

DAVOR KAUČIČ

RAZVOJ POSTOPKOV ZA PROJEKTIRANJE Z IQWOOD LESENIMI PANELI

MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2023

Hrbtna stran: DAVOR KAUČIČ

2023



Kandidat/-ka: DAVOR KAUČIČ

RAZVOJ POSTOPKOV ZA PROJEKTIRANJE Z IQWOOD LESENIMI PANELI

Magistrsko delo št.:

DEVELOPMENT OF PROCEDURES FOR DESIGNING WITH IQWOOD TIMBER PANELS

Master thesis No.:

Mentor/-ica: prof. dr. Boštjan Brank

Somentor/-ica: dr. Jurij Jančar

Član komisije:

Predsednik komisije:

Ljubljana, 2023

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

ZAHVALA

Za pomoč in nasvete pri nastajanju magistrske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Boštjanu Branku.

Zahvalil bi se tudi podjetju CBD d.o.o. in vsem zaposlenim, ki so mi s svojim znanjem in izkušnjami pomagali tako pri študiju kot pri izdelavi te magistrske naloge.

Posebno bi se zahvalil še somentorju dr. Juriju Jančarju za usmerjanje, nasvete in pomoč pri izdelavi te naloge. Prav tako pa bi se mu zahvalil za odlično mentorstvo v okviru opravljanja študentskega dela v podjetju CBD d.o.o.

Zahvalil bi se tudi podjetju iQwood d.o.o., ki je omogočilo to magistrsko delo z deljenjem raziskav, ki so jih opravili na proizvodu iQwood in deljenjem podatkov o izdelavi in uporabljenih materialih pri izdelavi njihovega proizvoda.

Iz srca se zahvaljujem moji družini, še posebej tebi Kim, ki mi stojiš ob strani tako ob lepih kot težkih trenutkih in me podpiraš pri vseh mojih podvigih

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.6:624.011.1(043.3)						
Avtor:	Davor Kaučič, dipl. inž. grad. (UN)						
Mentor:	prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.						
Somentor:	dr. Jurij Jančar, univ. dipl. inž. grad.						
Naslov:	Razvoj postopkov za projektiranje z iQwood lesenimi paneli						
Tip dokumenta:	Magistrsko delo						
Obseg in oprema:	96 str., 14 pregl., 70 sl., 21 graf., 59 en., 26 vir.						
Ključne besede:	lesena gradnja, iQwood, križno mozničen les, lesene stene, numerično						
	modeliranje, SAP2000						

Izvleček

Za projektiranje objektov, iz križno mozničenih lesenih plošč, kot so iQwood elementi, obstaja v strokovni literaturi malo navodil, priporočil in postopkov. Zato smo v okviru te naloge pripravili postopke za izračun nosilnosti iQwood elementov pri obremenitvah v ravnini plošče in pri obremenitvah pravokotno na ravnino plošče. Računski postopki temeljijo na smernicah, ki jih za projektiranje lesenih konstrukcij podaja standard SIST EN 1995-1-1: 2005 [1]. Pomagali smo si z rezultati strižnih, uklonskih in upogibnih eksperimentalnih preiskav iQwood elementov izvedenih na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Za boljše razumevanje obnašanja in prenosa sil po iQwood elementih smo pripravili tudi nelinearni numerični model, pri čemer smo uporabili program SAP2000 [2]. Na podlagi eksperimentalnih in numeričnih rezultatov smo ovrednotili ustreznost predstavljenih računskih postopkov.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	519.6:624.011.1(043.3)					
Author:	Davor Kaučič, B. Sc.					
Supervisor:	prof. Boštjan Brank, Ph. D.					
Co-supervisor:	Jurij Jančar, Ph. D.					
Title:	Development of procedures for designing with iQwood timber panels					
Document type:	Master Thesis					
Notes:	96 p., 14 tab., 70 fig., 21 graph., 59 eq., 26 ref.					
Keywords:	massive timber construction, iQwood, doweld cross laminated timber, timber					
	walls, numerical modeling, SAP2000					

Abstract

For the design of structures using adhesive-free cross-laminated timber panels with dowels, such as iQwood elements, there is a lack of guidance and recommendations in the professional literature. Therefore, we have developed procedures for calculating the load-bearing capacity of iQwood elements under in-plane as well as out-of-plane loadings. The procedures are based on guidelines provided by the standard SIST EN 1995-1-1: 2005 [1] for the design of timber structures. We have also relied on the results of shear, bending, and buckling experimental tests conducted on iQwood elements at the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute. To better understand the behaviour and load transfer through iQwood elements, we have prepared a nonlinear numerical model using SAP2000 [2] software. Based on the experimental and numerical results, we have assessed adequacy of the presented procedures.

KAZALO VSEBINE

POI	PRAVKI – ERRATA	I
ZAI	HVALA	II
BIB	BLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIB	BLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAŻ	ZALO SLIK	VI
KAŻ	ZALO PREGLEDNIC	IX
KAŻ	ZALO GRAFIKONOV	X
OK	RAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS	XI
1	UVOD	1
11	Splošno o Jesu	1
1.1	Spiosilo o resultational Kai ja jOwood	····· 1 2
1.2	Primerjava s standardnimi križno lepljenimi ploščami ter podobnimi proizvodi	6
2	EKSPERIMENTALNE PREISKAVE OBNAŠANJA IQWOOD ELEMENTOV	10
2.1	Uklonske preiskave	10
2.2	Strižne preiskave	15
2.3	Upogibne preiskave	23
2.4	Povzetek rezultatov preiskav	26
3	NUMERIČNA ANALIZA	27
3.1	Priprava numeričnega modela	27
3.2	Rezultati računske analize elementov	35
4	POSTOPKI ZA PROJEKTIRANJE IQWOOD ELEMENTOV	52
4.1	Predpostavke	52
4.2	Materialne karakteristike preizkušancev	53
4.3	Geometrijske karakteristike	54
4.4	Obremenitve v ravnini elementa	57
4.5	Obremenitve pravokotno na ravnino elementa	69
5	PRIMERJAVA REZULTATOV RAZLIČNIH ANALIZ	75
6	PRIPOROČILA ZA PROJEKTIRANJE	78
7	ZAKLJUČEK	81
VIR	RI (IEEE)	83

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz tri slojne iQwood stene debeline 9 cm
Slika 2: Vgradnja moznika in delovanje sil zaradi nabrekanja [4]
Slika 3: Prikaz proizvodne linije iQwood elementov
Slika 4: Prikaz delovanja stroja za izdelavo lukenj in vtisk moznikov4
Slika 5: Prikaz vzorcev mozničenja iQwood elementov tipa A, B, C in D 5
Slika 6: Prikaz vzorca mozničenja iQwood elementa tipa E5
Slika 7: Prikaz oblike in dimenzije tipičnega moznika iQwood elementov [5]
Slika 8: X – Lam elementi [6]7
Slika 9: Prerez MHM stenskega elementa [7]7
Slika 10: Thoma Holz100, zunanji zid 25 cm [8]
Slika 11: Levi del slike prikazuje pozicije merilnikov, na desnem pa je prikazan preizkušanec med
tlačnim testom [11]11
Slika 12: Določitev strižne togosti po metodi analogije strižnih napetosti [15]12
Slika 13: Tipična uklonska porušitev iQwood elementa [11]14
Slika 14: Preizkus trdnosti in togosti v skladu s standardom EN 594 [16]
Slika 15: Ciklični preizkus strižne trdnosti v ravnini skladno s standardom ISO 16670:2003 [16] 15
Slika 16: Prikaz vpetja preizkušancev brez diagonalnih slojev (tip A, D, E) [13] 16
Slika 17: Prikaz vpetja preizkušancev z diagonalnimi sloji (tip B in C) [13]
Slika 18: Na levi je prikazana pozicija merilnikov in vnosa sile, na desni pa preizkušanec pri strižnem
testu [13]17
Slika 19: Prikaz rotacije vertikalno usmerjenih lamel20
Slika 20: Prikaz zdrsa horizontalno usmerjenih lamel
Slika 21: Primer moznikov na stiku med posameznimi lamelami v isti ravnini
Slika 22: Element tipa A90 pri ciljnem horizontalnem pomiku 100 mm [12]
Slika 23: Prikaz rezultatov cikličnega testa preizkušanca tipa A90
Slika 24: Prikaz rezultatov cikličnega testa preizkušanca tipa C9022
Slika 25: Razporeditev podpor in obremenitev v prvi in tretji fazi testiranja23
Slika 26: Razporeditev podpor in obremenitev v drugi fazi testiranja
Slika 27: Preizkušanec med obremenjevanjem pri tretji fazi
Slika 28: Prikaz razdružitve slojev iQwood elementa in zdrsa moznika nad krajno podporo25
Slika 29: Na levi je prikazan model z vertikalno in horizontalno usmerjenimi sloji na desni pa model z
vertikalno in diagonalno usmerjenimi sloji
Slika 30: Na levi so prikazane vertikalne lamele na sredini horizontalne lamele, na desni pa 4-vozliščni
končni element

Slika 31: Na levi so prikazane diagonalno usmerjene lamele, na desni pa 8 – vozliščni končni element.
Slika 32: Definirnje ploskovnih elementov posameznih slojev iQwood elementov v programu SAP2000.
Slika 33: Definiranje linijskih členkov v programu SAP2000
Slika 34: Grafični prikaz sil in momentov na rob lamele (za definicijo členka na robu levega KE) 30
Slika 35: Grafični prikaz deformacije vzmetnega elementa in količin uporabljenih v enačbah [17] 31
Slika 36: Definiranje povezave (vzmetnega elementa) v programu SAP2000 [2]
Slika 37: Shema sidranja lamel pri strižnem modelu na spodnjem robu iQwood elementa
Slika 38: Definicija uklonskega obtežnega primera v programu SAP2000 [2]
Slika 39: Deformacije (v milimetrih) iQwood elementa modeliranega z neenakomerno gosto mrežo
končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN
Slika 40: Deformacije (v milimetrih) iQwood elementa modeliranega z enakomerno gosto mrežo
končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN
Slika 41: Horizontalne normalne napetosti S11 v N/mm za horizontalno usmerjen sloj lamel pri modelu
z neenakomerno gosto mrežo končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN
Slika 42: Horizontalne normalne napetosti S11 v N/mm za horizontalno usmerjen sloj lamel pri modelu
z enakomerno gosto mrežo končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN
Slika 43: Na levi prikazuje tipične deformacije numeričnega modela medtem ko desna slika prikazuje
tipične strižne deformacije eksperimentalnih preiskav 40
Slika 44: Prikaz zamika horizontalnih lamel pri numeričnih in eksperimentalnih preiskavah
Slika 45: Prikaz zasuka vertikalno usmerjenih lamel eksperimentalnih in numeričnih preiskav 41
Slika 46: Prikaz normalnih napetosti S11 vertikalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo
130 kN
Slika 47: Prikaz normalnih napetosti S22 vertikalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo
130 kN
Slika 48:Prikaz strižnih napetosti S12 vertikalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 130
kN
Slika 49: Prikaz normalnih napetosti S11 horizontalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo
130 kN
Slika 50: Prikaz vertikalnih normalnih napetosti S22 horizontalno usmerjenega sloja v N/mm pri
obremenitvi s silo 130 kN
Slika 51: Prikaz strižnih napetosti S12 horizontalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo
Slika 52: Prikaz normalnih napetosti S11 diagonalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 250 kN
Slika 53: Prikaz napetosti S22 diagonalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 250 kN. 45

Slika 54: Prikaz strižnih napetosti S12 diagonalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 46
Slika 55: Prikaz deformacij iQwood panela tipa A pri enaki horizontalni obremenitvi 80 kN in različni
dolžini47
Slika 56: Primerjava računskih (levo) in eksperimentalnih (desno) uklonskih oblik
Slika 57: Model obremenjevanja upogibnega numeričnega modela iQwood elementa
Slika 58: Deformacije (v milimetrih) iQwood panela tipa E 210 pri vsiljenem pomiku 16 mm 51
Slika 59: Deformacije (v milimetrih) iQwood panela tipa E 150 pri vsiljenem pomiku 16 mm 51
Slika 60: Grafični prikaz 3, 4 in 5 slojnega prereza
Slika 61: Primer obremenitve stenskega elementa v svoji ravnini
Slika 62: Slika (a) prikazuje odziv na torzijsko obremenitev pri lepljenem stiku, slika (b) pa pri
mozničenem stiku
Slika 63: Prikaz možnih porušitev moznika61
Slika 64: Prikaz prenosa horizontalnih obremenitev iQwood stene
Slika 65: Prikaz strižne deformacije stene [18]65
Slika 66: Prikaz upogibne deformacije stene [18]65
Slika 67: Primer obremenitve medetažnega elementa pravokotno na njegovo ravnino
Slika 68: Vpliv obtežbe na napetosti v mozniku [19]70
Slika 69: Priporočljive vrednosti in razmerje med koeficientoma a in b [1]73
Slika 70: Primer kotnikov z vijaki proizvajalca Rothoblaas [20]

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razvrstitev iQwood elementov
Preglednica 2: Primerjava lesenih masivnih konstrukcijskih elementov
Preglednica 3: Prikaz leta preiskave in vrste ter dimenzije preizkušancev izpostavljenih vertikalni
obremenitvi
Preglednica 4: Vrednosti upogibne in strižne togosti s pripadajočimi uklonskimi dolžinami
Preglednica 5: Izračunani faktorji podpore za posamezen tip iQwood elementa 12
Preglednica 6: Prikaz leta preiskave in vrste ter dimenzije preizkušancev izpostavljenih horizontalni
obremenitvi
Preglednica 7: Rezultati strižnih preiskav
Preglednica 8: Rezultati posamezne faze upogibnih preiskav
Preglednica 9: Število moznikov v strižnih ravninah posameznega elementa
Preglednica 10: Geometrijske karakteristike iQwood elementov dimenzije 150/280 cm
Preglednica 11: Izračun uklonske nosilnosti iQwood elementov dimenzije 150/280 cm
Preglednica 12: Karakteristična bočna nosilnost moznika pri različnih porušitvah
Preglednica 13: Izračun strižne nosilnosti iQwood elementov dimenzije 240/270 cm
Preglednica 14: Prikazuje silo, ki je potrebna za dosego pomika L/500 in delež strižne in upogibne
deformacije

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Rezultati uklonskih preiskav elementov in primerjava le teh z korigiranimi vrednostmi 13
Grafikon 2: Primerjava povprečnih deformacij različnih iQwood elementov pri statičnih strižnih testih.
Grafikon 3: Prikaz deformacij iQwood elementov pri različnih testiranja
Grafikon 4: Nelinearne strižne karakteristike povezave (vzmetnega elementa)
Grafikon 5: Primerjava deformacij enakomerno in neenakomerno goste mreže končnih elementov36
Grafikon 6: Karakteristike povezave za primere različnih vhodnih podatkov
Grafikon 7: Primerjava deformacij analize iQwood elementa tipa A90 z različnimi vhodnimi podatki.
Grafikon 8: Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov strižnih deformacij različnih tipov
iQwood elementov
Grafikon 9: Primerjava numerične in eksperimentalne kritične uklonske sile
Grafikon 10: Primerjava pomikov iQwood elementov pri upogibni obremenitvi
Grafikon 11: Prikaz velikosti strižnih in upogibnih deformacij iQwood elementov različnih dolžin67
Grafikon 12: Primerjava maksimalne sile glede na kontrolo nosilnosti in sile potrebno za dosego pomika
L/500, iQwood elementa dimenzije 240/270 cm
Grafikon 13: Prikaz normalnih napetosti, v pet slojnem iQwood elementu
Grafikon 14: Prikaz strižnih napetosti, v pet slojnem iQwood elementu
Grafikon 15: Primerjava maksimalnega razpona iQwood elementov pri upoštevanju kontrole pomikov
in vibracij74
Grafikon 16: Primerjava rezultatov kritičnih uklonskih sil pri različnih analizah
Grafikon 17: Primerjava horizontalnih pomikov iQwood elementov pri različnih analizah76
Grafikon 18: Primerjava vertikalnih pomikov iQwood elementov pri različnih analizah77
Grafikon 19: Kritične uklonske nosilnosti različnih tipov iQwood elementov
Grafikon 20: Strižna nosilnost iQwood sten višine 2,8 m pri omejitvi pomikov z L/50078
Grafikon 21: Maksimalni razpon prostoležečega elementa širine 1 m pri kombinaciji stalne in koristne
obtežbe

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

F _{krit}	Critical buckling capacity – kritična uklonska nosilnost
E _{0,mean}	Elastic modulus in direction of fibres – elastični modul v smeri vlaken
E90,mean	Elastic modulus perpendicular to fibres – elastični modul pravokotno na vlakna
G _{mean}	Shear modulus – strižni modul
γi	Stiffness coefficient of the connected plane - koeficient togosti priključene ravnine
$I_{y,ef}$	Effective moment of inertia – efektivni vztrajnostni moment
I_y	Moment of inertia – vztrajnostni moment
K_i	Stiffness of the connecting medium – togost veznega sredstva
$F_{v,Rk}$	Characteristic lateral load – bearing capacity – karakteristična bočna nosilnost
σ_{md}	Bending stress – upogibna napetost

1 UVOD

Uporaba moznikov za združevanje lesenih elementov je že stoletja poznana tehnologija, vendar sta jo razvoj in industrijska izdelava kovinskih veznih sredstev popolnoma zasenčila. Tako so se od konca 18. stoletja pa vse do konca 20. stoletja za spajanje lesenih elementov večinoma uporabljala kovinska vezna sredstva. Uporaba lesenih veznih elementov je ponovno zaživela v sedemdesetih letih dvajsetega stoletja, s pričetkom raziskav na tem področju. Plod teh raziskav je tudi produkt, imenovan mozničen les (DLT – dowel laminated timber). Tega razdelimo na različne tipe, glede na orientacijo lamel in smer obtežbe:

- DLT nosilec ali plošča, katerih lamele so sestavljene paralelno,
- križno mozničeni leseni elementi (DCLT doweld cross laminated timber), kjer so lamele križno sestavljene po slojih.

Ta naloga obravnava iQwood elemente, ki spadajo pod kategorijo križno mozničenega lesa - DCLT.

Z vedno večjo popularnostjo trajnostne gradnje in zavedanjem ljudi o boljši bivanjski kvaliteti lesenih hiš, povpraševanje po objektih zgrajenih iz križno mozničenih elementov narašča. Za projektiranje objektov iz omenjenih elementov moramo poznati obnašanje in nosilnost posameznega konstrukcijskega elementa pri različnih obremenitvah. To pomeni, da če želimo iQwood uporabljati kot stenske in stropne konstrukcijske elemente, moramo poznati tako togost kot mehanske in geometrijske karakteristike teh elementov. Ker je sistem križno mozničenih elementov relativno nov, obstaja le malo raziskav in literature, ki to obravnavajo. Opravljene raziskave in literatura se v večini primerov nanašajo na področja Avstrije in Nemčije, kjer praktično ni potresne nevarnosti. Ker je iQwood slovenski sistem križnega mozničenja lesa in je namenjen uporabi tako v Sloveniji kot drugod, tudi na potresno nevarnih območjih, se projektanti srečujejo s problemi, kako projektirati potresno odporne objekte iz iQwood elementov.

S ciljem boljšega razumevanja prenosa obremenitev pri križno mozničenih elementih in enostavnega projektiranja, so bili v okviru te naloge razviti postopki za projektiranje z iQwood lesenimi paneli. Temeljijo na eksperimentalnih preiskavah izvedenih na Zavodu za gradbeništvo Slovenije in numeričnih analizah izvedenih s programom za izračun konstrukcij po metodi končnih elementov SAP2000 [2]. Izvedene analize zajemajo obnašanje različnih iQwood sistemov, pri obremenitvah v ravnini elementa in obremenitvah pravokotno na ravnino elementa. Tako smo lahko na podlagi primerjave različnih analiz z rezultati računskih postopkov, potrdili ustreznost le-teh.

