

asist. Maja Lešnik Nedelko, mag. inž. arh.
maja.lesnik6@um.si



asist. Maja Žigart Verlič, mag. inž. arh.
maja.zigart@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Strokovni članek
UDK/UDC 624.011.1:7.014.11-027.1

MODULARNA LESENA GRADNJA: TRENDI IN RAZVOJ

MODULAR TIMBER CONSTRUCTION: TRENDS AND DEVELOPMENT

Povzetek

Modularna lesena gradnja je hitrorastoči trend v gradbeništvu, ki uporablja prefabricirane module za učinkovito in kakovostno gradnjo. Ta metoda ponuja številne prednosti, med drugim hitrejšo gradnjo, boljši nadzor nad materiali in nižje stroške. Modularna lesena gradnja spodbuja trajnost, saj se pri gradnji zmanjša količina odpadkov in optimizira uporaba materialov. V članku so predstavljeni štirje zgrajeni primeri modularnih lesenih stavb, ki poudarjajo njihovo vsestranskost in primernost za različne projekte po vsem svetu.

Ključne besede: modularna gradnja, lesena gradnja, modul

Summary

Modular timber construction is a fast-growing trend in the building industry, using prefabricated modules for efficient and high-quality construction. This method offers numerous advantages, including shorter construction times, better control over materials, and lower costs. Modular timber construction also promotes sustainability by reducing waste and optimising material use. The article showcases four real-life examples of modular timber buildings, highlighting their versatility and suitability for various projects worldwide.

Key words: modular construction, timber construction, module

1 UVOD

Modularna lesena gradnja je hitrorastoč trend v gradbeni industriji, ki temelji na uporabi prefabriciranih modularnih enot, imenovanih moduli. Moduli so običajno izdelani v kontroliranem okolju v tovarni, nato pa se transportirajo na gradbišče in sestavijo na mestu v končno strukturo. Tak način gradnje prinaša več prednosti, vključno z večjo učinkovitostjo, krajšim časom gradnje in izboljšanim nadzorom kakovosti. Proizvodnja v tovarni lahko zmanjša zamude zaradi slabih vremenskih razmer in omogoča večji nadzor nad uporabo in zaščito gradbenih materialov pred poškodbami. Popolna digitalizacija in avtomatizacija proizvodnje ter lažje preverjanje kakovosti gradnje omogočajo višjo kakovost končnih izdelkov. Gradnja je hitrejša in bolj učinkovita, saj se moduli enostavno povezujejo in nameščajo. Modularna gradnja z zmanjševanjem odpadkov in optimizacijo uporabe materialov omogoča večjo trajnost. Ker so moduli skrbno načrtovani, jih je možno reciklirati ali ponovno uporabiti. Hitrost gradnje ter manjše zahteve glede prostora in opreme na gradbišču zmanjšajo stroške gradnje. Ker je zaradi hitrosti gradnje skupni delovni čas delavcev krajši, so manjši tudi stroški plač in morebitnih nastanitev [Hořínková, 2021].

Pri prenovi, dograditvi ali nadgradnji obstoječih stavb je obstoječe objekte možno uporabljati v času gradnje ali zaradi hitre in predvidljive gradnje optimizirati čas, ko obratovanje obstoječega objekta ni mogoče [Kaufmann, 2018]. Kljub številnim prednostim obstajajo tudi nekatere slabosti modularne gradnje, ki jih velja upoštevati. Ena izmed najpomembnejših je omejitev dimenzij modulov zaradi transporta. Potrebno je zelo natančno načrtovanje sestavnih delov modulov za prefabrikacijo in usklajevanje posameznih gradbenih procesov, predvsem proizvodnje in montaže [Hořínková, 2021].

