarchives.com/homes/images/1908-1914/1908_0102.jpg

STANWIX, William a Alex SPARROW, 2014. *The Hempcrete Book: Designing and building with hemp-lime*. 1st. Cambridge, England: Green Books. ISBN 9780857841216.

STAUB-FRENCH, Sheryl, Erik POIRIER, Francisco CALDERON, Imen CHIKHI, Puyan ZADEH, Divyarajsinh CHUDASMA a Shitian HUANG, 2018. *Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction* [online]. University of British Columbia: BIM TOPiCS Research Lab [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: https://bimtopics.civil.ubc.ca/

STEICO SE: STEICOprotect dry dřevovláknitá deska pro VKZS [technický list], 2019. In: *STEICO SE* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://web.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/Czech/Products/STEICOprotect_dry_cz_i.pdf

STEICO: STEICO LVL laminated veneer lumber [obrázek], 2023. In: *STEICO SE* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.steico.com/en/solutions/product-advantages/lvl-laminated-veneer-lumber

ŠOPÍK, Michal, 2011. Stupně prefabrikace dřevostaveb. In: *DŘEVOSTAVITEL* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: https://www.drevostavitel.cz/clanek/stupne-prefabrikace-drevostaveb

The General Panel Corporation: [obrázek] [online], 2021. In: . MIT Press Open Architecture and Urban Studies [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: https://mitp-arch.mitpress.mit.edu/pub/5nuy76j6/release/1

THE LAST STRAW: Building With Hempcrete: Essential Tips For The Beginner [obrázek], 2014. In: *THE LAST STRAW* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.thelaststraw.org/building-with-hempcrete-part-1/

TRANDOVÁ, Lenka, 2021. Prezentace - dřevostavby ADMD. In: *SAINT-GOBAIN* [online]. ADMD [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.saint-gobain.cz/node/106

VIKING DOME: D23m Protective Geodesic Aluminium Glass Dome [obrázek], 2023. In: *VIKING DOME* [online]. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://vikingdome.com/pages/protective-geodesic-aluminum-glass-dome

WAI HUNG, CHUN, 2009. *A COMPARATIVE STUDY OF STRUCTURAL MATERIAL FOR DOME CONSTRUCTION*. Cambridge (Massachusetts). COMPARATIVE STUDY. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY: Department of Civil and Environmental Engineering.

WANGERFLANGE, 2023. Geo-Dome 9v honeycomb Dome: Making frames, issues and fixes [obrázek]. In: *THE WangerFlange COMPANY* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://wangerflange.com/downloads/Honeycomb_9v_basicplans.pdf?fbclid=IwAR3iCbU7_urURPrNUDZjXQ1N7zM7szP8hhta_tvKPBd8Nu3u1dXuGPii-Iw

Weyerhaeuser: Parallam® PSL Beams [obrázek], 2023. In: *Weyerhaeuser* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.weyerhaeuser.com/woodproducts/engineered-lumber/parallam-psl/parallam-psl-beams/

Wienerberger: Porotherm 50 T Profi [technický list], 2023. In: *Wienerberger* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.wienerberger.cz/content/dam/wienerberger/czech-republic/marketing/documents-magazines/technical/technical-product-info-sheet/wall/CZ_POR_TEC_Pth_50_T_Profi.pdf

Xella CZ: ZDICÍ PRVKY A ZDIVO YTONG [technický list], 2022. In: *Xella CZ* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://storefrontapi.commerce.xella.com/medias/sys_master/root/hda/h41/8877699465246/Xella_Prehled_materialovych_vlastnosti_a_produktu_CZ_2022/Xella-Prehled-materialovych-vlastnosti-a-produktu-CZ-2022.pdf?_ga=2.93682717.1854819198.1679324670-293544053.1679324669

ZAHRADNÍČEK, Václav a Pavel HORÁK, 2011a. *Moderní dřevostavby*. Vyd. 2., aktualiz. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-3568-6.

ZAHRADNÍČEK, Václav a Pavel HORÁK, 2011b. *Moderní dřevostavby*. Vyd. 2., aktualizované. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-3568-6.

ZHIVOTOV, Dmitry, Olga PASTUKH, A. ZHELTENKOV a A. MOTTAEVA, 2020. Construction of geodesic domes made of wood and composite materials during restoration and conservation of cultural heritage objects. *E3S Web of Conferences* [online]. **164** [cit. 2023-03-16]. ISSN 2267-1242. Dostupné z: doi:10.1051/e3sconf/202016402020

9 Seznam příloh

Příloha 1

B Souhrná technická zpráva

Příloha 2

C Situační výkresy

Příloha 3

D Výkresová dokumentace

Příloha 4

Tepelně technické a vlhkostní posouzení

- Homogenní skladba z konopného betonu
- Skladba kombinovaná s foukanou celulózou

Příloha 5

Statické posouzení

- Protokol RFEM – Posouzení nosné konstrukce
- Posouzení nosného prvku interiérové konstrukce – sloup
- Posouzení konstrukčního spoje – varianta 1
- Posouzení konstrukčního spoje – varianta 2
- Posouzení konstrukčního spoje – kotvení nosné konstrukce

Příloha 6

Rozpočet konstrukční části