1.1 Splošno o lesu

Les je eden najstarejših in najbolj razširjenih naravnih materialov, ki ga človeštvo uporablja že tisočletja in sodi med najbolj trajnostne materiale. Zaradi svojih fizikalnih, mehanskih in estetskih lastnosti je vsestransko uporaben material. Ena izmed glavnih lastnosti lesa je anizotropija, kar pomeni, da je večina mehanskih in fizikalnih lastnosti odvisna od smeri. Les tako v smeri vzporedno z vlakni dosega najboljše lastnosti, in najslabše v smeri pravokotno na vlakna. Prednost lesa pred drugimi gradbenimi proizvodi je njegova majhna teža v primerjavi z nosilnostjo. Poleg svojih dobrih lastnosti ima les tudi nekatere slabe, kot sta na primer slaba odpornost proti biološkim škodljivcem in slaba odpornost proti spremembi vlage, ki negativno vpliva na njegovo trdnost, togost, dimenzijsko stabilnost in trajnost. Zato je potrebno

les pred uporabo v konstrukcijske namene ustrezno posušiti ter nato vgraditi z ustrezno zaščito. Kljub splošnemu negativnemu mišljenju o požarni odpornosti lesa, so leseni elementi relativno dobro požarno odporni. V primerjavi z jeklom in betonom, lahko les prevzema večje požarne obremenitve, saj les pri gorenju na površini ustvarja zoglenelo plast, ki deluje kot samozaščita in ohranja njegove konstrukcijske lastnosti.

Z željo po izboljšanju mehanskih in geometrijskih lastnosti lesa kot gradbenega proizvoda, ga spajamo in sestavljamo na načine, ki poudarijo dobre lastnosti in minimizirajo šibke. Les, oziroma lesene deske, lahko sestavljamo tako, da plasti potekajo vzporedno druga z drugo, ali pa jih sestavljamo v križni vzorec, kjer posamezne plasti običajno potekajo pod kotom 90° glede na predhodno plast. Za povezovanje tako sestavljenih elementov v celoto, lahko uporabimo lepila, kovinska vezna sredstva ali lesena vezna sredstva. Primeri elementov spojenih z različnimi veznimi sredstvi, so predstavljeni v naslednjih poglavjih te naloge. Tako sestavljeni leseni elementi imajo lahko:

- višjo trdnost, kot osnovni leseni proizvod,
- boljšo dimenzijsko stabilnost,
- poljubne dimenzije,
- boljšo trajnost.

Les je lahko z dobrimi materialnimi in fizikalnimi karakteristikami, trajnostjo in naravno lepoto, odličen gradbeni material.

1.2 Kaj je iQwood

IQwood je patentiran slovenski proizvod križno mozničenega lesa. To so masivni leseni konstrukcijski elementi, ki so sestavljeni iz križno zloženih masivnih lamel in lesenih moznikov. Osnovni proizvod so plošče različnih dimenzij in debelin, ki se lahko uporabljajo kot stenski ali stropni elementi. IQwood elemente razvrščamo po debelini, vidni oziroma industrijski kvaliteti vidnosti ter orientaciji posameznih slojev. Elementi so lahko sestavljeni iz treh, štirih ali pet različno orientiranih slojev, kjer se orientacija slojev lahko spreminja med vertikalno, horizontalno ali diagonalno usmeritvijo. V preglednici 1 so predstavljene standardne debeline iQwood elementov, poleg teh pa je mogoče izdelati tudi elemente večjih debelin. Proizvodnja linija tako omogoča izdelavo elementov do debeline 30 cm, oziroma v izjemnih primerih celo do debeline 42 cm.

Tip elementa	Število slojev	Debelina slojev [mm]	Skupna debelina [mm]	Orientacija slojev
A90	3	30	90	VHV*
B90	3	30	90	VDV*
C90	4	22,5	90	VDDV*
D90	3	30	90	VHV**
E150	3	30	150	VHVHV*

Preglednica 1: Razvrstitev iQwood elementov.

Kjer oznaka V pomeni vertikalno usmerjena plast lamel, H pomeni horizontalno usmerjena plast lamel, D pomeni diagonalno usmerjena plast lamel, * označuje normalno gostoto mozničenja in ** označujeta večjo gostoto mozničenja.



Slika 1: Prikaz tri slojne iQwood stene debeline 9 cm.

Za izdelavo se uporabljajo lamele širine 160 mm in debeline 30 mm, izjema so štiri slojni elementi C90, kjer se uporabljajo lamele debeline 22,5 mm. Evropska tehnična ocena [3] predpisuje, da mora vsaj 70 % vgrajenih lamel ustrezati trdnostnemu razredu C24 ter maksimalno 30 % lamel trdnostnemu razredu C16 ali boljšemu. Prav tako je pomembna primerna vlažnost lesenih lamel, ki morajo biti tehnično sušene do vlažnosti 14 \pm 3 %. S tem je zagotovljena naravna zaščita lesa pred škodljivci, kot so glive, insekti in plesni.



Slika 2: Vgradnja moznika in delovanje sil zaradi nabrekanja [4].

Leseni mozniki so mehansko vezno sredstvo, ki povezujejo posamezne lamele ter sloje lamel v masiven proizvod. Mozniki so valjaste oblike z narebrenim obodom katerega premer znaša 12 mm, glava moznika ima premer 17 mm in celotna dolžina moznika znaša 83 mm. Za izdelavo moznikov se uporablja bukov les, ki ustreza zahtevam trdnostnega razreda D30 ali boljše. Prav tako mora biti

zagotovljena ustrezna vlažnost moznikov, ki znaša 10 %. Pomembno je, da imajo vgrajeni mozniki nižjo vlažnost kot elementi, ki jih povezujejo, saj mozniki le na podlagi nabrekanja, zaradi vpijanja vlage iz okolice, zagotavljajo ustrezen in nosilen stik. Tako moznik ob nabrekanju na okoliški les deluje s silo nabrekanja (N_{nab}), ki posledično povzroča silo trenja (F_{tre}), ko je moznik izpostavljen izvlečni sili (P). Vgradnja moznika in delovanje sil je shematsko prikazano na sliki 2.





Slika 4: Prikaz delovanja stroja za izdelavo lukenj in vtisk moznikov.

Slika 3: Prikaz proizvodne linije iQwood elementov.

Združevanje ustrezno pripravljenih lesenih lamel in moznikov v masiven iQwood element poteka na posebni proizvodnji liniji, ki je prikazana na sliki 3 in omogoča izdelavo elementov do širine 3,20 m in dolžine 16,0 m. Sestavljanje slojevitosti plošč poteka v več fazah, saj mozniki povezujejo tri sloje lamel. Izjema je le tip elementa C90, kjer mozniki povezujejo 4 sloje. Zato izdelava elementov debelin večjih od 90 mm poteka v več fazah, le-to pa omogoča izdelavo inštalacijskih kanalov že v proizvodnem procesu. Tekom izdelave slojevitosti elementov, se prav tako izdelajo predvidene odprtine, kot so okna in vrata. Mozničenje iz lamel sestavljenega lesenega panela, prikazano na sliki 4 in poteka s posebnim strojem, ki je plod lastnega razvoja podjetja iQwood d.o.o. Z omenjenim strojem se najprej izvrta odprtine, v katere se nato vtisne lesene moznike, vgradnja katerih poteka po predpisanem vzorcu (slike 5 in 6). V primeru elementov tipa A, C in E, se na eno stičišče različno orientiranih lamel vgradi po tri moznike (v zgornji levi vogal, v zgornji desni vogal in spodnji levi vogal presečišča). Poleg teh treh moznikov se med vsako lamelo vgradi še moznik na stičišče dveh, enako orientiranih lamel v isti ravnini. Pri elementih tipa B in D pa se vgradi moznike v spodnji desni vogal presečišča lamel. Hkrati se poleg teh moznikov vgradijo še mozniki na stičišče dveh, enako orientiranih lamel v isti ravnini. Kadar imamo opravka z nestandardnimi debelinami elementov, poteka vgradnja moznikov po enakem vzorcu, kot pri elementih tipa E, ki pa se začne ponavljati od četrte strižne ravnine naprej. Tako je vzorec moznikov

pete strižne ravnine enak vzorcu prve strižne ravnine, vzorec šeste strižne ravnine je enak vzorcu druge strižne ravnine in tako naprej.



Slika 5: Prikaz vzorcev mozničenja iQwood elementov tipa A, B, C in D.



Slika 6: Prikaz vzorca mozničenja iQwood elementa tipa E.

Na slikah 5 in 6 so z oranžno barvo prikazane vertikalno usmerjene lamele, z vijolično barvo pa so prikazani horizontalno in diagonalno usmerjeni sloji. Prav tako so pri sliki 5 po barvi ločeni mozniki, ki se nahajajo znotraj presečišča (črna barva) in mozniki na stičišču lamel (modra barva). Na sliki 6 se mozniki prav tako razlikujejo po barvi. Vendar tu barva predstavlja katere sloje oziroma katere strižne ravnine povezuje moznik določene barve.



Slika 7: Prikaz oblike in dimenzije tipičnega moznika iQwood elementov [5].

Slika 7 prikazuje obliko in dimenzije moznika, ki se uporablja pri izdelavi iQwood elementov. Vidimo lahko, da je steblo moznika dodatno narebreno, kar poveča odpornost moznika proti izvlečni sili.

IQwood elementi so tako leseni konstrukcijski elementi, ki se ponašajo tudi z odličnimi toplotno in zvočno izolativnimi lastnostmi. Ustrezna zrakotesnost in vetrotesnost iQwood elementov je zagotovljena z zrakotesno membrano, ki je vgrajena v eno izmed strižnih ravnin elementa. Omenjeni lastnosti imata pomemben vpliv na obstojnost konstrukcije, saj nezadostna zrakotesnost ali vetrotesnost povzročata nastanek kondenzacije, kar pa lahko privede do poškodb konstrukcijskega sistema ali razkroja lesa, hkrati pa imata velik vpliv na toplotno izolativnost. IQwood konstrukcijski sistem z velikim naborom različnih dimenzij in sestavov posameznih elementov omogoča reševanje tako konstrukcijskih kot arhitekturnih izzivov.

1.3 Primerjava s standardnimi križno lepljenimi ploščami ter podobnimi proizvodi

Križno lepljene plošče

Križno lepljene plošče oziroma drugače imenovane X – Lam plošče, so sestavljene iz križno zloženih lamel, ki so pod pritiskom zlepljene v masiven ploskovni element. Metoda lepljenja oziroma stiskanja lamel, je odvisna od zahtevane kvalitete končnega proizvoda. Pri ploščah z višjo kvaliteto, so lamele v procesu lepljenja stisnjene s hidravlično stiskalnico pod pritiskom približno 6 kg/cm², medtem ko so lamele pri ploščah z nižjo kvaliteto, v procesu lepljenja stisnjene z vakuumsko vrečo pri podtlaku 2 kg/cm². Z večjim pritiskom v fazi lepljenja lamel, se zagotovi večja kvaliteta lepljenih stikov med sloji, kar ima pomembno vlogo pri večjih spremembah vlažnosti, cikličnih obremenitvah in zrakotesnosti. V primeru, ko imajo X – Lam elementi poleg ploskev lamel lepljene tudi robove, je ustrezna zrakotesnost zagotovljena že pri tri slojnih elementih debeline 10 cm. Osnovna surovina X – Lam elementov je les iglavcev, ki je tehnično sušen do vlažnosti 12 ± 2 %. S tem je zagotovljena naravna zaščita lesa pred škodljivci, kot so glive, insekti in plesni. Za izdelavo plošč se uporablja enokomponentno poliuretansko lepilo, ki med reakcijo lepljenja veže naravno vlago v lesu. Standardne dimenzije X – Lam elementov, glede na tehnične in arhitekturne zahteve individualnega projekta, poteka s CNC strojno tehnologijo. Na sliki 8 je predstavljen tipičen izgled X – Lam elementov.



Slika 8: X – Lam elementi [6].

Križno žebljane plošče

Proizvod proizvajalca Massiv – Holz – Mauer® (MHM) so mehansko združene masivne konstrukcijske plošče, imenovane tudi MHM plošče. Omenjene plošče so sestavljene iz križno zloženih lamel, ki so povezane z aluminijastimi žeblji. Spajanje posameznih slojev poteka v več fazah, saj žeblji povezujejo po tri sloje lamel na enkrat. Osnovna surovina MHM elementov je les iglavcev, ki je tehnično sušen do vlažnosti 15 ± 3 %. Mehanska povezava lamel debeline 23 ± 2 mm je zagotovljena z aluminijastimi žeblji premera 2,5 mm in dolžine 50 mm. Vgradnja veznih sredstev poteka po posebnem vzorcu. Za boljšo izolativnost proizvoda se na lamelah izvedejo vzdolžni utori, globine do 3 mm. Podobno, kot pri iQwood elementih, se tudi pri križno žebljanih elementih, ustrezna zrakotesnost zagotavlja z zrakotesnimi membranami, ki so pozicionirane v eni od strižnih ravnin elementa. Slojevitost MHM elementov se spreminja glede na tehnične in arhitekturne zahteve, in znaša od minimalno 5 slojev do maksimalno 15 slojev. Standardne dimenzije MHM elementov so okoli 6 m dolžine, 4 m širine in med 155 in 345 mm debeline.



Slika 9: Prerez MHM stenskega elementa [7].

Križno mozničene plošče po sistemu Holz 100

Proizvod proizvajalca Thoma Holz® so mehansko združene masivne konstrukcijske plošče, imenovane Thoma Holz100. Plošče so sestavljene iz križno zloženih lamel, ki lahko potekajo vertikalno, horizontalno ali diagonalno (pod kotom 45°), ter so povezane z lesenimi mozniki, ki potekajo preko vseh slojev elementa. Za izdelavo Holz100 elementov se uporablja les iglavcev, ki je tehnično sušen do vlažnosti 12 ± 2 %. Mehanska povezava lamel je zagotovljena z bukovimi mozniki premera 20 mm, vgradnja katerih poteka v predhodno izvrtane okrogle odprtine, v katere se nato vtisne moznik. Vgradnja moznikov tako poteka po posebnem vzorcu, ki elementom zagotavlja optimalno trdnost in togost. Elementi Holz100 so sestavljeni iz jedrnega vertikalnega sloja debeline 40 do 80 mm, ter ostalih glede na tehnične in arhitekturne zahteve potrebnih slojev debeline približno 24 mm. Ker samo z mozničeno povezavo lamel ni mogoče doseči ustrezne zrakotesnosti, je tudi v primeru elementov Holz 100 uporabljena zrakotesna membrana, vgrajena v eno od strižnih ravnin elementa. Standardne dimenzije elementov Thoma Holz100 so približno 3 m širine, 10 m dolžine in debeline od 120 do 400 mm.



Slika 10: Thoma Holz100, zunanji zid 25 cm [8].

Primerjava masivnih konstrukcijskih elementov

Glavna razlika med proizvajalci masivnih konstrukcijskih elementov, je različen postopek spajanja posameznih lamel v celoto. Elementi se prav tako razlikujejo v različni orientiranosti in debelini posameznih slojev. Glavne razlike so prikazane v preglednici 2.

Vrsta elementa	Osnovni material	Vezna sredstva	Globina povezave	Debelina slojev	Orientacija
iQwood	Les iglavcev	Bukovi mozniki	3 sloji	Vsi sloji enaki	V, H, D
X – Lam	Les iglavcev	Lepilo	Lepljenje stikov	Različna debelina	V, H
MHM elementi	Les iglavcev	Aluminijasti žeblji	3 sloji	Vsi sloji enaki	V, H
Holz 100	Les iglavcev	Bukovi mozniki	Vsi sloji	Različna debelina	V, H, D

Preglednica 2: Primerjava lesenih masivnih konstrukcijskih elementov.

Kjer kratica V pomeni vertikalno usmerjena plast lamel, H pomeni horizontalno usmerjena plast lamel in D pomeni diagonalno usmerjena plast lamel.

2 EKSPERIMENTALNE PREISKAVE OBNAŠANJA IQWOOD ELEMENTOV

Podlaga za prosto trženje in uporabo izdelka v gradnji so harmonizirane evropske tehnične specifikacije, ki določajo enotne metode za ocenjevanje in potrjevanje bistvenih značilnosti gradbenih proizvodov, in omogočajo, da gradbeni objekti izpolnjujejo osnovne zahteve iz Uredbe Evropske unije o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov [9]. Če evropskih harmoniziranih standardov ni mogoče pripraviti, ali če proizvod odstopa od harmoniziranega standarda, se lahko za proizvod izda evropska tehnična ocena, ki se pripravi na podlagi evropskega ocenjevalnega dokumenta. Ko je gradbeni proizvod zajet v harmoniziranem evropskem standardu ali ustreza evropski tehnični oceni, ki je bila zanj izdana, proizvajalec pripravi izjavo o lastnostih proizvoda. Proizvajalec z izdajo le-te prevzema odgovornost za skladnost gradbenega proizvoda z navedenimi lastnostmi. Tako so bile, v procesu pridobivanja in posodabljanja evropske tehnične ocene na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, med letoma 2011 in 2022 izvedene uklonske [10], [11], strižne [12], [13] in upogibne [14] preiskave iQwood sistemov.

2.1 Uklonske preiskave

Zavod za gradbeništvo Slovenije je prve uklonske preiskave iQwood elementov izvajal v letu 2011, zadnje pa v letu 2022. Uklonski odziv in uklonska odpornost iQwood elementov je bila določena s tlačnim testom v hidravlični stiskalnici Amsler 500 MPa. Obremenjevanje iQwood elementov je potekalo s postopnim povečevanjem vertikalne obremenitve. Preiskave leta 2011 so bile izvedene na treh iQwood elementih širine 100 cm, višine 270 cm in debeline 15 cm, medtem ko so bile preiskave leta 2022 izvedene na petnajstih iQwood elementih, ki so se med seboj razlikovali po debelini in konfiguraciji moznikov. Vsi iQwood elementi, obravnavani v preiskavah leta 2022, so bili enakih dimenzij in sicer je znašala širina elementov 150 cm, ter višina 280 cm.

leto preiskave	št. preizkušancev	tip elementa	širina [cm]	višina [cm]	debelina [cm]
2011	3	E150	100	270	15
2022	3	A90	150	280	9
2022	3	B90	150	280	9
2022	3	C90	150	280	9
2022	3	D90	150	280	9
2022	3	E150	150	280	15

Preglednica 3: Prikaz leta preiskave in vrste ter dimenzije preizkušancev izpostavljenih vertikalni obremenitvi.

Preizkus tlačne nosilnosti elementov, predstavljenih v preglednici 3, je bil zasnovan tako, da je na preizkušanec delovala le tlačna osna sila, ki je povzročila uklonsko porušitev. Vsak preizkušanec je bil opremljen z merilnimi napravami, ki so bile postavljene na pet kritičnih mest in so merile vertikalne in horizontalne pomike preizkušanca, pozicije le-teh so prikazane na sliki 11. Za merjenje pomikov so bili uporabljeni linearni spremenljivi diferencialni transformatorji (LVDTs). Povečevanje tlačne sile je potekalo kontrolirano, približno 2 kN/s, dokler ni bila dosežena maksimalna tlačna sila, ki jo preizkušanec prenese ($F_{v,max}$). Maksimalna tlačna sila posameznega preizkušanca je sila, pri kateri preizkušanec ni več zmožen prenašati obremenitev.



Slika 11: Levi del slike prikazuje pozicije merilnikov, na desnem pa je prikazan preizkušanec med tlačnim testom [11].

Preizkušanci so bili na spodnjem in zgornjem robu togo vpeti v podpore, kar pa ne odraža realnega stanja vpetja elementov v praksi, kjer so elementi na spodnjem robu podprti nepomično členkasto, na zgornjem robu pa pomično členkasto, zato je bila potrebna korekcija eksperimentalnih rezultatov. Uklonska dolžina elementov z upogibno togostjo *EI* in nično strižno deformacijsko energijo, je pri členkastem vpetju enaka dolžini elementa. V primeru togega vpetja na spodnjem in zgornjem robu pa znaša uklonska dolžina polovico dolžine elementa. Z željo po natančnem izračunu uklonske dolžine za korekcijo eksperimentalnih rezultatov smo pri izračunu le-te upoštevali tudi strižno deformacijsko energijo elementa. Izračun uklonske dolžine z upoštevanjem striga je mogoče izvesti z uporabo enačbe (1) za uklonsko dolžino iz Nemškega nacionalnega aneksa k Evrokodu 5 [1]:

$$L_{ef} = \beta \cdot L \sqrt{1 + \frac{EI \cdot \pi^2}{(\beta \cdot L)^2 \cdot GA}} \tag{(1)}$$

kjer β predstavlja koeficient uklonske dolžine, *L* predstavlja dolžino elementa, *EI* je upogibna togost elementa, *GA* pa predstavlja strižno togost elementa.