S svojo vsestranskostjo in učinkovitostjo modularna lesena gradnja spreminja način načrtovanja in izgradnje stavb in postaja vse bolj privlačna za širok spekter projektov po svetu, od

stanovanjskih stavb in poslovnih objektov do šol in vrtcev. Aktualnost modularne gradnje je bila prepoznana na številnih arhitekturnih natečajih, npr. študentski natečaj avstrijskega podjetja pro:Holz in natečaj »Lesena modularna gradnja« slovenske revije Outsider v letu 2023.

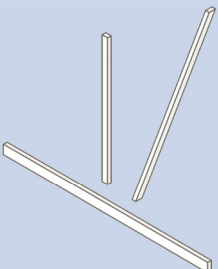
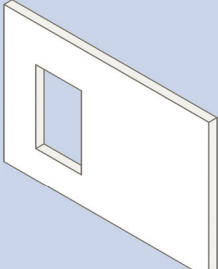
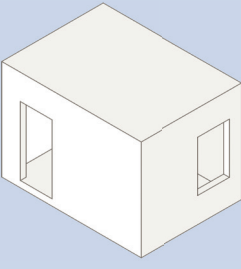
V Sloveniji je najbolj razširjena modularna gradnja z linearnimi in dvodimenzionalnimi, manj pa s tridimenzionalnimi elementi, zato je namen tega članka predstaviti ta način gradnje. V nadaljevanju bomo obravnavali osnovne principe modularne gradnje s poudarkom na tridimenzionalni in leseni modularni gradnji, ki bodo predstavljeni na štirih primerih zgrajenih stavb.

2 MODULARNA GRADNJA

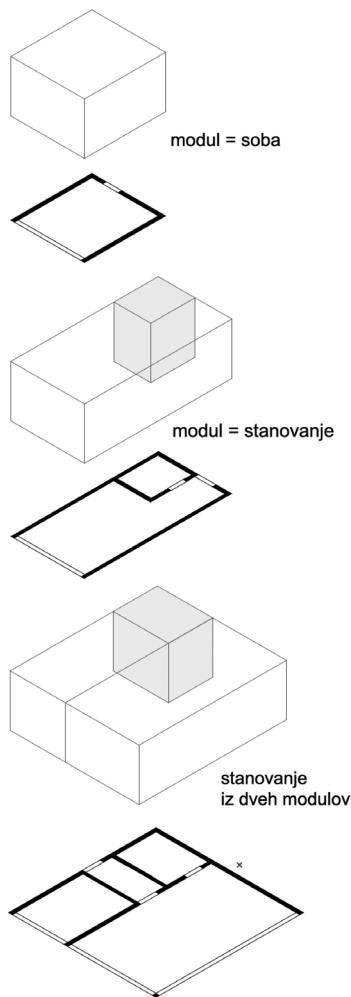
Raven prefabrikacije

Prefabricirani elementi za gradnjo so lahko enostavni linearni elementi, dvodimenzionalni (2D) elementi v obliki prefabriciranih sten, tal ali stropov ter tridimenzionalni (3D) elementi v obliki prefabriciranih modulov. Medtem ko linearni elementi omogočajo več prilagodljivosti in modifikacij na gradbišču in enostavnejši transport, so dvodimenzionalni in tridimenzionalni prefabricirani elementi večinoma pripravljene že v tovarni, zato je čas sestavljanja na gradbišču hitrejši. Modularna gradnja v splošnem vključuje montažo tridimenzionalnih (3D) enot, ki so izdelane v tovarni, nato prevoz in sestavljanje enot v objekt na gradbišču, ter se razlikuje od panelne gradnje, ki vključuje montažo in predizdelavo dvodimenzionalnih (2D) elementov v tovarni [Quale, 2012].

Obstaja tudi možnost kombiniranja različnih ravni prefabrikacije, t. i. hibridni sistem modularne gradnje, ki vključuje tako dvodimenzionalne kot tudi tridimenzionalne elemente. Modularna tridimenzionalna gradnja je namreč najprimernejša za manjše, celovito opremljene enote ali prostore, ki vsebujejo kompleksno opremo, kot so kuhinje, kopalni-

	LINEARNI ELEMENTI	DVODIMENZIONALNI ELEMENTI	TRIDIMENZIONALNI ELEMENTI
			
produkti	stebri, nosilci, diagonale...	tla, stene, stropovi, strehe	moduli
dimenzije	brez omejitev dimenzij, enostavno za transport	veliko možnosti dimenzij	omejitev dimenzij zaradi transporta
oblikovanje	možnost prilagoditev in modifikacij oblik	ponavljanje tipov sten, stropov	ponavljanje modularnih enot
gradnja	večji del izvedbe na gradbišču	krajša izvedba na gradbišču	zelo kratka izvedba na gradbišču

Preglednica 1. Ravni prefabrikacije elementov, povzeto po ([Stora Enso, 2016], [Kaufmann, 2018]).



Slika 1. Strukturne enote modularne gradnje.

ce in osrednja komunikacijska jedra. V nasprotju s tem pa so linearni ali dvodimenzionalni elementi bolj primerni za fleksibilne, odprte prostorske strukture z velikimi razponi [Kaufmann, 2018].

Tridimenzionalna modularna gradnja

Tridimenzionalna modularna gradnja se trenutno uporablja predvsem za tipologije stavb, kjer se ponavljajo osnovni gradniki v objektih, kot so: hoteli, stanovanjske hiše, domovi za ostarele ipd. Gradnja z moduli ni nujno omejena le na ponavljanje enakih vrst modulov, ampak z določenimi prilagoditvami omogoča svobodnejši tloris. Osnovna ideja tega načina gradnje je, da je vsaka posamezna soba prefabricirana strukturna enota (z ali brez t. i. mokrih prostorov) ali pa je posamezna strukturna enota kar celo stanovanje, kot je prikazano na sliki 1. Nadalje je možno z namenom ustvarjanja večjih odprtih prostorov (pisarne, učilnice ipd.) te prefabricirane enote poljubno združevati [Kaufmann, 2018].

Konstruktivski sistemi in materiali

Pri modularni gradnji je v uporabi vrsta različnih konstrukcijskih sistemov in materialov, med katerimi so najpogostejši

jeklo, les in betonski prefabrikati. Vsak izmed njih ima svoje prednosti in specifične pri uporabi. Les je naraven, trajnosten, biorazgradljiv material, ki je relativno enostaven za predelavo ali ponovno uporabo. Jeklo je znano po svoji uporabnosti in trajnosti v razmerju med trdnostjo in težo. V nasprotju z lesom in jeklom se betonski prefabrikati na splošno uporabljajo do stopnje panelne prefabrikacije [Boafo, 2016].

Mogoča je tudi kombinacija različnih konstrukcijskih sistemov in materialov, na primer lesenih konstrukcij, ojačanih z jeklom ali betonom. Takšne rešitve so že na voljo v obliki hibridnih konstrukcijskih elementov, npr. kompozitne leseno-betonske plošče/stropi [Kaufmann, 2018].

Les – trajnostna izbira za modularno gradnjo

Za doseganje trajnostnega grajenega okolja in zmanjševanja ogljičnega odtisa novozgrajenih stavb v zadnjih letih narašča popularnost gradnje z lesom. Les je idealen material za montažno in modularno gradnjo zaradi možnosti strojne obdelave, ki omogoča učinkovito predizrezovanje in rezkanje različnih elementov izven gradbišča, ter zaradi majhne teže, kar olajša prevoz in vgradnjo [Bhandari, 2023]. Iz teh razlogov se v modularni leseni gradnji pogosto uporabljajo lesene okvirnapanelne in skeletne konstrukcije, v zadnjih letih pa postaja vedno bolj priljubljena modularna gradnja iz križno lepljenega lesa (CLT, angl. cross-laminated timber).