Izračunani strižna in upogibna togost testiranih elementov sta prikazani v spodnji preglednici 4. V izračunu so bile diagonalne plasti obravnavane enako kot horizontalne plasti, strižna togost pa je bila izračunana po metodi analogije strižnih napetosti (»shear analogy method«). Le-ta za izračun strižne togosti predpisuje enačbo (2), pomen posameznih komponent enačbe pa je predstavljen na sliki 12.

$$\frac{1}{GA} = \frac{1}{a^2} \cdot \left\{ \sum_{1}^{n-1} \frac{s_{ef}}{K_u} + \frac{d_1}{2 \cdot b_1 \cdot G_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{d_i}{b_i \cdot G_i} + \frac{d_n}{2 \cdot b_n \cdot G_n} \right\}$$
(2)

Kjer *a* predstavlja razdaljo med težiščema zunanjih slojev, *d* je debelina sloja, *b* je širina elementa, s_{ef} je efektivna razdalja med veznimi sredstvi, K_u je modul zdrsa moznika in *G* je strižni modul lesa C24.



Slika 12: Določitev strižne togosti po metodi analogije strižnih napetosti [15].

Tip elementa	E _{mean} [N/mm ²]	<i>I</i> [mm ⁴]	<i>EI</i> [Nmm ²]	<i>GA</i> [N]	L_{ef} [mm] za $\beta=0,5$	L _{ef} [mm] za β=1
A90	11000	8,78 x 10 ⁷	9,66 x 10 ¹¹	4,62 x 10 ⁵	4756	5339
B90	11000	8,78 x 10 ⁷	9,66 x 10 ¹¹	1,79 x 10 ⁵	7427	7812
C90	11000	8,00 x 10 ⁷	8,81 x 10 ¹¹	3,44 x 10 ⁵	5220	5756
D90	11000	8,78 x 10 ⁷	9,66 x 10 ¹¹	1,79 x 10 ⁵	7427	7812
E150	11000	$3,36 \ge 10^8$	3,70 x 10 ¹²	3,98 x 10 ⁵	9685	9984

Preglednica 4: Vrednosti upogibne in strižne togosti s pripadajočimi uklonskimi dolžinami.

V izračunu strižne togosti, je bil upoštevan modul zdrsa posameznega moznika z vrednostjo $K_u = 1000$ N/mm, kot je predpisano v ETA-14/0334 [5]. Pri izračunu je bil upoštevan tudi vztrajnostni moment določen z uporabo γ – gama metode in upogibna togost, ki je določena kot produkt vztrajnostnega momenta in elastičnega modula. Za izračun kritične uklonske nosilnosti, tako uporabimo metodo, ki jo predpisuje aneks C standarda EN 1995-1-1 [1]. Tako lahko kritično Eulerjevo uklonsko silo, ki upošteva strig, določimo z enačbo (3).

$$F_{krit} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{ef}^2} \tag{3}$$

Kot lahko opazimo v enačbi (3), na izračun kritične uklonske sile različno podprtih elementov vpliva le uklonska dolžina elementa. Tako lahko eksperimentalno dobljene rezultate prevedemo na rezultate pri drugačnih robnih pogojih s faktorjem podpore, ki se izračuna po enačbi (4). Le-ta je izpeljana iz enačbe (3) in jo uporabimo za pretvorbo eksperimentalnih rezultatov s togimi podporami v rezultate pri členkastih podporah.

$$k_{podpora} = \frac{L_{ef}^2(\beta=1)}{L_{ef}^2(\beta=0,5)}$$
(4)

V enačbi (4) $k_{podpora}$ predstavlja faktor podpore, $L_{ef}(\beta=1)$ predstavlja uklonsko dolžino togo podprtega elementa in $L_{ef}(\beta=0,5)$ predstavlja uklonsko dolžino členkasto podprtega elementa.

V preglednici 5 so na podlagi zgoraj predstavljenega izračuna prikazane vrednosti faktorja podpore za posamezen tip iQwood elementov.

Preglednica 5: Izračunani faktorji podpore za posamezen tip iQwood elementa.

-			-			
Tip elementa	A90	B90	C90	D90	E150	
$k_{podpora}$	0,794	0,904	0,823	0,904	0,941	

Na grafikonu 1 so prikazani rezultati uklonskih preiskav različnih tipov iQwood elementov. Prikazane so povprečne vrednosti preizkusov posameznega tipa preizkušancev. Poleg eksperimentalnih rezultatov so prikazane tudi korigirane vrednosti uklonske sile zaradi drugačnih robnih pogojev. Ker so bili elementi testirani leta 2011 različnih dimenzij, kot elementi testirani leta 2022, smo le te prevedli na enake dimenzije. Širina elementov testiranih v letu 2022 je bila 50 % večja kot pri preizkušancih iz leta 2011, zato smo kritično uklonsko silo povečali za faktor 1,5. Razlika med višinami preizkušancev iz različnih let znaša le 10 cm, zato smo ta vpliv na rezultate zanemarili.



Grafikon 1: Rezultati uklonskih preiskav elementov in primerjava le teh z korigiranimi vrednostmi.

Kjer oznake A - E pomenijo tip elementa, 90 oz. 150 pomeni debelino elementa, $F_{v,max}$ pomeni maksimalno vertikalno silo in 2011 oz. 2022 pomeni letnico preizkusa.

Iz rezultatov predstavljenih na grafikonu 1, lahko vidimo uklonsko nosilnost različnih preizkušancev in vpliv različnih konfiguracij mozničenja, ter vpliv različne orientiranosti slojev. Pri vseh preizkušancih je prišlo do uklona celotnega elementa in posledično do uklonske porušitve, primer katere je prikazan na sliki 13. Zaradi relativno majhne strižne togosti iQwood elementov, prihaja le do manjših razlik med uklonsko dolžino togo in členkasto vpetih elementov. Posledično to, pomeni, da je uklonska sila členkasto podprtih elementov le približno 10 - 20 % manjša od uklonske nosilnosti togo vpetih elementov.

Pri primerjavi rezultatov iz grafikona 1, ugotovimo, da ima največji vpliv na uklonsko nosilnost elementov togost povezav med sloji oziroma konfiguracija moznikov. Če najprej primerjamo elementa tipa A in E, lahko opazimo, da elementi tipa E, kljub svoji večji debelini, ne dosegajo bistveno boljših rezultatov, kot elementi tipa A. Razlog je namreč v tem, da imajo elementi tipa A bistveno bolj gosto konfiguracijo moznikov, kot elementi tipa E. Podobno lahko opazimo pri primerjavi elementov tipa A in D, ki se razlikujejo le v konfiguraciji moznikov. Elementi tipa D vsebujejo približno 50 % manj moznikov kot elementi tipa A, kar se odraža v približno 50 % manjši uklonski nosilnosti teh elementov. Če pa primerjamo elemente tipa B in D, ki se razlikujejo le v orientaciji srednjega sloja lamel, opazimo, da elementi tipa B dosežejo približno 20 % večjo uklonsko nosilnost. Pri elementih tipa B je sredinski

sloj lamel orientiran diagonalno, kar je očitno razlog za večjo uklonsko nosilnost. Tako smo na podlagi primerjave rezultatov ugotovili, da poleg togosti povezave med sloji na uklonsko nosilnost vpliva tudi orientacija sredinskih slojev lamel.



Slika 13: Tipična uklonska porušitev iQwood elementa [11].

2.2 Strižne preiskave

Namen testiranja je bila ocena strižnih lastnosti preizkušancev obremenjenih s strižno silo v svoji ravnini. Izvedena sta bila dva tipa preizkusov:

 preizkus trdnosti in togosti preizkušancev s tako imenovanim monotonim testom. Preizkus in postopek obremenjevanja je potekal po predpisih standarda SIST EN 594:2011 [16], katerega krivulja obremenjevanja je prikazana na sliki 14.



Slika 14: Preizkus trdnosti in togosti v skladu s standardom EN 594 [16].

- Ciklični preizkus strižne trdnosti v ravnini skladno s standardom ISO 16670:2003 [16] katerega krivulja obremenjevanja je prikazana na sliki 15.



Slika 15: Ciklični preizkus strižne trdnosti v ravnini skladno s standardom ISO 16670:2003 [16].

Leta 2011 so bile izvedene strižne preiskave na šestih iQwood preizkušancih širine 280 cm, višine 277 cm in debeline 27 cm, medtem ko so bile preiskave leta 2022 izvedene na enaindvajsetih preizkušancih, ki so se razlikovali po debelini in konfiguraciji moznikov. Vsi iQwood elementi testirani leta 2022 so bili enakih dimenzij, in sicer je znašala širina elementov 240 cm ter višina 270 cm.

leto preiskave	št. preizkušancev	tip elementa	širina [cm]	višina [cm]	debelina [cm]
2011	6	E270	280	277	27
2022	5	A90	240	280	9
2022	4	B90	240	280	9
2022	6	C90	240	280	9
2022	3	D90	240	280	9
2022	3	E150	240	280	15

Preglednica 6: Prikaz leta preiskave in vrste ter dimenzije preizkušancev izpostavljenih horizontalni obremenitvi.

Vnos horizontalne sile v preizkušanec je potekal s hidravličnimi aktuatorji, preizkušanci pa so bili na dnu togo vpeti v podpore. Zaradi bistveno večje strižne togosti stenskih elementov z diagonalami, so bili le-ti tekom preizkusa dodatno vpeti s priključno pločevino, po celotni dolžini elementa. Vpetje iQwood elementov med strižnimi preiskavami je prikazano na slikah 16 in 17.



Slika 16: Prikaz vpetja preizkušancev brez diagonalnih slojev (tip A, D, E) [13].



Slika 17: Prikaz vpetja preizkušancev z diagonalnimi sloji (tip B in C) [13].

Vsak preizkušanec je bil opremljen z merilnimi napravami, ki so bile postavljene na kritična mesta. Za merjenje pomikov so bili uporabljeni linearni spremenljivi diferencialni transformatorji (LVDTs). Na spodnji sliki 18 so prikazane lokacije merilnikov in preizkušanec med strižnim testom.



Slika 18: Na levi je prikazana pozicija merilnikov in vnosa sile, na desni pa preizkušanec pri strižnem testu [13].

V preglednici 7 so prikazani rezultati strižnih preiskav različnih iQwood elementov. Vrednosti sil in pomikov, ki so podani v preglednici 7 so odčitane iz merilnih naprav, katerih pozicije so prikazane na sliki 18. Tako so pripadajoči horizontalni pomiki posameznega testa odčitani iz merilnika, ki je postavljen na mesto oznake w_{ino} na sliki 18. Podobno kot pomik se je tekom testa kontrolirala tudi velikost vnešene sile, odčitavanje le-te pa je potekalo na mestu, kjer je potekal vnos sile na preizkušanec.

Ornalia	Тір	Vertikalna sila	$F_{L1,max}$	L _{1,max}	$F_{L1,max,c}$	$L_{1c,max}$
Oznaka	elementa	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
A1_2022	A90	NE	131,42	100	/	/
A2_2022	A90	NE	129,63	100	/	/
2-A_2022	A90	25	111,58	100	/	/
A4 (A) _2022	A90	25	107,34	96,42	-108,14	-94,47
A5 (A) _2022	A90	25	107,98	101,3	-109,32	101,08
B1*_2022	B90	NE	178,98	44,13	/	/
B4 (1B) _2022	B90	25	244,89	69,94	/	/
B2_2022	B90	NE	249,61	46,69	/	/
B3_2022	B90	NE	249,95	43,51	/	/
C2*_2022	C90	NE	89,36	4,20	/	/
C4 (C) _2022	C90	25	248,69	20,79	/	/
C-2 (C5) _2022	C90	25	206,38	16,06	-242,61	-15,53
1C (C6) _2022	C90	25	237,15	15,55	-238,1	-15,26
C1_2022	C90	NE	250,88	19,48	/	/
C3_2022	C90	NE	243,41	31,88	/	/
D1_2022	D90	25	75,43	100	/	/
D2_2022	D90	NE	76,78	100	/	/
D3 (1D) _2022	D90	NE	94,35	100	/	/
ETA – E1_2022	E150	NE	121,56	100	/	/
ETA – E2_2022	E150	NE	131,16	100	/	/
E1 (ETA) _2022	E150	25	120,31	100	/	/
E12011	E270	20	62,03	99,14	/	/
E22011	E270	50	86,31	105,38	/	/
E3_2011	E270	20	91,4	205,05	/	/
E4_2011	E270	50	108,22	258,08	/	/
E5_2011	E270	20	96,21	209,71	/	/
E6_2011	E270	50	105,68	226,23	/	/

Preglednica 7: Rezultati strižnih preiskav.

V preglednici 7 oznaka $F_{L1,max}$ pomeni maksimalno horizontalno silo pri monotonem testu potrebno za dosego horizontalnega pomika 100 mm, $L_{1,max}$ pomeni pripadajoči horizontalni pomik pri monotonem

testu, $F_{LI,max,c}$ pomeni horizontalno silo pri cikličnem testu in $L_{Ic,max}$ pomeni pripadajoči največji horizontalni pomik pri cikličnem testu.



Grafikon 2: Primerjava povprečnih deformacij različnih iQwood elementov pri statičnih strižnih testih.

Na grafikonu 2 barvne polne črte prikazujejo povprečne deformacije posameznih tipov iQwood elementov pri statičnih strižnih testih, osenčeni del v okolici linij povprečnih deformacij pa predstavlja raztros vseh izvedenih strižnih testov posameznega tipa iQwood elementa. Tako lahko iz rezultatov prikazanih v preglednici 7 in grafikonu 2 vidimo, da imajo elementi tipa A, D in E veliko podajnost, saj so vsi preizkušanci dosegli mejno vrednost pomika, ki znaša 100 mm. Pri vseh preizkušancih tipa A, D in E je prišlo do podobnega porušitvenega mehanizma, in sicer je prišlo do rotacije vertikalno usmerjenih lamel kot je prikazano na sliki 19, oziroma zdrsa horizontalno usmerjenih lamel kot je prikazano na sliki 20, ter do deformacije moznikov in do vtisa le-teh v lamele. Prav tako lahko opazimo, da so najbolj podajni elementi tipa E270, ki kljub največji debelini dosegajo najslabše rezultate. Razlog za tako veliko proti elementom iz leta 2022, in to so mozniki na stiku med posameznimi lamelami v isti ravnini. Ti mozniki so obkroženi z rdečo barvo na sliki 21 in preprečujejo vzdolžni zdrs lamel, posledično pa zagotavljajo bistveno večjo strižno togost iQwood elementov.



Slika 19: Prikaz rotacije vertikalno usmerjenih lamel.



Slika 20: Prikaz zdrsa horizontalno usmerjenih lamel.



Slika 21: Primer moznikov na stiku med posameznimi lamelami v isti ravnini.

V primerih preizkušancev tipa B in C lahko vidimo, da dosežejo veliko večjo strižno silo in bistveno manjše horizontalne pomike. V nekaterih primerih je dosežena maksimalna potisna moč hidravličnega aktuatorja, ki znaša 250 kN. Razlog za bistveno večjo strižno odpornost teh preizkušancev, so diagonalno usmerjeni sloji in način vpetja preizkušancev. Togo vpetje in blok element, ki so prikazani na slikah 16 in 17, povzročijo prenos horizontalne obtežbe po diagonali direktno v podpore in posledično dodatno povečajo togost teh elementov. Zaradi večje togosti teh preizkušancev, pride do vtisa moznikov v lamele in posledično do porušitve bistveno kasneje. Prav tako zaradi večje togosti teh elementov, v večini primerov, ciljni pomik 100 mm ni bil dosežen. Na sliki 22 je prikazana tipična deformacija iQwood panelov pri strižni obremenitvi.



Slika 22: Element tipa A90 pri ciljnem horizontalnem pomiku 100 mm [12].

Na slikah 23 in 24 so prikazani rezultati cikličnega testa preizkušanca tipa A90 in C90. S primerjavo rezultatov ciklične analize iQwood elementov tipa A90 in C90 lahko opazimo, da elementi tipa C90 dosegajo bistveno večje horizontalne sile in manjše pripadajoče pomike kot elementi tipa A90. Posledično to pomeni, da imajo elementi tipa C90 večjo strižno trdnost kot elementi tipa A90.



Slika 23: Prikaz rezultatov cikličnega testa preizkušanca tipa A90.



Slika 24: Prikaz rezultatov cikličnega testa preizkušanca tipa C90.
2.3 Upogibne preiskave

Z namenom ugotovitve upogibnih lastnosti iQwood elementov so bile izvedene preiskave z obremenitvijo pravokotno na njihovo ravnino. Tako so na Zavodu za gradbeništvo Slovenije v letu 2011 izvedli upogibni preizkus na elementu širine 100 cm, dolžine 600 cm in debeline 21 cm v treh fazah:

 Enostavni štiri – točkovni upogibni preizkus, kjer so prostoležeč element obremenjevali do ciljnega pomika L/300,



Slika 25: Razporeditev podpor in obremenitev v prvi in tretji fazi testiranja.

 Po sprostitvi obtežbe iz prve faze so na sredino razpona elementa postavili dodatno podporo in prilagodili vnos obtežbe na element, tako da je v vsakem novem polju nastopala točkovna obtežba. Obremenjevanje elementa je ponovno potekalo do dosega ciljnega pomika L/300,



Slika 26: Razporeditev podpor in obremenitev v drugi fazi testiranja.

 Po ponovni sprostitvi obtežbe, je bila sredinska podpora odstranjena in ponovno je bil vzpostavljen enak mehanizem vnosa obtežbe, kot v prvi fazi. Pri tem preizkusu je obremenjevanje elementa potekalo do porušitve.

Preizkušanec je bil opremljen z linearnimi spremenljivimi diferencialnimi transformatorji (LVDTs), ki so merili vertikalne deformacije. Ti merilniki so bili v fazi ena in tri postavljeni v točki A, v primeru faze dve, pa v točkah D in E. Vnos obremenitve na preizkušanec je potekalo s hidravličnim aktuatorjem,

njena velikost pa je bila kontrolirana z obremenitvenimi celicami, ki so bile postavljene na lokacije direktno pod mesto vnosa obtežbe.

	F_A [kN]	<i>w_A</i> [mm]	F _D [kN]	w _D [mm]	F_E [kN]	w _E [mm]	Ciljni pomik [mm]
Faza 1	20,84	17,56	/	/	/	/	18
Faza 2	/	/	56,67	9	52,21	9,02	9
Faza 3	126,93	459,5	/	/	/	/	/

Preglednica 8: Rezultati posamezne faze upogibnih preiskav.



Grafikon 3: Prikaz deformacij iQwood elementov pri različnih testiranja.

Iz preglednice 8 in grafikona 3, ki prikazujeta rezultate posamezne faze preizkusov, lahko opazimo, da v fazi 1 ciljni pomik 18 mm, dosežemo pri približno 21 kN veliki vertikalni obtežbi. V fazi 2, ko obravnavamo kontinuirni nosilec preko dveh enakih polj, pa ciljni pomik dosežemo pri približno 54 kN veliki vertikalni obtežbi. Pri preizkusu v fazi 3 je bil, cilj ugotoviti pri kateri vertikalni obremenitvi nastopi porušitev preizkušanca, tako je obremenjevanje potekalo do obremenitve 126,93 kN, pri tem pa je bil dosežen pomik 459,5 mm.



Slika 27: Preizkušanec med obremenjevanjem pri tretji fazi.

Kot je razvidno iz rezultatov faze 3 in slike 27, so iQwood elementi sposobni dosegati velike deformacije pred samo porušitvijo. Razlog je relativno slaba povezava posameznih lamel v celoto, kar se pri velikih obremenitvah odraža z zdrsom moznikov in razdružitvijo posameznih slojev lamel, kar prikazuje slika 28.



Slika 28: Prikaz razdružitve slojev iQwood elementa in zdrsa moznika nad krajno podporo.