3 PRIMERI IZ PRAKSE

Z namenom prikaza in primerjave pojavnosti tridimenzionalne modularne lesene arhitekture v praksi so bili izbrani štirje primeri stavb, ki so zgrajeni v lesenih modularnih sistemih, različnih tipologij in namembnosti (stanovanjske stavbe, stavbe mešane rabe, izobraževalne stavbe, študentski domovi).

3.1 Večstanovanjski objekt Puukuokka

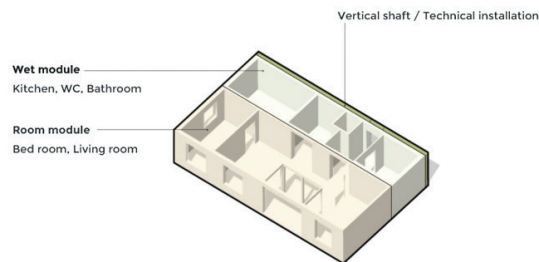
OOPEAA, Jyväskylä, 2018



Slika 2. Večstanovanjski objekti Puukuokka. Fotograf: Mikko Auerniitty [OOPEAA, 2021].



Typical floor plan



Modular elements

Slika 3. Večstanovanjski objekt Puukuokka. Tipična etaža (levo) in prikaz modulov (desno) [OOPEAA, 2021].

Puukuoka One, ki je bila končana leta 2015, je prva osemnadstropna lesena stanovanjska stavba na Finskem. Stanovanjski kompleks Puukuokka, ki je bil v celoti dokončan leta 2018, sicer sestavljajo tri od 6- do 8-nadstropne stavbe, ki ponujajo 150 stanovanj s skupno tlorisno površino približno 10.000 m². Želeli so zasnovati stavbo, ki združuje občutek topline in zasebnosti enodružinske hiše s poljavnim značajem skupnih prostorov, ter izkoristiti tehnične in estetske lastnosti CLT-ja z izrazitim lastnim arhitekturnim izrazom. Puukuokka je služila kot pilotni primer za razvoj in testiranje sistema tridimenzionalni modulov iz CLT-ja. Uporaba modulov je skrajšala čas na gradbišču za šest mesecev. Izboljšala pa se je tudi kakovost končne gradnje, saj so zmanjšali izpostavljenost materialov vremenskim razmeram [OOPEAA, 2021].

Vsako stanovanje je sestavljeno iz dveh modulov, v enem, t. i. mokrem modulu so predprostor, kuhinja in kopalnica, v drugem pa dnevna soba, spalnica in balkon. Moduli se zlagajo tako, da je prvi modul lociran ob komunikaciji, drugi modul pa ob fasadi. Fasada objekta je prav tako prefabricirana, ampak dodana na gradbišču.