2.4 Povzetek rezultatov preiskav

Opravljene preiskave so pokazale obnašanje iQwood elementov pri osni, strižni in upogibni obremenitvi. Iz dobljenih rezultatov smo lahko videli pomen in vpliv različnih karakteristik iQwood elementov na njihovo nosilnost in deformabilnost. Ugotovili smo, da elementi z manjšim številom moznikov dosegajo bistveno slabše rezultate, saj manjše število le-teh posledično pomeni manjšo togost povezave posameznih slojev. Prav tako smo v primeru obremenitev v ravnini iQwood elementa prikazali pomembno vlogo diagonalno usmerjenih slojev. Tako v primeru vertikalnih, kot horizontalnih obremenitev so le-ti dosegali boljše rezultate kot elementi brez diagonalnih slojev. Ker je bil na obremenitev pravokotno na ravnino testiran le en element brez diagonalnih slojev, ne moremo poznati njihovega vpliva v tem primeru. Iz strižnih preiskav, kjer so elementi z diagonalnimi sloji dosegali boljše rezultate lahko sklepamo, da diagonalni sloji ne bi bistveno doprinesli k upogibni nosilnosti elementov, vendar pa bi na podlagi večje strižne odpornosti le-teh zagotavljali bistveno bolj togo diafragmo medetažne plošče. Ker so bile upogibne preiskave izvedene le na enem preizkušancu, iz dobljenih rezultatov ne moremo sklepati o upogibni nosilnosti iQwood elementov, hkrati pa ne moremo vedeti ali obravnavani element dosega rezultate boljše ali slabše od povprečja iQwood elementov.

3 NUMERIČNA ANALIZA

Na podlagi eksperimentalnih preiskav izvedenih na Zavodu za gradbeništvo so bile v okviru te naloge izvedene numerične računske analize s programom SAP2000 [2]. Ker smo poznali eksperimentalne rezultate strižnih, uklonskih in upogibnih preiskav, so numerične analize izvedene na elementih enakih dimenzij z enakimi robnimi pogoji in obremenitvami. Tako smo lahko s primerjavo eksperimentalnih in računskih rezultatov dokazali ustreznost računskega modela. Na sliki 29 sta prikazani mreži končnih elementov dveh različnih tipov iQwood elementov.



Slika 29: Na levi je prikazan model z vertikalno in horizontalno usmerjenimi sloji na desni pa model z vertikalno in diagonalno usmerjenimi sloji.

3.1 Priprava numeričnega modela

Z računalniškim programom SAP2000 [2], ki omogoča računanje konstrukcij z uporabo metode končnih elementov so bili izdelani modeli za strižno, uklonsko in upogibno analizo iQwood elementov. Vsak numerični model je sestavljen iz:

- skupine ploskovnih elementov, ki predstavljajo posamezne sloje elementov,
- povezav (link-ov), ki predstavljajo moznike,
- robnih pogojev (podpore),
- obtežbe.

Definiranje materiala

Pri izdelavi modela je potrebno najprej definirati material. Tako smo v programu definirali material, ki upošteva ortotropnost lesa, in uporabili materialne karakteristike lesa kvalitete C24:

-	Elastični modul – v smeri vlaken lesa ($E_{0,mean}$):	11000	N/mm ²
-	Elastični modul – v smeri pravokotno na vlakna (E90,mean):	370	N/mm ²
-	Strižni modul ($G_{0,mean}$):	690	N/mm ²
-	Strižni modul (G90,mean):	69	N/mm ²
-	Poissonov koeficient:	0,3	/
-	Povprečna gostota:	4,2 x 1	0 ⁻⁶ N/mm ³

Modeliranje lamel

Vsaka vertikalna in horizontalna lamela je sestavljena iz 4-vozliščnih kvadratnih končnih elementov dimenzije 20/20 mm in 120/120 mm, ki skupaj tvorijo lamelo širine 160 mm. Na sliki 30 so z oranžno barvo označeni robni končni elementi vertikalno usmerjenih lamel, z modro barvo pa robni končni elementi horizontalno usmerjenih lamel.



Slika 30: Na levi so prikazane vertikalne lamele na sredini horizontalne lamele, na desni pa 4-vozliščni končni element.

Diagonalne lamele so sestavljene iz 8-vozliščnih kvadratnih končnih elementov zavrtenih za 45°, ki »obkrožajo« končne elemente dimenzije 20/20 mm. Na sliki 31 so z rdečo označeni robni končni elementi diagonalno usmerjenih lamel.



Slika 31: Na levi so prikazane diagonalno usmerjene lamele, na desni pa 8 - vozliščni končni element.

Za pravilno delovanje računskega modela je potrebna ustrezna povezava posameznih slojev končnih elementov med seboj. Le ta je zagotovljena s tako imenovanimi vzmetnimi elementi, ki pa morajo nujno potekati skozi vozlišča končnih elementov. Zato je mreža končnih elementov nastavljena tako, da se vozlišča končnih elementov in pozicije povezav ujamejo. Ta pogoj je tudi razlog, da so v primeru diagonalnih slojev uporabljeni 8 – vozliščni končni elementi, saj je le tako bilo mogoče zagotoviti ujemanje vozlišč z povezavami. Omenjene končne elemente v programu SAP2000 [2] podamo tako, da končnemu elementu podamo osem izhodiščnih točk, ki se nato povežejo v 8 – vozliščni končni element.

Lamele oziroma končni elementi, ki predstavljajo lamele, so modelirani kot lupinasti ploskovni elementi »Shell – Layered/Nonlinear«, katerih debelina znaša 30 mm, oziroma pri elementih tipa C 22,5 mm. Definiranje takšnega elementa v programu SAP2000 [2] je predstavljeno na sliki 32.

×	🤾 Shell Section Layer Definition											
	Laver Definition Data											
	Layer Name	Distance	Thickness	Туре	Num Int. Points	Material +	Material - Angle	Туре	Material Comp S11	onent Behavior S22	S12	
	vertikalni sloj 1	0,	30,	Shell V	2	Les C24	~ 0 ,	Directional V	Nonlinear v	Nonlinear v	Nonlinear	\sim
	vertikalni sloj 1	0,	30,	Shell	2	Les C24	0,	Directional	Nonlinear	Nonlinear	Nonlinear	

Slika 32: Definirnje ploskovnih elementov posameznih slojev iQwood elementov v programu SAP2000.

Pravilno usmerjenost ploskovnih elementov smo dosegli tako, da smo glavno lokalno os lupinastega elementa usmerili v smeri vlaken lamele. Poleg ustrezne usmerjenosti lamele je bilo potrebno definirati še ustrezno togost povezave med lamelami, saj lamele povezujejo le mozniki in sili lepenja ter trenja. Zato je bilo potrebno na ploskovnih elementih, katerih rob je tudi rob lamele (elementi, ki so na zgornjih slikah označeni z oranžno, modro in rdečo barvo) predpisati ustrezne sprostitve robov, ki so na sliki 31 označene z oznakami I, O, M, T. Omenjene oznake tako predstavljajo sile in momente, ki delujejo na robu lamele. V modelu je tako preko roba lamele dovoljen prenos sile na drugo lamelo le v ravnini lamele s silo v smeri normale na rob lamele (»in-plane direct force normal to edge«) in delno preko strižne sile po robu lamele, ki predstavlja trenje oziroma lepenje, zato smo v modelu predpisali togost v smeri te komponente, ki znaša 5x10⁻⁵ kN/mm/mm (»in-plane shear force along edge«). Definiranje robnih pogojev robovom lamel v programu SAP2000 [2] je prikazano na sliki 33.

V Assign Area Edge Palances			
Assign Area Euge Releases			
Edge Release Options			
 No Edge Releases - Delete Any Existing Edge 	Releases		
 Edge Releases on Selected Area Object Edges 			
 Edge Releases Specified Edge-By-Edge 			
Edge Number		1	<< < > >>
Edge End Point Labels		43001; 43010	
Edge Release Data			
	Release	Partial Fixity Sprin	gs
In-plane Shear Force Along Edge (1)	\checkmark	0,00005	kN/mm/mm
In-plane Direct Force Normal to Edge (2)			
Out-of-plane Shear Force Along Edge (3)	\checkmark	0	kN/mm/mm
Bending Moment About Edge (1)	\checkmark	0	kN/rad
Twisting Moment Along Edge (2)	\checkmark	0	kN/rad
Clear All E	idge Releas	es	
Reset Form t	o Default V	alues	
Get Values from Curre	ntly Selecte	d Area Object	
ОК	Close	Apply	

Slika 33: Definiranje linijskih členkov v programu SAP2000.

Slika 34 grafično prikazuje sile in momente, ki delujejo na stiku med lamelami. Na sliki 34 je z rdečo barvo označena sila v smeri normale na rob lamele, ki se prenaša preko roba, z barvo magente je prikazana strižna sila po robu lamele, ki se delno prenaša preko roba in z modro barvo so označene količine, katerih prenos preko roba lamele je preprečen.



Slika 34: Grafični prikaz sil in momentov na rob lamele (za definicijo členka na robu levega KE).

Modeliranje moznikov

Ključni element iQwood sistema so mozniki, ki povezujejo posamezne lamele v celoto. Le-ti so v programu modelirani kot povezava (vzmetni element), kateremu lahko predpišemo poljubne linearne ali nelinearne karakteristike v šestih različnih smereh. Omenjene karakteristike so v programu SAP 2000 definirane kot elementi, ki se lahko deformirajo osno, strižno in upogibno. Način in velikost notranje deformacije vzmetnega elementa pa lahko opišemo z naslednjimi enačbami (5 – 10), ki definirajo različne tipe deformacij:

Osne:	$d_{u1} = u_{1j} - u_{1i}$	(5)
Strižne v ravnini 1-2:	$d_{u2} = u_{2j} - u_{2i} - d_{j2} \cdot r_{3j} - (L - d_{j2}) \cdot r_{3i}$	(6)
Strižne v ravnini 1-3:	$d_{u3} = u_{3j} - u_{3i} - d_{j3} \cdot r_{2j} - (L - d_{j3}) \cdot r_{3i}$	(7)
Torzijske:	$d_{r1} = r_{1j} - r_{1i}$	(8)
Čisti upogib v ravnini 1-2:	$d_{r2} = r_{2j} - r_{2i}$	(9)
Čisti upogib v ravnini 1-3:	$d_{r3} = r_{3j} - r_{3i}$	(10)

Kjer u_{1i} , u_{2i} , u_{3i} , r_{1i} , r_{2i} in r_{3i} predstavljajo pomike in rotacije v točki i, oznake u_{1j} , u_{2j} , u_{3ji} , r_{1j} , r_{2j} in r_{3j} predstavljajo pomike in rotacije v točki j, oznaka d_{j2} je razdalja, ki jo definiramo kot razdaljo od točke j do mesta kjer merimo strižno deformacijo d_{u2} , oznaka d_{j3} je razdalja, ki jo definiramo kot razdaljo od točke j do mesta kjer merimo strižno deformacijo d_{u3} in L je dolžina vzmetnega elementa.



Slika 35: Grafični prikaz deformacije vzmetnega elementa in količin uporabljenih v enačbah [17].

Pri modeliranju smo predpostavili, da se lahko leseni mozniki deformirajo le strižno, zato smo vse komponente razen strižnih fiksirali oziroma podali veliko togost, da do osnih, torzijskih in upogibnih deformacij ne prihaja. Prav tako smo predpostavili enako obnašanje moznika v strižni ravnini 1-2 in 1-3. V teh ravninah smo mozniku predpisali nelinearne karakteristike, ki so prikazane na grafikonu 3. Enačba (11) pa prikazuje matriko, ki povezuje deformacije z notranjimi silami v vzmetnih elementih.

	(P)		[k _{u1}	0	0	0	0	0 -	$\int u_1$	
	V2		0	k_{u2}	0	0	0	$-dj2 \cdot k_{u2}$	$\left \begin{array}{c} u_{2} \end{array} \right $	
	V3		0	0	k_{u3}	0	$-dj3 \cdot k_{u3}$	0	u_3	()
ĺ	Т	} =	0	0	0	k_{r1}	0	0	$\begin{cases} r_1 \end{cases}$	• (11)
	М2		0	0	0	0	$k_{r2} + dj 3^2 \cdot k_{u3}$	0	$ -r_{2} $	
	(M3)	j	Lo	0	0	0	0	$k_{r3} + dj 2^2 \cdot k_{u2}$	(r_3)	j

V enačbi (11) tako *P* predstavlja osno silo, *V2* in *V3* predstavljata strižni sili, *T* predstavlja torzijski moment, *M2* in *M3* predstavljata upogibna momenta ter k_{u1} , k_{u2} , k_{u3} , k_{r1} , k_{r2} , k_{r3} predstavljajo koeficiente togosti notranjih vzmeti. Matrika iz enačbe (11) tako velja za točkovne vzmetne elemente in vzmetne elemente katerih deformacije v točki I so enake 0.



Grafikon 4: Nelinearne strižne karakteristike povezave (vzmetnega elementa).

Pri modeliranju nelinearnih karakteristik povezave podajamo karakteristično silo in karakteristični pomik, ki opišeta obnašanje elementa. Razmerje med njima je bilo določeno na podlagi parametrične analize posameznih parametrov. Tako obnašanje moznikov opisuje odsekoma ravna krivulja na grafikonu 4. Njen naklon podaja začetno in končno strižno togost moznika, prav tako pa je krivulja omejena s karakteristično silo 1,4 kN, ki glede na Evropsko tehnično oceno [15] predstavlja karakteristično bočno nosilnost moznika. Začetni naklon je precej strm, kar pomeni, da mozniki pri manjših obremenitvah delujejo bolj togo. Z naraščanjem obremenitve pa mozniki začnejo prehajati iz linearnega območja v nelinearno, kar se pri večjih obremenitvah odraža z zmanjšanjem strižne togosti. Le-ta začne padati zaradi vedno večjih strižnih deformacij moznika ter zaradi vtiska le-tega v lamele, kar povzroča večje pomike pri manjši obremenitvi. Definiranje parametrov povezave v programu SAP2000 [2] je predstavljeno na sliki 36. Kot opazimo na sliki 36 moramo podati tudi mesto lokacije, kjer se strižna deformacija v vzmetnem elementu zgodi. Vendar, ker smo večino deformacij vzmetnega elementa preprečili in dopuščamo le strižne deformacije lahko iz enačb (5 – 10) opazimo, da mesto lokacije strižne deformacije (»Shear deformation location«) nima vpliva na pravilno delovanje vzmetnega elementa in posledično celotnega elementa.

				Edit		
ink/Support Type	MultiLinear E	ilastic 🗸		Identification		
Property Name	link_DK_DK		Set Default Name	Property Name	link_DK_D	ĸ
Property Notes			Modify/Show	Direction	U2	
tal Mass and Weig	ht			Туре	MultiLinear	Elastic
lass	0,	Rotational Inertia 1	0,	NonLinear	Yes	
Veight	0,	Rotational Inertia 2	0,	Properties Used For Li	near Analysis Cases	
		Rotational Inertia 3	0,	Effective Stiffness		1,
ctors For Line, Are	a and Solid Sprir	igs		Effective Damping		0,
Property is Defined	for This Length In	n a Line Spring	1,	Shear Deformation Loc	ation	
Property is Defined	for This Area In A	Area and Solid Springs	1,	Distance from End-	J	15,
rectional Properties	,		P-Delta Parameters	Multi-Linear Force-Def	ormation Definition	
rection Fixed	NonLinear	Properties	Advanced	Displ	Force ^]
⊿ ∪1 🖂		Modify/Show for U1		1 -3,	-1,2	
	\checkmark	Modify/Show for U2		2 -0,4	-0,9	
✓ U2		Madifiel Character 112		3 0,	0,	
Z U2 □ Z U3 □		Modify/Show for U.S		4 0.4	0,9	
2 U2 🗌 2 U3 🔲 2 R1 🕅		Modify/Show for 03			10 V	
2 U2		Modify/Show for R1 Modify/Show for R2	ок	Order Rows	Delete Row	Add Row 6

Slika 36: Definiranje povezave (vzmetnega elementa) v programu SAP2000 [2].

Modeliranje robnih pogojev (podpor)

S podporami smo želeli vzpostaviti enake robne pogoje, ki so veljali pri eksperimentalnih preiskavah. Za popolnoma enak odziv eksperimentalnih in računskih podpor bi morali le te modelirati z vzmetmi, ki imajo določeno togost. Ker pa nas v okviru te naloge zanima predvsem obnašanje iQwood elementov in ne podpor, smo le te modelirali kot popolnoma toge. Tako smo pri strižnem modelu na spodnjem robu prve in zadnje lamele predpisali togo vpete podpore, povsod drugje po spodnjem robu pa pomične členkaste podpore, kar je shematsko prikazano na sliki 37. Na zgornjem robu smo predpisali podpore, ki preprečujejo le pomik izven ravnine iQwood elementa. Pri uklonskem modelu smo na spodnjem robu predpisali nepomične členkaste podpore na zgornjem pa pomične členkaste podpore. Tako smo dobili enako uklonsko dolžino elementa kot pri eksperimentalnih preizkusih. Podobno kot pri uklonskem modelu, smo tudi pri upogibnem na enem robu modelirali pomične členkaste podpore, na drugem pa nepomične členkaste podpore, ki pa so bile predpisane samo spodnjemu sloju lamel.



Slika 37: Shema sidranja lamel pri strižnem modelu na spodnjem robu iQwood elementa.

Modeliranje obtežbe - strig

Zanimalo nas je nelinearno obnašanje modela, zato je bilo potrebno izvesti nelinearno analizo. Vsak računski model iQwood panelov je bil obremenjevan v korakih do dosega maksimalne obtežbe iz eksperimentalnih preiskav. Tako je znašal korak vnosa obtežbe pri elementih tipa A, D in E 20 kN ter pri elementih tipa B in C 50 kN. Na podlagi postopnega vnosa obtežbe smo nato lahko izrisali grafikon, ki prikazuje velikost horizontalne deformacije pri določeni horizontalni sili. Obtežba je bila nanešena točkovno v zgornji levi vogal modela, skupna točkovna sila pa je bila enakomerno razdeljena na vse sloje elementa.

Modeliranje obtežbe - uklon

Pri modeliranju uklonskega računskega modela vsako vozlišče zgornjega roba modela obremenimo z 1 kN vertikalne obtežbe. Ker nas zanima uklonsko obnašanje modela, je poleg nanosa obtežbe potrebno definirati uklonski tip obtežnega primera. Ker lastna teža elementa predstavlja velik del skupne vertikalne obtežbe in se posledično že pri lastni teži aktivira manjša strižna togost moznikov moramo pri uklonskem obtežnem primeru uporabiti togost na koncu nelinearnega obtežnega primera lastne teže. Definiranje uklonskega obtežnega primera v programu SAP 2000 [2] je predstavljeno na sliki 38.

.oad Case Name	No	tes	Load Case Type	
uklon Set D)ef Name	Modify/Show	Buckling	✓ Design
Stiffness to Use			Mass Source	
Zero Initial Conditions - Unstressed State			Previous (MSSSRC1)
Stiffness at End of Nonlinear Case	DEA	~ D		
Important Note: Loads from the Nonlinear Ca case	ase are NOT included	in the current		
oads Applied				
Load Type Load Name	Scale Factor			
Load Pattern 🗸 vertikalna	 ✓ 1, 			
Load Pattern vertikalna	1,	Add		
		Modify		
		Delete		
Other Parameters				01
	0			OK

Slika 38: Definicija uklonskega obtežnega primera v programu SAP2000 [2].

Modeliranje obtežbe – upogib

Pri modeliranju upogibnega računskega modela nismo nanašali obtežbe, temveč smo vsiljevali pomike. Tako smo v numerični model na mesta, kjer so bili pri eksperimentalnem preizkusu postavljeni merilniki vsiljevali pomik, enak tistemu pri eksperimentalnih preiskavah. Rezultat takšne analize je tako bila sila, ki je potrebna za dosego vsiljenega pomika. Le-to pa smo nato primerjali z obtežbo iz eksperimentalnih preiskav.

3.2 Rezultati računske analize elementov

Primerjava rezultatov enakomerno goste in neenakomerno goste mreže končnih elementov

Za uporabo končnih elementov različnih dimenzij smo se odločili, ker smo tako precej poenostavili celoten model in skrajšali čas izračuna. Združevanje neenakomernih oziroma neusklajenih končnih elementov SAP2000 [2] omogoča z ukazom »auto edge constraint«. Ko elementu dodelimo te robne pogoje, ta samodejno poveže vsa stičišča robov z najbližjimi vogalnimi stičišči končnih elementov. Program ta stičišča nato poveže s prožnimi interpolacijskimi pogoji, kar pomeni, da so pomiki na vmesnih stičiščih interpolirani iz pomikov vogalnih stičišč končnih elementov [17].