3.2 Večstanovanjski objekt Juf Nienke

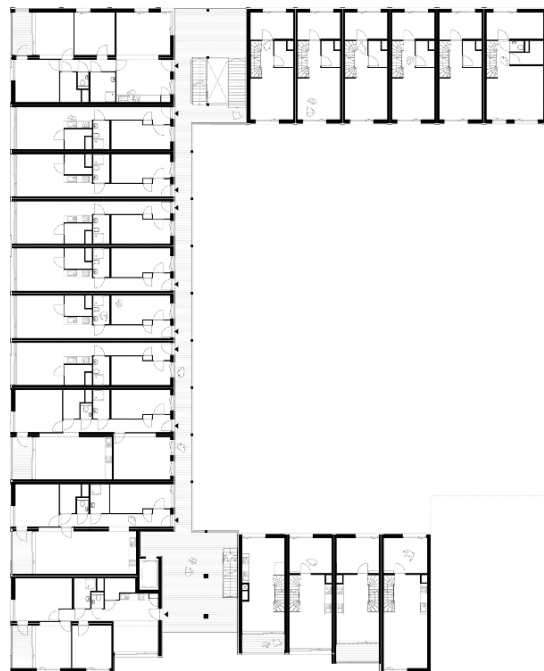
SeARCH, Amsterdam, 2022

Večstanovanjski objekt Juf Nienke, zgrajen leta 2022 v Amsterdamu, vključuje 61 stanovanj, sestavljenih iz lesenih modulov. Zaradi pomanjkanja cenovno dostopnih stanovanj v Amsterdamu je bilo 31 stanovanj zgrajenih za učitelje in druge javne uslužbenke, polovica stanovanj pa je namenjenih družinam. 15 metrov visoka lesena konstrukcija leži na betonski osnovi, kjer se nahajata polvkopana parkirna hiša in dvovišinsko pritličje s trgovinami, kavarno, delovnimi prostori in ateljeji [SeARCH, 2023]. Cilj mesta Amsterdam je, da bo od leta 2025 dalje petina novih stavb zgrajenih iz lesa, zato so bila tudi za gradnjo na območju Centrumeiland predpisana stroga pravila. Zaradi modularnosti objekta je bila zmanjšana količina odpadkov in čas gradnje, po potrebi pa je mogoče objekt razširiti. Objekt je bil načrtovan tako, da omogoča reciklažo, saj so vsi moduli takšni, da jih je mogoče razstaviti in ponovno uporabiti [Elmer, 2022]. Vsi leseni moduli so standardne širine 4 metrov in raz-

ličnih globin. Manjša stanovanja so sestavljena iz enega modula, večja pa sestavljajo horizontalno ali vertikalno povezani moduli.



Slika 4. Večstanovanjski objekt Juf Nienke [SeARCH, 2023].



Slika 5. Juf Nienke; sestavljanje modulov (levo) in tloris tipične etaže (desno) [SEARCH, 2023].

3.3 Šola Züri-Modular

Bauart Architekten, Zurich, 2012–2020

dulov) in dodatnih delov, kot so temelji, streha in stopnice. Zaradi demografskih sprememb je bilo do leta 2020 tudi dejansko preseljenih 13 stavb ter nadzidanih 8 v osnovi dvonadstropnih stavb.

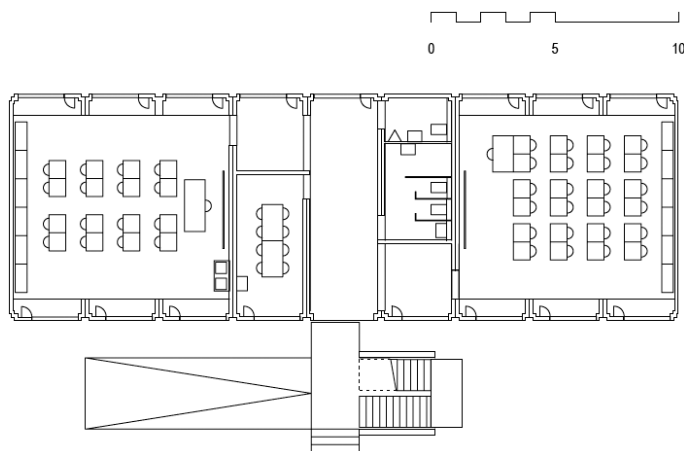


Slika 6. Züri-Modular; sestavljanje modulov (levo) in paviljon prve generacije (desno) [Rinke, 2020].

V mestu Zürich se je potreba po šolskih prostorih od konca devetdesetih let prejšnjega stoletja nenehno povečevala. Šolski paviljon Züri-Modular je nastal leta 1998 kot nadaljnji razvoj modularnega šolskega paviljona predhodno razvitega za mesto Thun. V osnovi je bilo leta 1998 postavljenih 5 šolskih paviljonov, vendar so jih do leta 2020 skupno postavili kar 76, v bližnji prihodnosti pa je predvidena tudi postavitve dodatnih paviljonov.