Slika 39: Deformacije (v milimetrih) iQwood elementa modeliranega z neenakomerno gosto mrežo končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN



Slika 40: Deformacije (v milimetrih) iQwood elementa modeliranega z enakomerno gosto mrežo končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN

Na sliki 39 in 40 so prikazane deformacije numeričnega modela iQwood panela tipa A90. Kot lahko opazimo, se gostoti mrež končnih elementov precej razlikujeta. Model na sliki 39 je sestavljen iz končnih elementov dveh različnih dimenzij in sicer 20/20 mm in 120/120 mm. Model na sliki 40 pa je v celoti sestavljen iz končnih elementov dimenzije 20/20 mm, Vendar kljub različni gostoti mreže ter z združevanjem končnih elementov različnih dimenzij dobimo praktično enake rezultate, kar dokazuje tudi krivulja pomikov v odvisnosti od strižne sile, prikazana na grafikonu 5.



Slika 41: Horizontalne normalne napetosti S11 v N/mm za horizontalno usmerjen sloj lamel pri modelu z neenakomerno gosto mrežo končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN



Slika 42: Horizontalne normalne napetosti S11 v N/mm za horizontalno usmerjen sloj lamel pri modelu z enakomerno gosto mrežo končnih elementov pri obremenitvi s silo 130 kN

Podobno kot smo primerjali deformacije modelov z različnimi mrežami končnih elementov, lahko primerjamo tudi normalne napetosti. Tako so na slikah 41 in 42 prikazane normalne horizontalne napetosti S11 horizontalno usmerjenega sloja lamel. Opazimo lahko, da je razporeditev napetosti pri enakomerno in neenakomerno gosti mreži enaka.



Grafikon 5: Primerjava deformacij enakomerno in neenakomerno goste mreže končnih elementov.

Parametrična analiza

Je postopek, ki se uporablja za preučevanje vpliva vhodnih parametrov modela na končne rezultate. V primeru modeliranja iQwood elementov so glavni vhodni parametri:

- Sprostitve na robovih lamel,
- Začetna togost strižne povezave (vzmetnega elementa),
- Končna togost strižne povezave (vzmetnega elementa).

Obravnavamo štiri različne primere, kjer vzamemo primer 1 kot referenčni primer s katerim primerjamo dobljene rezultate analize ob spremembi le enega parametra:

<u>Primer 1:</u> Preko robov lamele je dovoljen polni prenos sile v smeri normale na rob. Hkrati pa je preko roba lamele dovoljen prenos le $5x10^{-5}$ kN/mm/mm strižne sile. Prav tako obravnavamo strižno vzmet, katere parametri so na grafikonu 6 prikazani z modro barvo.

<u>Primer 2:</u> Preko robov lamele je dovoljen polni prenos sile v smeri normale na rob. Hkrati pa je preko roba lamele dovoljen prenos le 5x10⁻⁵ kN/mm/mm strižne sile. V tem primeru obravnavamo strižno vzmet, katere končna togost strižne vzmeti je nižja kot pri primeru 1. Njeni parametri so na grafikonu 6 prikazani z rdečo barvo.

<u>Primer 3:</u> Preko robov lamele je dovoljen polni prenos sile v smeri normale na rob. Hkrati pa je preko roba lamele dovoljen prenos le 5x10⁻⁵ kN/mm/mm strižne sile. V tem primeru obravnavamo strižno vzmet, katere začetna togost strižne vzmeti je nižja kot pri primeru 1. Njeni parametri so na grafikonu 6 prikazani z zeleno barvo.

<u>Primer 4:</u> Preko robov lamele je dovoljen polni prenos sile v smeri normale na rob. Hkrati pa je preko roba lamele popolnoma preprečen prenos strižne sile. V tem primeru obravnavamo strižno vzmet, katere parametri so popolnoma enaki parametrom povezave pri primeru 1. Njeni parametri so na grafikonu 6 prikazani s črno barvo in črtkasto črto.



Grafikon 6: Karakteristike povezave za primere različnih vhodnih podatkov.



Grafikon 7: Primerjava deformacij analize iQwood elementa tipa A90 z različnimi vhodnimi podatki.

Kot je razvidno iz grafikona 7, že majhno spreminjanje vhodnih podatkov, ki so predstavljeni na grafikonu 6, lahko povzroči precejšnje odstopanje končnih rezultatov od referenčne linije primera 1. V primeru 2 smo za približno 10 % zmanjšali končno togost vzmeti povezave in tako posledično dobili približno 10 % večji končni pomik modela. V primeru 3 smo zmanjšali začetno togost vzmeti za približno 20 %, kar je povzročilo približno 20 % odstopanje pomikov modela v začetnem in srednjem delu krivulje. V primeru 4 pa smo popolnoma preprečili prenos strižne sile preko roba lamele. Sprememba tega parametra je imela najmanjši vpliv na model saj je končni pomik modela povečala le za približno 3 %. Iz zgornjih rezultatov lahko vidimo, da ima na rezultate analize največji vpliv začetna strižna togost vzmeti, ki vpliva na model tako pri manjših kot večjih obremenitvah. Končna strižna togost vzmeti vpliva le na rezultate pri večjih obremenitvah. Vendar je za pravilno obnašanje modela pri vseh obtežbah pravilno razmerje med začetno in končno strižno togostjo vzmeti.

Primerjava rezultatov eksperimentalne in numerične analize iQwood elementov Strižna analiza

Nelinearna strižna analiza elementov, je bila izvedena na iQwood elementih tipa A, B, C, D in E dimenzije 240 cm x 270 cm. Rezultati so primerjani z eksperimentalnimi analizami izvedenimi na Zavodu za gradbeništvo Slovenije.



Grafikon 8: Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov strižnih deformacij različnih tipov iQwood elementov.

Na grafikonu 8 so prikazani pomiki v odvisnosti od obremenitve za različne tipe iQwood elementov. S polno črto so prikazani rezultati eksperimentalnih analiz izvedenih na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, s črtkano črto pa numerični rezultati izvedeni z nelinearno analizo v programu SAP2000 [2]. Opazimo lahko, da med krivuljami prihaja do odstopanj, predvsem pri srednje velikih obtežbah. Kljub temu je ujemanje eksperimentalnih in numeričnih rezultatov dovolj dobro za analize v okviru te naloge.

Poleg primerjave pomikov v odvisnosti od obtežbe lahko primerjamo tudi obliko deformacij eksperimentalnih in numeričnih modelov.



Slika 43: Na levi prikazuje tipične deformacije numeričnega modela medtem ko desna slika prikazuje tipične strižne deformacije eksperimentalnih preiskav.

Iz slike 43 je razvidno, da se numerični model pod strižno obremenitvijo deformira podobno kot v primeru eksperimentalnih preiskav. Do strižnih deformacij prihaja zaradi strižne deformacije moznikov, zamika horizontalno usmerjenih lamel in vtisa moznikov v lamele. Če podrobneje pogledamo deformacije posameznih slojev, lahko prav tako opazimo podobnost deformacij.



Slika 44: Prikaz zamika horizontalnih lamel pri numeričnih in eksperimentalnih preiskavah.

Slika 44 prikazuje, da do zamika horizontalno usmerjenih lamel prihaja tako pri eksperimentalnem, kot računskem modelu. Do zamika lamel prihaja zaradi strižne deformacije moznikov, ki je posledično povzročila zdrs oziroma zamik lamel.



Slika 45: Prikaz zasuka vertikalno usmerjenih lamel eksperimentalnih in numeričnih preiskav.

V slojih vertikalno usmerjenih lamel, ki jih prikazuje slika 45, prihaja do rotacije lamel. Ponovno lahko s primerjavo numeričnih in eksperimentalnih rezultatov ugotovimo, da prihaja pri obeh preiskavah do podobnih deformacij. V primeru vertikalno usmerjenih slojev pa strižna deformacija moznika povzroča zasuk lamel.

Napetosti v vertikalnih slojih



Slika 46: Prikaz normalnih napetosti S11 vertikalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 130 kN.

Vnos sile v numerični model predstavljen na sliki 46 je potekal v zgornjem levem vogalu. Zaradi vnosa obremenitve se v levem zgornjem vogalu pojavijo tlačne napetosti, ki so obarvane z rdečkasto barvo. Poleg tlačnih napetosti na zgornjem robu modela vnos obremenitve povzroča tudi natezne napetosti (zelenkasta barva), ki se rahlo diagonalno širijo proti desnemu robu modela. Pri vertikalnih normalnih napetostih S11 lahko opazimo vpliv podpor na njihovo razporeditev. Zaradi zvračanja modela prihaja na levem spodnjem robu v okolici toge podpore do nateznih napetosti, medtem, ko na spodnjem desnem robu ob drugi togi podpori prihaja do tlačnih napetosti.



Slika 47: Prikaz normalnih napetosti S22 vertikalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 130 kN.

Horizontalne normalne napetosti S22 prikazujejo prenos obremenitev preko roba lamele. Opazimo lahko, da na levih robovih lamel prihaja do nateznih napetosti medtem, ko se na desnih pojavljajo tlačne napetosti. Prav tako lahko na sliki 47 vidimo, da se v spodnji polovici modela preko roba prenašajo bistveno večje obremenitve kot v zgornji polovici. Do tega prihaja zaradi vpliva podpor, ki v spodnjem delu zagotavljajo bistveno boljšo povezanost lamel.



Slika 48:Prikaz strižnih napetosti S12 vertikalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 130 kN.

Na sliki 48 lahko opazimo, da do največjih strižnih napetosti prihaja v območju vnosa obtežbe, ki je levi zgornji vogal in ob togih podporah, ki sta pozicionirane na spodnjem levem in desnem vogalu.

Napetosti v horizontalnih slojih



Slika 49: Prikaz normalnih napetosti S11 horizontalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 130 kN.

Vnos sile v numerični model predstavljen na sliki 49 je potekal v zgornjem levem vogalu. Tako lahko na levem delu slike, opazimo natezne napetosti po celotni višini levega roba. Natezne napetosti se od levega proti desnem robu počasi zmanjšujejo in se na skrajno desnem robu spremenijo v tlačne napetosti. Prav tako lahko opazimo, da na spodnjem robu v bližini podpor prihaja do bistveno večjih nateznih in tlačnih napetosti kot na zgornjem robu modela.



Slika 50: Prikaz vertikalnih normalnih napetosti S22 horizontalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 130 kN.

Vertikalne normalne napetosti S22 prikazujejo prenos obremenitev preko roba lamele. Tako lahko na sliki 50 opazimo, kako se obremenitev prenaša preko robov horizontalno usmerjenih lamel. Vidimo, da se večina prenosa obtežbe zgodi na začetku ali koncu horizontalno usmerjene lamele. Ker je obremenitev modela na zgornjem levem robu lahko opazimo, da na levem delu horizontalnih lamel prihaja do večjih nateznih napetosti na desnem delu pa do večjih tlačnih napetosti.



Slika 51: Prikaz strižnih napetosti S12 horizontalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 130 kN.

Na sliki 51 lahko opazimo, da do največjih strižnih napetosti prihaja v območju vnosa obtežbe, ki je levi zgornji vogal in ob togih podporah, ki sta pozicionirane na spodnjem levem in desnem vogalu. Prav tako lahko opazimo, da so strižne napetosti na skrajno levi in desni lameli z izjemo območja podpor in območja vnosa sile pozitivne napetosti, drugod v modelu pa se pojavljajo večinoma negativne strižne napetosti.

Napetosti v diagonalnih slojih



Slika 52: Prikaz normalnih napetosti S11 diagonalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 250 kN.

Slika 52 prikazuje razpored normalnih napetosti S11 v smeri vlaken diagonalno usmerjenega sloja lamel iQwood elementa tipa B90. Element je bil obremenjen v šibki smeri lamel, kar pomeni, da diagonalne lamele potekajo od spodnjega levega vogala proti zgornjemu desnemu vogalu, medtem ko pa je vnos obtežbe potekal na zgornjem levem vogalu. Tako lahko na sliki 52 opazimo, da se največje tlačne napetosti pojavijo diagonalno med levim zgornjim vogalom, kjer poteka vnos obtežba in spodnjim desnim vogalom, kjer imamo togo podporo. Prav tako lahko opazimo, da se v območju leve toge podpore pojavijo natezne napetosti.



Slika 53: Prikaz napetosti S22 diagonalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 250 kN.

Normalne napetosti S22 pravokotno na smer diagonalnega sloja prikazujejo prenos obtežbe preko roba diagonalno usmerjenih lamel. Na sliki 53 lahko vidimo, da so najbolj obremenjeni robovi lamel, ki povezujejo spodnjo levo togo podporo in zgornji desni vogal, kjer se pojavijo natezne napetosti v rangu 20 N/mm. Prav tako se velik del napetosti skoncentrira v območju desne toge podpore, kjer se pojavijo tako tlačne kot natezne napetosti.



Slika 54: Prikaz strižnih napetosti S12 diagonalno usmerjenega sloja v N/mm pri obremenitvi s silo 250 kN.

Na sliki 54 lahko opazimo, da do največjih strižnih napetosti prihaja v območju vnosa obtežbe, ki je levi zgornji vogal in ob togih podporah, ki sta pozicionirane na spodnjem levem in desnem vogalu. Prav tako lahko opazimo, da se v spodnji levi polovici pojavljajo predvsem negativne strižne napetosti, medtem ko pa se v zgorni desni polovici modela pojavljajo predvsem pozitivne strižne napetosti.

Odziv iQwood elementov različnih dolžin na horizontalno obtežbo

Eksperimentalne preiskave iQwood elementov, so bile izvedena na preizkušancih dolžine 2,4 m, ki so se strižno deformirali. Zato lahko sklepamo, da se bodo tudi v praksi dolge stene oziroma stene daljše od 2,4 m strižno deformirale. Ker pa v praksi objekti poleg dolgih sten vsebujejo tudi kratke, nas zanima tudi obnašanje kratkih sten. Zato so bile s programom SAP 2000 [2] izvedene numerične analize tudi za stene dolžine 48 cm, 96 cm, 144 cm in 192 cm. S primerjavo oblike deformacije iQwood elementov različnih dolžin lahko vidimo, kdaj v elementu začnejo prevladovati upogibne deformacije.



Slika 55: Prikaz deformacij iQwood panela tipa A pri enaki horizontalni obremenitvi 80 kN in različni dolžini.

Na podlagi slike 55 lahko primerjamo obliko deformacij iQwood panelov različnih dolžin. Opazimo lahko, da ima daljša stena na levi strani slike 55 izrazito strižno deformacijo, medtem ko pa ima kratka stena na desni strani izrazito upogibno deformacijo. Razlog, za takšno obnašanje je bistveno večja upogibna togost daljših sten. V primeru dolgih sten je upogibna togost stene tako velika, da do upogibnih deformacij praktično ne prihaja, medtem ko pa je v primeru kratkih sten le-ta tako majhna, da se v elementu pojavijo le upogibne deformacije.

Uklonska analiza

Uklonska analiza je bila prav tako izvedena na elementih enakih dimenzij, kot so bili testirani na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Uklonski testi so se izvajali na elementih dimenzije 150 cm x 280 cm.



Slika 56: Primerjava računskih (levo) in eksperimentalnih (desno) uklonskih oblik.

Kot je razvidno iz slike 56, pride tako pri računskih kot eksperimentalnih analizah do enakega tipa uklonske porušitve. Le-ta nastopi, ko obremenitev elementa doseže kritično uklonsko obremenitev, ki pa se razlikuje glede na tip iQwood elementa in je predstavljena v nadaljevanju.



Grafikon 9: Primerjava numerične in eksperimentalne kritične uklonske sile.

$$F_{krit} = k_{krit} \cdot F_{v} \tag{12}$$

Kjer F_{krit} predstavlja kritično uklonsko silo, k_{krit} kritični uklonski faktor in F_v vertikalno obremenitev elementa.

Kot je razvidno na grafikonu 9, se eksperimentalna in numerična uklonska sila precej dobro ujemata, iz česar lahko sklepamo o ustreznosti numeričnega modela.

Upogibna analiza

V sklopu upogibne analize sta bila izdelana dva računska modela prostoležečih plošč s programom SAP 2000 [2]. Zaradi potrditve ustreznosti računskega modela so bile najprej izvedene analize elementa enakih dimenzij, kot je bil preizkušanec na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Ker pa nas zanima tudi obnašanje elementov drugačnih dimenzij, je bil izdelan še model elementa debeline 150 mm. Tako so bile računske analize izvedene na elementih širine 100 cm, dolžine 540 cm in debeline 21 cm oziroma 15 cm. Model obremenjevanja numeričnega modela je bil enak načinu obremenjevanja pri eksperimentalnih preiskavah. Tako smo v numeričnem modelu na pozicijah točk B in C, ki sta prikazana na sliki 57, vsiljevali pomike (*w*). Pomik, ki smo ga vsiljevali, je bil enak pomiku, ki ga je iQwood element dosegal v teh točkah pri eksperimentalnih preiskavah. Posledično je bil rezultat upogibne analize sila v točki B in C, ki je bila potrebna za dosego pomika 16 mm. Tako pri eksperimentalnih kot numeričnih analizah je bil ciljni pomik na sredini razpona (točka A) 18 mm, ki je maksimalni dovoljeni pomik glede na pogoj L/300. Primerjava numeričnih in eksperimentalnih rezultatov je prikazana na grafikonu 10.



Slika 57: Model obremenjevanja upogibnega numeričnega modela iQwood elementa.

Grafikon 10 prikazuje krivulje sila-pomik za iQwood elemente pri upogibni obremenitvi. Iz primerjave numeričnih in eksperimentalnih rezultatov za element tipa E210 lahko potrdimo ustreznost numeričnega modela, saj se krivulji eksperimentalnih in numeričnih rezultatov na grafikonu 10 dobro ujamejo. Poleg tega lahko iz grafikona razberemo, da iQwood element tipa E150 ciljni pomik 18 mm na sredini razpona doseže pri bistveno manjši obremenitvi kot element tipa E210.



Grafikon 10: Primerjava pomikov iQwood elementov pri upogibni obremenitvi.





Slika 58: Deformacije (v milimetrih) iQwood panela tipa E 210 pri vsiljenem pomiku 16 mm.

Slika 59: Deformacije (v milimetrih) iQwood panela tipa E 150 pri vsiljenem pomiku 16 mm.

Sliki 58 in 59 prikazujejo deformacije iQwood elementov tipa E210 in E150, opazimo lahko, da na mestu šestih zelenih točk na sredini elementa, kjer smo vsiljevali pomik, prihaja do željenega pomika 16 mm. Prav tako pa lahko opazimo, da željeni pomik dosežemo točno na sredini razpona, kjer pomiki znašajo 18 mm.

4 POSTOPKI ZA PROJEKTIRANJE IQWOOD ELEMENTOV

Obnašanje iQwood elementov pri različnih obremenitvah, prenos notranjih sil, deformacije in požarna odpornost je močno odvisna od trdnosti in togosti povezave posameznih lamel v celoto. Kljub temu, da so leseni mozniki pogosto uporabljeni za povezovanje elementov, je literatura, ki obravnava takšen sistem povezave in gradnje, precej omejena. Zato se za lesene moznike uporabljajo enake metode kot pri kovinskih veznih sredstvih. Za izračun karakteristik iQwood sistemov pa se uporabljajo posplošeni postopki po standardu SIST EN 1995-1-1: 2005 [1].

4.1 Predpostavke

Za računsko analizo elementov sestavljenih prečnih prerezov, kjer so posamezne komponente prereza medsebojno povezane z mehanskimi veznimi sredstvi, uporabimo nekatere predpostavke za izračun materialnih in geometrijskih karakteristik elementov. V primeru iQwood elementov veljajo enake temeljne predpostavke kot pri nesestavljenih nosilcih, s to razliko, da je potrebno upoštevati tudi zdrse v priključenih ravninah. Posledično Bernoullijeva hipoteza velja le za vsak sestavni element posebej.

Glede na standard SIST EN 1995-1-1: 2005 [1] za račun iQwood elementov uporabimo enak računski model kot za izračun sestavljenih linijskih elementov. Ta predpisuje uporabo tako imenovanega gama postopka, kjer s koeficientom togosti priključene ravnine (γ_i) reduciramo vztrajnostni moment mehansko priključenih lamel. Standard zajema le podajnost kovinskih veznih sredstev, zato je bila v primeru iQwood elementov podajnost lesenih veznih sredstev (moznikov) določena z eksperimentalnimi preiskavami izvedenimi na Zavodu za gradbeništvo Slovenija [11], [13]. Glede na strokovno poročilo profesorja dr.-ing. H. J. Blaβa [15], znaša togost veznega sredstva v mejnem stanju uporabnosti (K_{ser}) za en moznik v eni priključeni ravnini 1500 N/mm. Ker pa lesene konstrukcije in vse pripadajoče zveze po Evrokodu 5 [1] dimenzioniramo s projektnimi obremenitvami po mejnem stanju nosilnosti, so zamiki v priključenih ravninah temu primerno večji. Posledično je potrebno upoštevati neko fiktivno reducirano vrednost za modul pomika v mejnem stanju nosilnosti (K_u). Evrokod 5 [1] priporoča redukcijo začetne togosti veznega sredstva za 1/3, torej znaša modul pomika v mejnem stanju nosilnosti 1000 N/mm.

4.2 Materialne karakteristike preizkušancev

S slojevitim sestavljanjem različno orientiranih osnovnih lesenih elementov končnemu produktu izboljšamo materialne karakteristike. Ker pa izboljšanih materialnih karakteristik iQwood elementa ne poznamo, se odločimo za predpostavko in v izračunu uporabljamo karakteristike lesa trdnostnega razreda C24.

Obravnavani iQwood elementi poleg horizontalno in vertikalno usmerjenih slojev vsebujejo tudi diagonalno usmerjene sloje. Le-to pomeni, da moramo poznati tudi materialne karakteristike tako usmerjenih slojev. Na podlagi enačbe (13) in (14) lahko izračunamo tlačno trdnost in ocenimo elastični modul lesa pri obtežbi pod poljubnim kotom glede na smer vlaken.

Tlak – pod poljubnim kotom:

$$f_{c,\phi,k} = \frac{f_{c,0,k}}{\frac{f_{c,0,k}}{k_{c90} \cdot f_{c,90,k}} \cdot \sin(\phi)^2 + \cos(\phi)^2}$$
(13)

Koeficient k_{c90} zajema vpliv lege obtežbe, možnost razpokanja lesa in nivo tlačnega deformiranja. V našem primeru gre za ugoden vpliv večosnega napetostnega stanja in lahko upoštevamo $k_{c90} = 1,0$.

Elastični modul – pod poljubnim kotom:

$$E_{\phi} = \left[\frac{\cos^4\phi}{E_{0,mean}} + \left(\frac{1}{G_{0,mean}} - \frac{2\cdot\nu}{E_{0,mean}}\right) \cdot \cos^2\phi \cdot \sin^2\phi + \frac{\sin^4\phi}{E_{90,mean}}\right]^{-1}$$
(14)

Elastični modul – v smeri vlaken lesa ($E_{0,mean}$):	11000	N/mm ²
Elastični modul – v smeri pravokotno na vlakna (E90,mean):	370	N/mm ²
Elastični modul – pod kotom 45° glede na vlakna ($E_{45,mean}$):	580	N/mm ²
Strižni modul (G _{0,mean}):	690	N/mm ²
Strižni modul (G90,mean):	69	N/mm ²
Upogib $(f_{m,k})$:	24	N/mm ²
Nateg – v smeri vlaken ($f_{t,0,k}$):	14,5	N/mm ²
Nateg – v smeri pravokotno na vlakna ($f_{t,90,k}$):	0,4	N/mm ²
Tlak – v smeri vlaken ($f_{c,0,k}$):	21	N/mm ²
Tlak – v smeri pravokotno na vlakna ($f_{c,90,k}$):	2,5	N/mm ²
Tlak – pod kotom 45° glede na vlakna ($f_{c,45,k}$):	4,5	N/mm ²
Strig $(f_{v,d})$:	4	N/mm ²
Poissonov koeficient (ν):	0,3	/

4.3 Geometrijske karakteristike

Za izračun geometrijskih karakteristik elementov s sestavljenimi prerezi, kot so iQwood elementi, standard SIST EN 1995-1-1: 2005 [1] predpisuje uporabo gama metode. Efektivni vztrajnostni moment za določeno slojevitost elementa lahko izračunamo na podlagi enačb (15 - 17). Pri izračunu efektivnega vztrajnostnega momenta niso bili upoštevani sloji katerih orientacija lamel je prečno oziroma diagonalno glede na glavno nosilno smer elementa. Omenjenih slojev nismo upoštevali zaradi bistveno manjšega elastičnega modula tako usmerjenih lamel proti elastičnemu modulu vzporedno z vlakni.

Efektivni vztrajnostni moment 3-slojnega elementa:

$$I_{y3,ef} = \sum_{i=1}^{N=3} I_{y,i}^{(0)} + A_1 \cdot z_1^2 \cdot \gamma_{y1} + A_3 \cdot z_3^2 \cdot \gamma_{y3}$$
(15)

Efektivni vztrajnostni moment 4-slojnega elementa:

$$I_{y4,ef} = \sum_{i=1}^{N=4} I_{y,i}^{(0)} + A_1 \cdot z_1^2 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_{y_1}} + \frac{1}{\gamma_{y_2}}\right)^{-1} + A_4 \cdot z_4^2 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_{y_2}} + \frac{1}{\gamma_{y_3}}\right)^{-1}$$
(16)

Efektivni vztrajnostni moment 5-slojnega elementa:

$$I_{y5,ef} = \sum_{i=1}^{N=5} I_{y,i}^{(0)} + A_1 \cdot z_1^2 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_{y_1}} + \frac{1}{\gamma_{y_2}}\right)^{-1} + A_5 \cdot z_3^2 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_{y_3}} + \frac{1}{\gamma_{y_4}}\right)^{-1}$$
(17)

Kjer kratica $I_{y,i}^{(0)}$ pomeni lastni vztrajnostni moment *i*-tega elementa okoli njegove lokalne težiščne osi y_i , A_i pomeni površino prečnega prereza *i*-tega elementa, z_i pomeni oddaljenost lokalne težiščne osi elementa y_i od obravnavane globalne osi in γ_{yi} pomeni koeficient togosti priključne ravnine, kjer priključna ravnina predstavlja ravnino med dvema slojema različno orientiranih lamel.



Slika 60: Grafični prikaz 3, 4 in 5 slojnega prereza.

Koeficient togosti priključene ravnine izračunamo po enačbi (18).

$$\gamma_{yi} = \frac{1}{1+k_{y,i}} = \frac{1}{1+\frac{\pi^{2} \cdot E_{m,prip} \cdot A_{prip} \cdot S_{ef,i}}{K_i \cdot L_{ef}^2}}$$
(18)

$$\gamma_{yi,j} = \left(\frac{1}{\gamma_{yi}} + \frac{1}{\gamma_{yj}}\right)^{-1} \tag{19}$$

V enačbi (18) kratica $s_{ef,i}$ pomeni efektivno računsko razdaljo med veznimi sredstvi, $E_{m,prip}$ pomeni elastični modul sloja, ki je povezan s priključno ravnino *i* (glej sliko 60), A_{prip} pomeni površino sloja, ki je povezan s pripadajočo priključno ravnino (slika 60), K_i pomeni togost veznega sredstva (K_{ser} ali K_u odvisno od mejnega stanja) in L_{ef} pomeni efektivno razdaljo celotnega elementa med podporami (v primeru uklona je ta razdalja enaka uklonski dolžini elementa). Zaradi neenakosti števila moznikov v strižnih ravninah štiri in pet slojnih prerezov je potrebno seštevanje gama koeficientov po principu enačbe (19).

Vrednost koeficienta gama se giblje med 0 in 1. Vrednost 0 pomeni, da so zdrsi v priključeni ravnini neomejeni oziroma da ni veznih sredstev, ki bi preprečevala zdrs oziroma zamik med sestavnimi elementi. Vrednost 1 pa pomeni, da so zdrsi v priključeni ravnini popolnoma preprečeni, kar je možno doseči le v primeru lepljenih stikov.

Zaradi različne slojevitosti in orientacije posameznih slojev iQwood elementov, se njihove geometrijske karakteristike razlikujejo. Na geometrijske karakteristike prav tako vpliva način mozničenja, ki povezuje po tri sloje lamel. Zato se pri elementih debelejših od 90 mm število moznikov v posameznih strižnih ravninah elementa razlikuje. Na podlagi preglednice 9 lahko enostavno izračunamo število moznikov v posamezni strižni ravnini za iQwood elemente poljubnih dimenzij.

Tip elementa Debelina [cm]		Širina (<i>b1</i>) [cm]	Višina (<i>h</i> 1) [cm]	St. Moznikov na strižno ravnino (<i>n</i>)	
A90	9	100	100	178	
B90	9	100	100	91	
C90	9	100	100	169	
D90	9	100	100	91	
E150	15	100	100	74, 165, 113, 78	

Preglednica 9: Število moznikov v strižnih ravninah posameznega elementa.

Izračun števila moznikov v posamezni strižni ravnini je prikazan z enačbo (20).

$$N = \frac{n \cdot b \cdot h}{b_1 \cdot h_1} \tag{20}$$

V enačbi (20), oznaka N pomeni število moznikov v ravnini širine b in višine h. Oznaka n pa predstavlja število moznikov osnovnega elementa širine b_1 in višine h_1 .

Izračun efektivne računske razdalje med veznimi sredstvi je prikazan z enačbo (21):

$$s_{ef} = \frac{L_{ef}}{N} \tag{21}$$

Kjer N predstavlja število moznikov elementa širine b in višine h, L_{ef} pa predstavlja efektivno razdaljo med podporami.

V preglednici 10 je prikazan izračun geometrijskih karakteristik elementov enakih dimenzij, kot elementi, ki so bili testirani na Zavodu za gradbeništvo Slovenije.

Tip elementa		A90	B90	C90	D90	E150
Širina	<i>b</i> [mm]	1500	1500	1500	1500	1500
Višina	<i>h</i> [mm]	2800	2800	2800	2800	2800
Debelina	<i>d</i> [mm]	90	90	90	90	150
Skupna debelina vertikalnih slojev	d_v [mm]	60	60	45	60	90
Bruto prerez	A _{bruto} [mm ²]	13,5 · 10 ⁴	13,5 · 10 ⁴	13,5 · 10 ⁴	13,5 · 10 ⁴	22,5 · 10 ⁴
Neto prerez	A_{neto} [mm ²]	$9\cdot 10^4$	$9\cdot 10^4$	6,75 · 10 ⁴	$9\cdot 10^4$	13,5 · 10 ⁴
Razdalja med mozniki	<i>s_{ef}</i> [mm]	3,75	7,33	3,95	7,33	9,03; 4,04; 5,91; 8,56
Efektivna razdalja med podporami	L _{ef} [mm]	2800	2800	2800	2800	2800
Togost veznega sredstva	<i>K_i</i> [N/mm]	1000	1000	1000	1000	1000
Koeficient gama	γ_i [/]	0,30	0,18	0,18	0,18	0,10; 0,09
Efektivni vztrajnostni moment	I_{ef} [mm ⁴]	3,44 • 10 ⁷	2,47 • 10 ⁷	2,79 • 10 ⁷	2,47 • 10 ⁷	5,98 · 10 ⁷
Oddaljenost sloja od težišča prereza	<i>z</i> [mm]	45	45	45	45	75
Efektivni odpornostni moment	W_{ef} [mm ³]	7,65 · 10 ⁵	5,48 · 10 ⁵	6,20 · 10 ⁵	5,48 · 10 ⁵	7,97 · 10 ⁵

Preglednica 10: Geometrijske karakteristike iQwood elementov dimenzije 150/280 cm.

V preglednici 10 bruto prerez iQwood elementa predstavlja površino celotnega prereza, medtem ko pa neto prerez predstavlja površino vertikalno usmerjenih slojev. Ti dve količini lahko določimo z enačbami (22) in (23):

$$A_{bruto} = b \cdot d \tag{22}$$

$$A_{neto} = b \cdot d_v \tag{23}$$

4.4 Obremenitve v ravnini elementa

Na posamezen križno sestavljen element lahko v njegovi ravnini delujejo vertikalne in horizontalne obremenitve, primer je prikazan na sliki 61. Odpornost posameznega elementa na različne obremenitve pa je odvisna tako njegovih materialnih in geometrijskih karakteristik kot od dimenzij ter podpor elementa.



Slika 61: Primer obremenitve stenskega elementa v svoji ravnini.

Prenos obtežbe pri vertikalni obremenitvi

Obravnavani križno sestavljeni elementi so najpogosteje vertikalno obremenjeni, ko opravljajo funkcijo sten. Le-te imajo po navadi veliko višino v primerjavi z debelino, kar pomeni, da so stene vitki elementi pri katerih lahko tlačne obremenitve privedejo do izgube stabilnosti elementa oziroma do njegovega uklona še preden je dosežena tlačna trdnost lesa. Glede na enačbo (24) lahko izračunamo obremenitev oziroma kritično uklonsko silo (F_{krit}), ki privede do izgube stabilnosti elementa.

$$F_{krit} = \frac{\pi^{2} \cdot E \cdot I_{ef}}{L_{ef}^{2}} \tag{24}$$

Iz enačbe (24) lahko vidimo, da je uklonska nosilnost elementa odvisna od elastičnega modula materiala E, efektivnega vztrajnostnega momenta prereza I_{ef} in efektivne uklonske dolžine L_{ef} , ki je odvisna od višine elementa in načina vpetja.

Do razlike uklonskih nosilnosti križno sestavljenih elementov, kot so iQwood, X – Lam, MHM in Thoma 100, prihaja zaradi različnih efektivnih vztrajnostnih momentov. Vsi navedeni produkti imajo sestavljene prereze, ki vsebujejo različno usmerjene sloje lamel. To posledično pomeni, da različno orientirani sloji ne prispevajo k uklonski nosilnosti v enaki meri, saj sta tlačna trdnost lesa in elastični modul v smeri vzporedno z vlakni bistveno večja kot tlačna trdnost in elastični modul pravokotno na vlakna lesa. Tako lahko rečemo, da večino vertikalne obtežbe prevzamejo vertikalno usmerjeni sloji. Posamezni križno lepljeni in križno mozničeni sistemi se razlikujejo predvsem v načinu povezave posameznih lamel v celoto. Vztrajnostni moment posameznega elementa je odvisen predvsem od togosti povezave posameznih slojev in oddaljenostjo posameznega sloja od težišča prereza. Največjo togost tako dosegajo lepljeni stiki, medtem ko pa je togost pri povezavi lamel z kovinskimi ali lesenimi veznimi sredstvi bistveno manjša. Zato je pri takšnih elementih potrebna bistveno večja debelina posameznih slojev za doseganje rezultatov, primerljivih z elementi, ki imajo lepljene stike lamel.

Izračun uklonske nosilnosti

Na podlagi materialnih in geometrijskih karakteristik, predstavljenih v predhodnih poglavjih, lahko določimo uklonsko nosilnost posameznih iQwood elementov. Glede na standard SIST EN 1995-1-1: 2005 [1] se nevarnost uklona tlačenih elementov upošteva preko uklonskega koeficienta (k_c), ki pa je odvisen od relativne vitkosti elementa (λ_{rel}). Ker so tlačno obremenjeni večinoma stenski iQwood elementi, ki imajo dolžino bistveno večjo od svoje debeline, lahko relativno vitkost preverjamo le okoli šibke vztrajnostne osi. Izraz za relativno vitkost je izpeljan iz Eulerjeve enačbe za kritično napetost in vsebuje, tako materialne, kot geometrijske karakteristike. V odvisnosti od relativne vitkosti določimo uklonski koeficient, pri čemer geometrijske nepopolnosti zajamemo preko koeficienta β_c , ki pa je odvisen od vrste lesa. V primeru iQwood elementov predpostavimo enak koeficient β_c kot v primeru lepljenega lesa ($\beta_c = 0, 1$). Postopek izračuna uklonske nosilnosti je prikazan z enačbami od (25 – 30):

- Vztrajnostni radij: $i = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{net}}},$ (25)
- Vitkost: $\lambda = \frac{L_{ef}}{i}$, (26)
- Relativna vitkost: $\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}},$ (27)
- Koeficient k: $k = 0.5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} 0.3) + \lambda_{rel}^2],$ (28)
- Uklonski koeficient: $k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 \lambda_{rel}^2}},$ (29)
- Uklonska nosilnost: $N_{b,k} = k_c \cdot f_{c,0,k} \cdot A_{neto}.$ (30)

Tip elementa		A90	B90	C90	D90	E150	
Širina	<i>b</i> [mm]	1500	1500	1500	1500	1500	
Višina	<i>h</i> [mm]	2800	2800	2800	2800	2800	
Debelina	<i>d</i> [mm]	90	90	90	90	150	
Uklonska dolžina	$L_{ef}[mm]$	2800	2800	2800	2800	2800	
Ef. vzrajnostni	L_{ef} [mm ⁴]	$3.44 \cdot 10^{7}$	$2.47 \cdot 10^{7}$	$2.79 \cdot 10^{7}$	$2.47 \cdot 10^{7}$	$5.98 \cdot 10^{7}$	
moment	Iej [IIIII]	5,77 10	2,77 10	2,7 7 10	2,77 10	5,70 10	
Uklonski	<i>l</i> -[/]	0.22	0.15	0.21	0.15	0.10	
koeficient	~[/]	0,22	0,15	0,21	0,15	0,19	
Uklonska	N _{b,k}	408	283	201	283	530	
nosilnost	[kN]	400	203	291	203	559	

Preglednica 11: Izračun uklonske nosilnosti iQwood elementov dimenzije 150/280 cm.

V zgornji preglednici 11 so prikazane izračunane karakteristične vrednosti uklonske nosilnosti iQwood elementov enakih, dimenzij, kot so bili testirani na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Ker je elastični modul pod kotom 90° ter pod kotom 45° glede na vlakna lesa bistveno manjši elastičnega modula lesa vzporedno z vlakni lesa, lahko vpliv horizontalnih in diagonalnih slojev na uklonsko nosilnost zanemarimo. Tako so pri izračunu uklonske nosilnosti predstavljene v preglednici 10 upoštevani le
vertikalni sloji posameznega tipa iQwood elementov. Opazimo lahko, da največjo uklonsko nosilnost doseže element tipa E150, ki je tudi najdebelejši in ima največ vertikalno usmerjenih plasti, poleg tega pa opazimo, da imajo elementi tipa B90, C90 in D90 približno enako uklonsko nosilnost. Iz rezultatov je dobro razviden pomen razporeditve moznikov, ter orientiranosti slojev. Elementa tipa A90 in D90 se razlikujeta le v razporeditvi moznikov, vendar je razlikujeta le v orientaciji sredinskega sloja pa lahko opazimo, da prihaja le do minimalnih razlik v uklonski nosilnosti. Elementi tipa B90 in D90, ki se razlikujeta le v orientaciji sredinskega sloja pa lahko opazimo, da prihaja le do minimalnih razlik v uklonski nosilnosti. Elementi tipa B90 in D90, doseže večjo uklonsko nosilnost kot omenjeni elementi. Tako vidimo, da je uklonska nosilnost odvisna predvsem od količine vertikalno orientiranih slojev in gostote mozničenja oziroma togosti povezave posameznih slojev v celoto.

Prenos obtežbe pri horizontalni obremenitvi

Objekti so lahko tekom svoje življenjske dobe izpostavljeni različnim obremenitvam, kot sta recimo veter in potres, ki povzročata nastanek horizontalnih obremenitev v stenskih elementih. Takšno obtežbo lahko razdelimo na torzijske momente, ki delujejo v težišču posameznih stičnih ploskev. V primeru X – Lam elementov to obtežbo prevzemamo z lepljenim stikom, ki povzroči nastanek strižnih napetosti na stični ploskvi. Le-te naraščajo od težišča proti robovom in porušitev stika ne nastopi ob porušitvi lepila, ampak ko popustijo lesna vlakna v smeri pravokotno na smer strižne obremenitve. V primeru iQwood elementov, pa momentno odpornost posamezne stične ploskve zagotavljamo z mozniki, ki povezujejo sloje lamel med seboj. Tako je nosilnost in podajnost stične ploskve, in posledično celotnega elementa odvisna od:

- Števila moznikov na posamezno stično ploskev;
- Razporeditev moznikov po stični ploskvi;
- Števila priključenih ravnin.