V osnovi so moduli načrtovani za večkratno uporabo, temu pa je prilagojena tudi zasnova. Modularni sistem lesene gradnje je sestavljen iz standardiziranih elementov (tridimenzionalni mo-

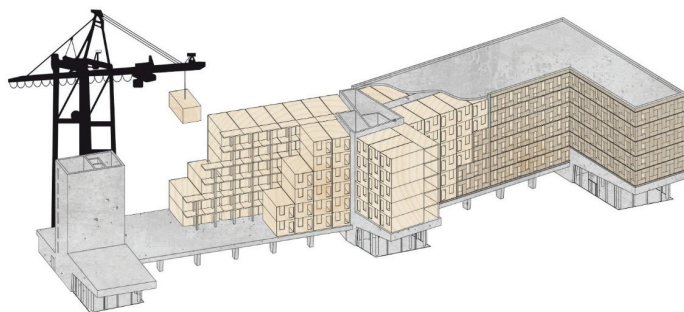
trinadstropni modularni paviljon ponuja približno 500 m² uporabne površine. Osnovna zasnova je sestavljena iz dveh učilnic v vsakem nadstropju, ki sestojita iz treh tridimenzionalnih modulov. Učilnici sta med seboj povezani z osrednjim prostorom z garderobo, sanitarijami in prostorom za skupine. Vsak izmed teh prostorov se nahaja v enem tridimenzionalnem modulu. Vertikalna komunikacija je zagotovljena preko zunanega stopnišča. Učilnice so osvetljene z obeh strani in so tako v veliki meri neodvisne od pogojev lokacije [Rinke, 2020].



Slika 7. Züri-Modular; tloris tipičnega nadstropja [Rinke, 2020].

3.4 Študentski dom Woodie

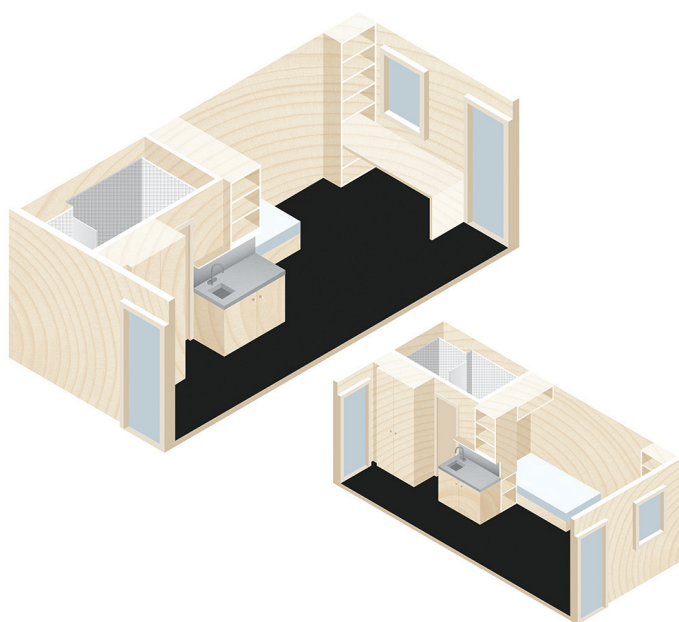
Sauerbruch Hutton, Hamburg, 2017



Slika 8. Woodie; fasada (zgoraj) in shematski prikaz sestavljanja modulov (spodaj) [JLL, 2023].

Trenutno največja stanovanjska stavba na svetu iz tridimenzionalne modularne lesene konstrukcije Woodie, zgrajena leta 2017, ponuja mikrostanovanja za 371 študentov. Stavba je del nove stanovanjske soseske na območju Wilhelmsburga v Hamburgu, ki temelji na eksperimentalnem značaju mednarodne gradbene razstave iz leta 2013 in uteleša načela univerzalnega oblikovanja: trajnostno, preprosto in vključujoče. Struktura pritličja in trije vertikalni servisni sklopi so izdelani iz konvencionalnega armiranega betona, na katero je postavljenih 371 stanovanjskih tridimenzionalni modulov, 5 oziroma 6 nadstropij visoko [Archdaily, 2020].