Večji kot je razmik med veznimi sredstvi, večja je togost posameznega elementa. Vendar je širina lamel zaradi izkoristka lesa pri razrezu omejena, in tako pri iQwood elementih znaša 160 mm. Na togost bistveno vpliva tudi število slojev, ki jih moznik povezuje oziroma količina strižnih stikov, ki jih tvori moznik po prerezu stene, tako več strižnih stikov pomeni večjo togost. Podobno kot vertikalnim obremenitvam so tudi horizontalnim obremenitvam v ravnini najpogosteje izpostavljeni stenski elementi.



Slika 62: Slika (a) prikazuje odziv na torzijsko obremenitev pri lepljenem stiku, slika (b) pa pri mozničenem stiku.

Kot je prikazano na sliki 62, se pri strižni obremenitvi iQwood panela, v strižnih ploskvah pojavi torzijska obremenitev. To torzijsko obremenitev prevzemamo z mozniki, na katere zaradi različne oddaljenosti od težišča stične ploskve delujejo različne strižne sile. Prav tako mozniki, ki so na robovih stičnih ploskev prevzemajo obremenitve dveh stičnih ploskev.

Izračun strižne nosilnosti moznikov

Kot omenjeno, je momentna odpornost stičnih ploskev pri iQwood elementih odvisna od količine in razporeditve moznikov po stični ploskvi ter njihove strižne nosilnosti. Tako moramo za določitev strižne nosilnosti iQwood elementov najprej poznati strižno nosilnost posameznega moznika. Ker je literatura, ki se nanaša na uporabo nekovinskih veznih sredstev v leseni gradnji sorazmerno omejena je analiza takšnih povezav običajno izvedena po metodah predpisanih za kovinska vezna sredstva. To pomeni, da predpostavimo enako podajnost lesenih in kovinskih moznikov, kar pa v celoti ne drži, saj je upogibna deformacija lesenih moznikov večja od kovinskih. Ker pa se večina vtiska formira v mehkejšem materialu, torej v lamelah, to zmanjšuje napako zaradi napačne predpostavke o moznikih.

Strižna nosilnost veznih sredstev je tako odvisna od več dejavnikov, saj je lahko merodajni kriterij porušitve lesa v kontaktni ravnini ali pa deformacija veznega sredstva. Na odločujoč kriterij strižna nosilnosti vpliva tako vrsta in dimenzija veznega sredstva kot tudi strižna trdnost lesa in kvaliteta materiala, iz katerega je vezno sredstvo. Prav tako pa na nosilnost veznega sredstva pomembno vpliva tudi vrsta zveze in število priključenih ravnin, skozi katere poteka vezno sredstvo. Evrokod 5 [1] tako določa bočno nosilnost veznega sredstva s tako imenovanimi Johansenovimi izrazi. V primeru iQwood elementov moznik vedno povezuje tri sloje lamel, kar pomeni, da obravnavamo zvezo z dvema priključenima ravninama oziroma dvostrižno zvezo. Glede na omenjeno se moznik lahko poruši na pet različnih načinov, ki so prikazani na sliki 63.



Slika 63: Prikaz možnih porušitev moznika.

Izračun bočne nosilnosti moznika pri različnih možnostih porušitve na podlagi Evrokoda 5 [1]:

I. <u>Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v zunanjem sestavnem elementu.</u> Bočna nosilnost veznega sredstva je določena z enačbo (31), kjer $f_{h,1,k}$ predstavlja bočno trdnost lesa v zunanjem sestavnem elementu, t_1 predstavlja debelino zunanjega sloja in *d* predstavlja premer moznika.

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \tag{31}$$

II. <u>Bočna porušitev lesa okoli veznega sredstva v srednjem sestavnem elementu.</u>

Karakteristična bočna nosilnost moznika je podana z enačbo (32), kjer $f_{h,2,k}$ predstavlja bočno trdnost lesa v notranjem sestavnem elementu, *t2* predstavlja debelino notranjega sloja in *d* predstavlja premer moznika. Ker produkt bočne trdnosti lesa in kontaktne površine pod plaščem moznika predstavlja bočno silo za obe priključni ravnini, moramo izraz zmanjšati za faktor 0,5.

$$F_{\nu,Rk} = 0.5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \tag{32}$$

III. <u>Upogib veznega sredstva v srednjem sestavnem elementu.</u>

Pri tem napetostnem kriteriju upogibni moment, ki zaradi kontaktnih napetosti obremenjuje vezno sredstvo v sredinskem elementu, doseže vrednost upogibnega momenta, ki povzroči plastično deformacijo lesenega moznika. Bočno nosilnost moznika pri tem porušitvenem mehanizmu določimo z enačbo (33).

$$F_{\nu,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{(2+\beta)} \cdot \left[\sqrt{2\beta \cdot (1+\beta) + \frac{4\beta \cdot (2+\beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$
(33)

IV. <u>Upogib veznega sredstva v vseh treh sestavnih elementih.</u> Obravnavamo primer, ko se moznik v obeh elementih plastično deformira. Pri takšnem porušitvenem mehanizmu karakteristično bočno nosilnost moznika določimo po enačbi (34).

$$F_{\nu,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{(1+\beta)}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{\nu,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$
(34)

V. <u>Kombinacija upogiba in striga pravokotno na smer vlaken moznika.</u> Obravnavamo enak primer kot v primeru IV, le da upoštevamo še strižno deformacijo moznika. Tako bočno nosilnost določimo po enačbi (35).

$$F_{\nu,Rk} = 2.3 \cdot \sqrt{M_{\nu,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$
(35)

V enačbah $(31 - 33) \beta$ predstavlja razmerje bočnih trdnosti v sredinskem in zunanjih elementih, $F_{ax,Rk}$ predstavlja izvlečno nosilnost veznega sredstva in jo v praksi običajno zanemarimo, $M_{y,Rk}$ predstavlja karakteristični upogibni moment plastifikacije veznega sredstva, ki ga izračunamo po enačbi (36), $f_{h,k}$ pa predstavlja karakteristično bočno trdnost lesa in jo določimo z enačbo (37).

$$M_{y,Rk} = \frac{f_{m,k}}{600} \cdot 180 \cdot d^{2,6} \tag{36}$$

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \tag{37}$$

Preglednica (12) prikazuje karakteristično bočno nosilnost moznika trdnostnega razreda D30, pri zgoraj navedenih možnih načinih porušitve.

	Ι	II	Ш	IV	V
<i>d</i> [mm]	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
$\rho_k [\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3]$	420	420	420	420	420
$M_{y,Rk}$ [Nmm]	4811	4811	4811	4811	4811
<i>f</i> _{<i>h</i>,1,<i>k</i>} [N/mm ²]	30,58	30,58	30,58	30,58	30,58
<i>f</i> _{<i>h</i>,2,<i>k</i>} [N/mm ²]	30,58	30,58	30,58	30,58	30,58
β	1	1	1	1	1
$F_{v,Rk}$ [kN]	10,28	3,38	3,76	1,69	2,40

Preglednica 12: Karakteristična bočna nosilnost moznika pri različnih porušitvah.

Kot lahko vidimo iz preglednice 12 je merodajni porušitveni mehanizem IV, kjer se pojavi upogib veznega sredstva v vseh treh elementih. Tako znaša merodajna bočna nosilnost moznika v eni strižni ravnini 1,69 kN. Zaradi napačne začetne predpostavke o obnašanju lesenih moznikov je v Evropski tehnični oceni [5] podana zmanjšana vrednost bočne nosilnosti, zato je v nadaljnjih izračunih uporabljena predlagana bočna nosilnost 1,40 kN.

Izračun strižne nosilnosti

Za zagotovitev zadostne horizontalne stabilnosti objekta v primeru potresa ali pri delovanju vetrne obtežbe, moramo poznati strižno nosilnost posamezne stene v svoji ravnini. Pri izračunu obravnavamo konzolno steno, ki je na zgornjem robu obremenjena s horizontalno točkovno silo, kot je prikazano na sliki 64. Pri iQwood elementih se zaradi njihove specifične sestave te obremenitve preko moznikov prenašajo po diagonalno, horizontalno in vertikalno usmerjenih slojih. Tako lahko celotno iQwood steno razdelimo na več momentno odpornih stičnih ploskev. Če predpostavimo, da na vsako stično ploskev deluje enak delež celotne momentne obremenitve stene, lahko na podlagi števila moznikov, njihove oddaljenosti od težišča stične ploskve in bočne nosilnosti posameznega moznika določimo momentno odpornost posamezne stične ploskve. V nadaljevanju je predstavljen splošen postopek izračuna strižne odpornosti iQwood panela.



Slika 64: Prikaz prenosa horizontalnih obremenitev iQwood stene.

Mozniki znotraj stične ploskve lahko prevzemajo strižno silo velikosti $F_{r,1}$, medtem ko lahko mozniki na stiku med lamelami prevzemajo le polovico te sile, saj nanje delujejo strižne sile dveh sosednjih strižnih ploskev. Tako lahko na podlagi bočne nosilnosti posameznega moznika in razporeditve moznikov po stični ploskvi določimo momentno odpornost stične ploskve po enačbi (38).

$$M_{Rd,1} = n \cdot r_{max} \cdot F_{r,1} + m \cdot r_2 \cdot F_{r,2} \tag{38}$$

V enačbi (38) kratica *n* pomeni število moznikov odpornosti $F_{r,1}$, *m* pomeni število moznikov odpornosti $F_{r,2}$, r_{max} in r_2 predstavljata razdaljo od težišča stične ploskve do moznika.

Izračun momentne odpornosti celotnega iQwood panela pa je določen s spodnjo enačbo (39).

$$M_{Rd} = s \cdot M_{Rd,1} \tag{39}$$

Kjer s pomeni število stičnih površin.

IQwood stenski panel ima zadostno strižno odpornost, če je njegova momentna odpornost večja od momentne obremenitve, torej morajo zadostiti spodnji neenačbi (40).

$$|M_{Ed}| \le |M_{Rd}| \tag{40}$$

Tip elementa		A90	B90	C90	D90	E150	
Širina	<i>b</i> [cm]	240	240	240	240	240	
Višina	<i>h</i> [cm]	270	270	270	270	270	
Debelina	<i>d</i> [cm]	9	9	9	9	15	
Število stičnih	с [/]	480	357	536	506	960	
ploskev	5 [7]	100	557	550	500	700	
Strižna odpornost	E [kN]	1 54	1.54	1 54	1 54	1 54	
moznika 1		1,54	1,54	1,54	1,54	1,57	
Strižna odpornost	En a [kN]	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	
moznika 2	$r_{,2}$ [$r_{,1}$]	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	
Ročica 1	r_l [cm]	9,9	15,52	15	8,48	7,81	
Ročica 2	<i>r</i> ₂ [cm]	8	10,19	11,42	8,16	8,16	
Ročica 3	<i>r</i> ₃ [cm]	/	6,43	6,43	/	8	
Ročica 4	<i>r</i> ₄ [cm]	/	12,56	8,69	/	/	
Momentna	MarkNem	27209	28110	34280	12966	24277	
odpornost panela		21207	20110	57200	12700	27277	
Strižna odpornost	F_{k} [kN]	100	104	127	48	90	
panela		100	107	14/	0	20	

Preglednica 13: Izračun strižne nosilnosti iQwood elementov dimenzije 240/270 cm.

V preglednici 13 so prikazane izračunane vrednosti strižne nosilnosti iQwood elementov enakih, dimenzij kot so bili testirani na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Po Evrokodu 5 [1] je v izračunu uporabljen delni varnostni faktor (γ_m) za nezgodne kombinaije, hkrati pa je upoštevana vrednost modifikacijskega faktorja (k_{mod}) pri trenutnem razredu trajanja obtežbe.

Izračun strižne podajnosti

Pri elementih izpostavljenih strižni obremenitvi moramo poleg nosilnosti preverjati tudi horizontalne pomike. Le-ti so pri lesenih stenah odvisni od deformacij sidrnih elementov ter od strižnih in upogibnih deformacij same stene. Ker nas v sklopu te naloge zanimajo le deformacije iQwood stene, v izračunu pomikov niso upoštevane deformacije veznih sredstev. Na slikah 65 in 66 so prikazane strižne in upogibne deformacije stene pri horizontalni obremenitvi s silo F.



Slika 65: Prikaz strižne deformacije stene [18].

Slika 66: Prikaz upogibne deformacije stene [18].

Strižne deformacije stene so odvisne od efektivne strižne togosti (GA_{iq}) posamezne stene, ki jo določimo z enačbo (43). Efektivno strižno togost nato uporabimo v enačbi (41) s katero izračunamo strižno deformacijo stene [18].

$$\delta_s = \frac{F \cdot h}{GA_{iq}} \tag{41}$$

V enačbi (41) predstavlja F horizontalno silo, h predstavlja višino stene, G_{iq} predstavlja strižni modul iQwood panela in ga določimo z enačbo (43).

Izračun strižne togosti:

$$\frac{1}{GA} = \frac{1}{a^2} \cdot \left\{ \sum_{1}^{n-1} \frac{s_{ef}}{K_u} + \frac{d_1}{2 \cdot b_1 \cdot G_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{d_i}{b_i \cdot G_i} + \frac{d_n}{2 \cdot b_n \cdot G_n} \right\}$$
(42)

Kjer *a* predstavlja razdaljo med težiščema zunanjih slojev, *d* je debelina sloja, *b* je širina elementa, s_{ef} je efektivna razdalja med veznimi sredstvi, *Ku* je modul zdrsa moznika in *G* je strižni modul lesa C24. Oznake enačbe (42) so grafično prikazane v poglavju 2.1 na sliki 12.

Pri izračunu efektivne strižne togosti iQwood elementov moramo upoštevati tudi strižni korekcijski faktor k, ki ga določimo z enačbo (44).

$$GA_{iq} = k \cdot GA \tag{43}$$

$$k = \frac{EI_{ef}^2}{GA \cdot \frac{\sum S_{zi}^2}{Gb}}$$
(44)

V enačbi (43) G_{iq} predstavlja strižni modul iQwood panela, k predstavlja strižni korekcijski faktor, ki ga izračunamo po enačbi (44). V enačbi (44) EI_{ef} predstavlja efektivno upogibno togost, ki jo izračunamo po enačbi (46), GA predstavlja strižno togost izračunano po enačbi (42), S_{zi} predstavlja prvi moment površine sloja i, G predstavlja strižni modul lesa trdnostnega razreda C24 in b predstavlja širino elementa.

Upogibne deformacije posamezne stene pa so odvisne predvsem od efektivnega vztrajnostnega momenta okoli močne osi, ki ga izračunamo z gama metodo, ki jo predstavlja enačba (46). Z uporabo enačbe (45) pa lahko določimo upogibni del deformacij stene [18].

$$\delta_u = \frac{F \cdot h^3}{3 \cdot E I_{ef}} \tag{45}$$

V enačbi (45) predstavlja F horizontalno silo, h predstavlja višino stene, EI_{ef} predstavlja efektivno upogibno togost elementa okoli njegove lokalne težiščne osi z_i , ki jo določimo z enačbo (46).

$$EI_{z,ef} = \sum_{i=1}^{N} I_{z,i}^{(0)} \cdot E_i + \sum_{i=1}^{N} A_i \cdot z_{t,i}^2 \cdot \gamma_{zi} \cdot E_i$$
(46)

Kjer oznaka A_i pomeni površino prečnega prereza i-tega elementa, E_i pomeni elastični modul i-tega elementa, $z_{t,i}$ pomeni razdaljo med težiščem celotnega prereza in lokalnim težiščem i-tega elementa prereza in γ_{zi} pomeni koeficient togosti priključene ravnine, kjer priključna ravnina predstavlja ravnino med dvema slojema lamel. Način izračuna Efektivne upogibne togosti za prereze različnih slojevitosti se izračuna po enakem principu kot je v poglavju 4.3 prikazano za vztrajnostne momente z enačbami (15 -17).

Skupne deformacije iQwood stene so tako vsota strižnih in upogibnih deformacij.

$$\delta = \delta_s + \delta_u \tag{47}$$

Evropska tehnična ocena [5] priporoča omejitev horizontalnega pomika stene z *L/500*, zato preglednica 14 prikazuje silo potrebno za dosego maksimalnega horizontalnega pomika in delež strižnih ter upogibnih deformacij.

iQwood stena dimenzij b/h = 240/270 cm									
Tip elemen ta	<i>GA</i> [kN]	<i>EI_{ef}</i> [kNcm ²]	k [/]	GA _{iq} [kN]	<i>F</i> [kN]	δ_s [cm]	δ_u [cm]	δ [cm]	<i>L/500</i> [cm]
A90	8,79 · 10 ⁴	1,3 · 10 ⁹	0,124	1,09 · 10 ⁴	18,4	0,45	0,09	0,54	0,54
B90	$1,10 \cdot 10^{5}$	$8,35 \cdot 10^{8}$	0,182	2,0 · 10 ⁴	25,3	0,34	0,20	0,54	0,54
C90	2,21 · 10 ⁵	9,23 · 10 ⁸	0,167	3,69 · 10 ⁴	37,5	0,27	0,27	0,54	0,54
D90	$5,42 \cdot 10^{5}$	9,48 · 10 ⁸	0,113	6,13 · 10 ³	10,6	0,47	0,07	0,54	0,54
E90	1,32 · 10 ⁵	1,32 · 10 ⁵	0,128	6,32 · 10 ³	9,8	0,42	0,12	0,54	0,54

Preglednica 14: Prikazuje silo, ki je potrebna za dosego pomika L/500 in delež strižne in upogibne deformacije.



Grafikon 11: Prikaz velikosti strižnih in upogibnih deformacij iQwood elementov različnih dolžin.

Pomiki oziroma delež upogibne in strižne deformacije iz preglednice 14 so za lažjo predstavo prikazani tudi grafično z grafikonom 11. Iz podanih rezultatov lahko opazimo, da je delež upogibne deformacije pri elementih tipa B90 in C90 bistveno večji, kot delež upogibnih deformacij pri ostalih vrstah iQwood elementov. Razlog za takšno obnašanje teh elementov, so diagonalno usmerjeni sloji, ki zagotavljajo večjo strižno togost stene, medtem ko pa se efektivni vztrajnostni moment okoli močne osi zaradi tako orientiranih slojev ne spremeni.



Grafikon 12: Primerjava maksimalne sile glede na kontrolo nosilnosti in sile potrebno za dosego pomika L/500, iQwood elementa dimenzije 240/270 cm.

Iz grafikona 12 lahko vidimo, da so horizontalne sile, pri katerih dosežemo maksimalni dovoljen pomik L/500, bistveno manjše kot maksimalne horizontalne, sile izračunane v prejšnjem poglavju. Tako lahko vidimo, da je pri določitvi strižne nosilnosti sten merodajna kontrola pomikov.

4.5 Obremenitve pravokotno na ravnino elementa

Pri uporabi križno sestavljenih elementov, kot medetažne plošče, so le-ti izpostavljeni obremenitvam pravokotno na svojo ravnino. Tako obremenjene plošče se obnašajo enako, kot sestavljeni nosilci, ki preko povezav med posamezni sloji in glede na njihovo orientiranost, tvorijo nadomestne efektivne prereze. Le-ti glede na način podpiranja in togosti prenašajo obremenitve v glavni, in tudi manj nosilni smeri plošče.

$$\sigma_{md} = \frac{M_{y,d}}{W_{y,eff}} = \frac{M_{y,d}}{I_{y,eff}} \cdot (\gamma_i \cdot z_{t,i} \pm \Delta z_i)$$
(48)

Na podlagi enačbe (48) lahko izračunamo upogibne napetosti v prerezu. Podobno, kot pri vertikalni obremenitvi je tudi tu glavna karakteristika, ki vpliva na nosilnost posameznega sistema efektivni vztrajnostni moment in posledično togost povezave slojev ter njihova oddaljenost od težišča prereza. Tako imajo elementi z lepljenimi stiki, ki zagotavljajo bistveno bolj togo povezavo slojev, boljšo upogibno nosilnost, ko mozničeni elementi. Slika 67 prikazuje primer obtežbe pravokotno na ravnino elementa.



Slika 67: Primer obremenitve medetažnega elementa pravokotno na njegovo ravnino.