Posebna pozornost pri gradnji je bila namenjena zahtevam požarne varnosti. Za leseno gradnjo je bila gradnja študentskega doma pomemben korak, saj velja za precedens za stavbe 4. in 5. gradbenega razreda v leseni gradnji, ki so bile od takrat odobrene v Hamburgu. Potrebne so bile na primer kovinske okenske odprtine, ki so izvlčene 5 do 8 cm od fasade, ali kovinske pločevine, ki potekajo vodoravno, da bi preprečile širjenje požara in so opazovalcu jasno vidne [Greve, 2018].



Slika 9. Woodie; zasnova tipičnega modula [Prefabium, 2023].

4 PRIMERJAVA PROJEKTOV

V spodnji tabeli je prikazana primerjava predstavljenih projektov z vidika dimenzij in prostorske organizacije modulov, osnovne konstrukcije modulov, podstavka in jedra ter stopnje prefabrikacije.

Iz primerjave prikazanih primerov lahko razberemo, da se uporabljajo tridimenzionalni moduli manjših dimenzij, ki so večinoma prilagojene omejitvam zaradi transporta. Pri tem je zaznati ponavljanje in združevanje enakih tipov modulov v bivalne ali druge enote. Konstrukcijo stavbe običajno sestavljajo armiranobetonski podstavki (ali temelji) in vertikal-

Projekt	Večstanovanjski objekt Puukuokka	Večstanovanjski objekt Juf Nienke	Šola Züri-Modular	Študentski dom Woodie
Dimenzije modula	različnih širin ter globine 3,5 m in 2,5 m	standardne širine 4 m in različnih globin	približno 3 m širine in 10 m globine	približno 3,3 m širine in 7 m globine
Prostorska organizacija modulov	dva modula sestavljata bivalno enoto	modul ali več modulov sestavljajo eno bivalno enoto	modul je ločena funkcijska enota (sanitarije, garderobe), trije moduli skupaj sestavljajo učilnico	modul sestavlja študentsko bivalno enoto
Konstruktivni sistem	CLT-moduli armiranobetonsko pritličje stopnice, hodniki, balkoni in streha iz CLT	skeletna lesena konstrukcija modulov v kombinaciji s CLT-jem delno vkopan armiranobetonski podstavek (garažna hiša)	leseni moduli (nosilne stene iz lesenega okvirja z mavčnimi ploščami) betonski točkovni temelji	CLT-moduli armiranobetonsko pritličje tri vertikalna armiranobetonska jedra
Stopnja prefabrikacije	Visoka v tovarni izdelani 3D-moduli na gradbišču zgrajeno centralno jedro (cevi za ogrevanje, vodo in električno za stanovanjske enote nameščene v stenah hodnika) fasadna obloga je vgrajena na gradbišču	Visoka v tovarni izdelani 3D-moduli na gradbišču zgrajen podzemni betonski podstavek	Visoka v tovarni izdelani 3D-moduli (električne in sanitarne napeljave, stropne in stenske obloge, okna, vrata, radiatorji in žaluzije ali senčila ter fasadne obloge) na gradbišču postavljeno montažno stopnišče na gradbišču pripravljeni točkovni temelji	Visoka (80 %) v tovarni izdelani popolnoma zaprti 3D-moduli (vključno s kopalnico, kuhinjo, pohištvo in napeljavo) na gradbišču zgrajena centralna jedra in pritlični betonski podstavek fasadna obloga je vgrajena na gradbišču

Preglednica 2. Primerjava zgrajenih projektov.

na jedra, na in okrog katerih so nanizani moduli. Pri uporabi konstrukcijskih materialov za module prednjači CLT v kombinaciji z drugimi lesenimi konstrukcijskimi sistemi (leseni skeletni, okvirno panelni ipd.). Stopnja prefabrikacije je na splošno visoka in je odraz izbranih konstrukcijskih sistemov; armiranobetonski temelji, podstavki in jedra so v celoti izdelani na gradbišču, moduli pa so v večjem delu izdelani v tovarnah in pripeljeni na gradbišče. Na gradbišču se poleg montaže modulov v večini primerov izvede tudi montaža nekaterih zaključnih slojev (predvsem fasad in talnih oblog), priklop inštalacij ipd.

5 SKLEP

Predstavljeni primeri modularnih lesenih stavb dokazujejo njihovo vsestranskost in primernost za različne projekte po vsem svetu, od stanovanjskih stavb in objektov z mešano rabo do izobraževalnih objektov in študentskih domov. S stalnim razvojem tehnologij in načrtovanjem objektov z večjo učinkovitostjo in trajnostjo ter vse večjo priljubljenostjo po svetu je prihodnost modularne lesene gradnje zagotovo obetavna.

6 LITERATURA

ArchDaily, Universal Design Quarter in Hamburg / Sauerbruch Hutton, spletna stran ArchDaily: <https://www.archdaily.com/944258/universal-design-quarter-in-hamburg-sauerbruch-hutton>, 2020.

Bhandari, S., Riggio M., Jahedi S., Fischer E. C., Muszynski L., Luo Z., A review of modular cross laminated timber construction: Implications for temporary housing in seismic areas. *Journal of Building Engineering*, 63, p. 105485, 2013.

Boafo, F. E., Kim, J. H., Kim, J. T., Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways, *Sustainability*, 8(6), p. 558, 2016.

Elmer, M., Neuer Leuchtturm am IJsselmeer, *Modulart*, 18. november 2022, dostopno na: <https://www.modulart.ch/neuer-leuchtturm-am-ijsselmeer/>, 2022.

Greve, N., Studentenwohnheim WOODIE, Hamburg, *Deutsche BauZeitschrift*, spletna stran revije DBZ - https://www.dbz.de/artikel/dbz_Studentenwohnheim_WOODIE_Hamburg-3172596.html, Deutsche BauZeitschrift, Berlin, 2018.

Hořínková, D., Advantages and Disadvantages of Modular Construction, Including Environmental Impacts, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1203(3), 032002, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/3/032002>, 2021.

JLL, WOODIE Hamburg, spletna stran JLL - <https://www.jll.de/en/client-stories/woodie-hamburg-a-unique-architectural-gem-with-exceptional-returns>, Jones Lang LaSalle (JLL), Chicago, 2023.

Kaufmann, H., Krötsch, S., Winter, S., Manual of Multi-storey Timber Construction, Detail, 142-149, 2018.

OOPEAA, Puukuokka Housing Block, spletna stran OOPEAA - <https://oopeaa.com/portfolio/puukuokka-housing-block>, OOPEAA arhitekti, Seinäjoki, 2021.

Prefabium, Woodie Student Dormitory, spletna stran Prefabium - Modern Prefab Modular Homes: <https://blog.prefabium.com/2018/12/woodie-student-dormitory-timber-prefab.html>, 2023.

Quale, J., Eckelman, M. J., Williams, K. W., Sloditskie G., Zimmerman J. B., Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States, Journal of Industrial Ecology, 16(2), 243-253, 2012.

Rinke, M., Krammer, M., Architektur fertigen. Konstruktiver Holzelementbau, Triest Verlag, Zürich, 148-149, 2020.

SeARCH, spletna stran SeARCH - <https://www.search.nl/works/juf-nienke/>, SeARCH arhitekti, Amsterdam, 2023.

Stora Enso, Building Systems by Stora Enso, 3-8 Storey Modular Element Buildings, spletna stran Stora Enso: <https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/Design-Manual-A4-Modular-element-buildings20161227final-version-40EN.pdf>, 2016.