Pri medetažnih elementih je poleg nosilnosti elementa pomembna tudi njegova uporabnost oziroma velikost deformacij in vibracij, ki jih povzroči določena obtežba. Pri upogibni obremenitvi zlasti ob podporah prihaja do delovanja strižnih sil, ki povzročajo strižni zdrs med posameznimi sloji in s tem posledično večjo podajnost ter večje pomike plošče. V primeru križno mozničenih elementov je strižni zdrs odvisen od akumulacije zdrsov posameznih moznikov in strižnih deformacij lamele, medtem ko pa je pri križno lepljenih elementih strižni zdrs odvisen le od strižnih deformacij posamezne lamele. Posledično to pomeni, da enaka obtežba na križno mozničenih ploščah povzroči večje deformacije, kot pri križno lepljenih ploščah.



Slika 68: Vpliv obtežbe na napetosti v mozniku [19].

Slika 68 prikazuje tako upogibne deformacije križno mozničenega elementa, kot deformacije oziroma zdrs posameznega moznika.

Izračun upogibne nosilnosti

V primeru, ko se iQwood elementi uporabljajo kot medetažne plošče, moramo poznati njihovo upogibno nosilnost. Na podlagi materialnih in geometrijskih karakteristik, predstavljenih v predhodnih poglavjih, lahko glede na mejno stanje nosilnosti in mejno stanje uporabnosti določimo upogibno nosilnost pravokotno na ravnino iQwood elementov. Glede na standard SIST EN 1995-1-1: 2005 [1] se normalne napetosti zaradi upogibnega momenta določijo z upoštevanjem Bernoullijeve hipoteze in Hookovega zakona. Tako izračun napetosti po prerezu poteka po naslednji enačbi (49):

$$\sigma_{md} = \frac{M_{y,d}}{W_{y,ef}} = \frac{M_{y,d}}{I_{y,ef}} \cdot (\gamma_i \cdot z_{t,i} \pm \Delta z_i) \le f_{m,d}$$

$$(49)$$

kjer kratica σ_{md} pomeni normalne napetosti v prerezu, $M_{y,d}$ pomeni upogibni moment, $W_{y,ef}$ pomeni efektivni odpornostni moment, $I_{y,ef}$ pomeni efektivni vztrajnostni moment, γ_i pomeni koeficient togosti priključene ravnine, $z_{t,i}$ pomeni razdaljo med težiščem celotnega prereza in lokalnim težiščem i-tega elementa prereza, Δz_i pomeni razdaljo med lokalnim težiščem i-tega elementa in točko, v kateri računamo napetost.

Izračun tangencialnih napetosti zaradi delovanja prečne sile, izračunamo po Grashoffovi enačbi (50), ki velja za simetrične prereze s konstantno višino.

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S_{z,ef}}{I_{y,ef} \cdot b} \le f_{\nu,d} \tag{50}$$

V enačbi (50) kratica τ_d pomeni tangencialne napetosti, V_d pomeni prečno silo, $S_{z,ef}$ pomeni efektivni statični moment prereza, *b* pomeni širino elementa.

Izračunati je potrebno tudi efektivni statični moment prereza, ki se izračuna po enačbi (51).

$$S_{z,ef} = b \cdot h_i \cdot z_{t,i} \cdot \gamma_i \tag{51}$$

Kjer kratica h_i pomeni debelino i-tega sloja iQwood elementa.

Poleg kontrole normalnih in tangencialnih napetosti v prerezu, moramo preveriti še strižno odpornost ter izvesti kontrolo kontaktnih napetosti posameznega moznika. Zato je potrebno določiti strižno silo, ki deluje na posamezen moznik in se določi z enačbo (52).

$$F = \frac{\gamma_{i'} E_{i'} A_{i'} z_{t,i'} s_{ef}}{E I_{ef}} \cdot V_d \tag{52}$$

V enačbi (52), oznaka E_i pomeni elastični modul i-tega sloja, EI_{ef} pomeni efektivno upogibno togost elementa okoli njegove lokalne težiščne osi y_i in se izračuna z enačbo (46), A_i pomeni površino i-tega sloja, s_{ef} pomeni efektivno razdaljo med mozniki.

Kontrola strižnih napetosti izvedemo z uporabo neenačbe (53).

$$\tau_{moz,d} = \frac{F}{d_{ef} \cdot L_{moz}} \le f_{\nu,d}^{D30} \tag{53}$$

Kontrola kontaktnih napetosti pa se izvede z uporabo neenačbe (54).

$$f_{c,0,moz} = \frac{F}{d_{ef} \cdot h_m} \le f_{c,0,d}^{C24}$$
(54)

Kjer kratica d_{ef} pomeni efektivni premer enega moznika, L_{moz} pomeni dolžino moznika, h_m pomeni najmanjšo dolžino moznika v enem sloju in znaša 23 mm.







Na grafikonih 13 in 14, je dobro razvidna nezveznost v napetostnih diagramih. Ker je elastični modul pravokotno na vlakna relativno majhen, predpostavimo, da sloji pravokotni na razpon ne prispevajo k

upogibni nosilnosti plošče. Tako dobimo grafikone, kjer se napetosti spreminjajo le v slojih usmerjenih v smeri razpona, drugje pa predpostavimo, da so napetosti enake 0.

Kontrola mejnega stanja uporabnosti

Ko obravnavamo iQwood elemente, kot medetažne plošče, je potrebno poleg kontrol mejnega stanja nosilnosti, izvesti še kontrole mejnega stanja uporabnosti. Glede na Evrokod 5 [1] morajo elementi zadostiti dvema uporabnostnima kriterijema:

- Deformacije ali pomiki zaradi vpliva na izgled ter zaradi vpliva na druge nekonstrukcijske elemente ne smejo presegati predpisanih vrednosti;
- Vibracije, ki lahko povzročajo nelagodnost bivanja ali otežujejo obratovanje konstrukcije, morajo biti znotraj predpisanih okvirov.

Kontrola pomikov

Pri kontroli pomikov moramo kontrolirati začetne elastične pomike (w_{inst}), ki se pojavijo na konstrukciji ob nanosu obtežbe in so vsota elastičnih pomikov zaradi stalne in spremenljive obtežbe. Ker pa nas ne zanimajo le deformacije ob nanosu obtežbe, ampak tudi tekom delovanja obremenitev, moramo kontrolirati tudi pomike po izvršenem lezenju (w_{fin}).

Maksimalni pomik za prostoležeči element obremenjen z enakomerno zvezno obtežbo (q), izračunamo po enačbi (55).

$$w_{max} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot El_{ef,MSU}} \tag{55}$$

Kjer kratica q pomeni obtežbo, L pomeni dolžina razpona, $EI_{ef,MSU}$ pomeni efektivno upogibno togost elementa okoli njegove lokalne težiščne osi y_i pri upoštevanju modula zdrsa K_{ser} .

Ker imamo opravka s sestavljenim prerezom in smo vztrajnostni moment izračunali po gama metodi, se modul pomika veznega sredstva razlikuje za mejno stanje nosilnosti in mejno stanje uporabnosti. Posledično se razlikuje tudi efektivni vztrajnostni moment, ki ga uporabljamo v kontroli mejnega stanja nosilnosti in mejnega stanja uporabnosti.

Kontrola vibracij

Vibracije, ki se lahko tekom življenjske dobe konstrukcije pojavijo, morajo biti znotraj predpisanih meja, saj lahko drugače zmanjšajo funkcionalnost objekta in povzročajo nelagodje uporabnikom. Odziv medetažnih iQwood plošč na dinamično vzbujanje je odvisno predvsem od osnovne lastne frekvence za vertikalno nihanje medetažne konstrukcije. Glede na Evrokod 5 [1] v izračunu lastne frekvence medetažne konstrukcije upoštevamo maso zaradi lastne teže ter stalne obtežbe. Pri določitvi upogibne togosti medetažne konstrukcije pa uporabimo povprečne vrednosti materialnih konstant.

Medetažne konstrukcije lesenih objektov, katerih osnovna frekvenca presega 8 Hz, zadostijo kriterijem uporabnosti če sta izpolnjena naslednja pogoja:

- Kriterij pospeška kontroliramo z neenačbo (56).

$$\frac{w}{F} \le a \left[\frac{mm}{kN}\right] \tag{56}$$

- Kriterij togosti pa kontroliramo z neenačbo (57).

$$\nu \le b^{(f_1 - \xi - 1)} \left[\frac{m}{Ns^2} \right]$$
 (57)

Kjer oznaka w pomeni maksimalni vertikalni pomik zaradi kvazi-statične sile F delujoče v poljubni točki, a pomeni koeficient na podlagi slike 69, ν pomeni vertikalno amplitudo maksimalne začetne hitrosti vibracije obravnavane medetaže, b pomeni koeficient na podlagi slike 69, f_l pomeni lastno frekvenco in ξ pomeni materialno dušenje in ga predpostavimo kot 1% (0,01).



Slika 69: Priporočljive vrednosti in razmerje med koeficientoma a in b [1].

Lastno frekvenco medetažne konstrukcije približno izračunamo po enačbi (58).

2 slabše obnašanje

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI_{ef,MSU})_l}{m}} \tag{58}$$

Kjer kratica *l* pomeni razpon plošče in ga v enačbo podamo v metrih, $(EI_{ef,MSU})_l$ pomeni ekvivalentno upogibno togost tal okoli osi pravokotno na smer plošče in jo podamo v Nm²/m, *m* pomeni maso in jo podamo v kg/m².

Primerjava rezultatov izračuna upogibne nosilnosti

Na podlagi predstavljenih postopkov izračuna so na grafikonu 15, predstavljeni maksimalni razponi iQwood elementov tipa E150 in E210. Kot smo že ugotovili tekom naloge imajo iQwood elementi veliko podajnost, zato sta prikazani le kontroli pomikov in vibracij. Pri primerjavi je obravnavan prostoležeč element širine 1 m, ki je izpostavljen lastni teži, stalni obtežbi velikosti 1,8 kN/m in koristni obtežbi 2,0 kN/m. Pri računu vibracij pa sta poleg koeficienta a = 0,5 mm/kN in b = 150, upoštevana še kvazi-statična sila *F* velikosti 700 N in širina prostora 3 m. Kontrola mejnega stanja uporabnosti je izvedena pri pogoju L/400 za začetne elastične pomike in L/250 pri pomikih po izvršenem lezenju.



Grafikon 15: Primerjava maksimalnega razpona iQwood elementov pri upoštevanju kontrole pomikov in vibracij.

Iz grafikona 15 lahko vidimo, da je pri iQwood elementih, obremenjenih pravokotno na svojo ravnino, merodajna kontrola vibracij. Zaradi relativno majhne togosti povezave med spoji in posledično majhnega efektivnega vztrajnostnega momenta imajo iQwood elementi nizko lastno frekvenco, ki se odraža s pojavom vibracij.

5 PRIMERJAVA REZULTATOV RAZLIČNIH ANALIZ

V okviru naloge so bile predstavljene in izvedene različne eksperimentalne, računske in numerične analize, zato so v tem poglavju izvedene primerjave le teh. Z primerjavo rezultatov je prikazana ustreznost različnih računskih postopkov, ki so uporabljeni za izračun nosilnosti in podajnosti iQwood elementov. Za boljše razumevanje rezultatov, ki jih dosegajo iQwood elementi, so omenjeni rezultati primerjani tudi z rezultati primerljivih X – Lam elementov. Tako so elementi tipa A, B, C in D primerjani z trislojnimi X – Lam elementi debeline 90 mm, medtem ko pa so elementi tipa E primerjani z petslojnimi X – Lam elementi debeline 150 mm, oziroma v okviru upogibnih rezultatov tudi z elementi debeline 210 mm.



Grafikon 16: Primerjava rezultatov kritičnih uklonskih sil pri različnih analizah.

Iz primerjave na grafikonu 16 lahko opazimo, da računski rezultati kritične uklonske sile dosegajo bistveno manjše vrednosti kot rezultati eksperimentalnih oziroma numeričnih preiskav. Razlog za takšno odstopanje je konservativen postopek izračuna uklonske nosilnosti po Evrokodu 5 [1]. Prav tako lahko opazimo, da zaradi nižje togosti povezave posameznih slojev lamel v celoto pri iQwood elementih do pojava uklona prihaja pri nižjih silah kot pri primerljivih X – Lam elementih enakih dimenzij. Iz rezultatov podanih na grafikonu 16 lahko vidimo, da smo z uporabo postopka za izračun uklonske sile, ki ga predpisuje Evrokod 5 [1] na varni strani.



Grafikon 17: Primerjava horizontalnih pomikov iQwood elementov pri različnih analizah.

Primerjava horizontalnih pomikov je izvedena na elementih širine 240 cm in višine 270 cm, ki so bili v zgornjem levem vogalu obremenjeni s točkovno horizontalno silo velikosti 20 kN. Grafikon 17 prikazuje pomike obravnavanega elementa pri različnih analizah. Poleg primerjave rezultatov eksperimentalnih, računskih in numeričnih analiz so iQwood elementi primerjani tudi s primerljivimi X – Lam elementi. Na grafikonu 17 lahko opazimo, da so računsko določeni pomiki v vseh primerih večji od pomikov dobljenih z eksperimentalnimi in numeričnimi analizami. Razlog za večje pomike so konservativni postopki in predpostavke, ki jih predpisuje Evrokod 5 [1]. Podobno kot pri uklonu lahko tudi tu opazimo, da primerljivi X – Lam elementi v večini primerov pri enaki obremenitvi dosegajo bistveno manjše horizontalne pomike. V primeru iQwood elementov tipa C pa lahko opazimo, da dosegajo približno enake rezultate, kot X – Lam elementi. Razlog za takšen odziv teh elementov so diagonalno usmerjeni sloji, ki povečajo strižno togost stenskih elementov. Ker so pomiki, dobljeni z računskimi metodami, večji kot pomiki, dobljeni z eksperimentalnimi in numeričnimi analizami, lahko rečemo, da smo z uporabo takšnih postopkov za izračun strižne nosilnosti oziroma strižne podajnosti iQwood elementov na varni strani.



Grafikon 18: Primerjava vertikalnih pomikov iQwood elementov pri različnih analizah.

Grafikon 18 prikazuje primerjavo vertikalnih pomikov dobljenih pri različnih analizah iQwood elementov pri obremenitvi pravokotno na ravnino elementov. Analize so izvedene na elementih širine 100 cm, dolžine 540 cm in debeline 15 cm oziroma 21 cm. Obravnavani elementi so bili obremenjeni enako kot v primeru eksperimentalnih preiskav, kjer je bil prostoležeči element obremenjen po principu enostavnega štiriosnega preizkusa. Tako smo v primeru računskih pomikov le-te izračunali po enačbi (59).

$$w = \frac{23 \cdot F \cdot L^3}{648 \cdot E I_{ef}} \tag{59}$$

Na podlagi primerjave rezultatov, prikazanih na grafikonu 18, lahko opazimo dobro ujemanje numeričnih in eksperimentalnih rezultatov. Iz tega lahko sklepamo o ustreznosti numeričnega modela, hkrati pa vidimo, da tudi z računskimi postopki dosegamo podobne rezultate kot z numerično in eksperimentalno analizo. Ponovno lahko opazimo, da X – Lam elementi, zaradi večje togosti povezav med sloji dosegajo manjše pomike pri enaki obremenitvi. Podobno kot pri horizontalni obremenitvi tudi pri vertikalni obremenitvi dobimo pri enaki obremenitvi z računskimi metodami večje pomike, kot pri numerični analizi in eksperimentalnih preiskavah. Le-to pa pomeni, da smo z uporabo računskih postopkov za izračun vertikalnih pomikov upogibno obremenjenih iQwood elementov na varni strani.

6 PRIPOROČILA ZA PROJEKTIRANJE

Na podlagi izvedenih eksperimentalnih, računskih in numeričnih analiz lahko podamo navodila in priporočila za projektiranje z iQwood lesenimi elementi. V nadaljevanju so grafično prikazane mejne maksimalne vrednosti, ki so jih iQwood elementi sposobni prevzemati pod različnimi obremenitvami ter pod različnimi robnimi pogoji.



Grafikon 19: Kritične uklonske nosilnosti različnih tipov iQwood elementov.

Na grafikonu 19 je prikazana kritična uklonska sila različnih tipov iQwood elementov pri različnih uklonskih dolžinah. Na abscisni osi imamo podano uklonsko dolžino zidu v koraku 25 cm, na ordinatni osi pa so prikazane uklonski dolžini pripadajoče kritične uklonske sile.



Grafikon 20: Strižna nosilnost iQwood sten višine 2,8 m pri omejitvi pomikov z L/500.

Tekom naloge smo dokazali, da je v primeru strižnih obremenitev merodajna kontrola horizontalnih pomikov. Zato so na grafikonu 20 prikazane maksimalne strižne sile, ki zadostijo pogoju L/500 v odvisnosti od dolžine iQwood stene. Tako grafikon 20 na abscisni osi prikazuje dolžino stene v koraku 1 m, na ordinatni osi pa prikazuje pripadajoče maksimalne strižne sile.



Grafikon 21: Maksimalni razpon prostoležečega elementa širine 1 m pri kombinaciji stalne in koristne obtežbe.

Grafikon 21 prikazuje maksimalni razpon prostoležečih elementov pri obremenitvi s kombinacijo stalne in koristne obtežbe. Maksimalni razpon elementov je določen na podlagi metode mejnih stanj, ki jo predpisuje Evrokod 5 [1]. Pri izračunu in kontroli pomikov so bile uporabljene naslednje obtežne kombinacije:

- Mejno stanje nosilnosti: $1,35 \cdot g + 1,50 \cdot q$,
- Mejno stanje uporabnosti: $1,00 \cdot g + 1,00 \cdot q$,
- Mejno stanje uporabnosti z upoštevanjem reoloških vplivov: $1,80 \cdot g + 1,24 \cdot q$.

V zgornjih enačbah g predstavlja stalno obtežbo in q koristno obtežbo, ki znaša 2 kN/m². Pri kontroli pomikov je bil maksimalni pomik mejnega stanja uporabnosti omejen z L/400, pri mejnem stanju uporabnosti z upoštevanjem reoloških vplivov pa z L/250. Pri vseh tipih elementov je bila merodajna kontrola pomikov, kontrola vibracij pa ni bila upoštevana.

Sidranje iQwood elementov

Za dosego omenjenih maksimalnih obremenitev iQwood elementov, je potrebno ustrezno sidranje le teh v talno ali medetažno ploščo. Za sidranje iQwood elementov se predlagajo kotniki, ki za pritrditev na lesen element namesto žebljev uporabljajo vijake. V primeru iQwood elementov debeline 90 mm se predlagajo vijaki dolžine 80 mm in v primeru elementov debeline 150 mm se predlagajo vijaki dolžine 140 mm. Ko pa imamo opravka z nestandardnimi stenami, katerih debelina je večja od 150 mm, je potrebno zagotoviti sidranje le-teh z izvedbo kotnikov na obeh straneh stene. Z uporabo vijakov tako zagotovimo večjo povezanost posameznih slojev lamel v območju sidranja in tako zagotovimo boljši prenos obremenitev. Primer omenjenih kotnikov so kotniki tipa TCS oziroma TTS proizvajalca Rothoblaas, ki za priključevanje na lesene elemente uporabljajo vijake tipa HBS plate, ki so prav tako proizvod omenjenega podjetja.



Slika 70: Primer kotnikov z vijaki proizvajalca Rothoblaas [20].

7 ZAKLJUČEK

Zaradi zavedanja negativnega vpliva človeštva na okolje, se vedno več ljudi ozavešča o trajnosti ter poizkuša živeti na način, ki ima najmanj negativnih posledic na okolje. Tako lahko imajo zgradbe, zgrajene s konvencionalnimi materiali, kot so jeklo, beton in opeka, ogromno negativnih posledic za okolje, medtem ko pa lahko z uporabo lesenih elementov, kot je iQwood, te negativne posledice minimiziramo.

IQwood je slovenski proizvod, ki je v celoti izdelan v Sloveniji iz slovenskega lesa, kar pomeni, da se za izdelavo iQwood elementov porabi relativno malo energije, saj material ne opravlja dolgih transportnih poti. Poleg tega pa obdelava lesa zahteva bistveno manj energije, kot obdelava in izdelava betonskih, jeklenih in opečnih konstrukcijskih elementov. Les prav tako skladišči ogljik, kar prispeva k zmanjševanju emisij toplogrednih plinov. Poleg pozitivnih vplivov lesenih objektov na okolje pa ljudem nudijo tudi višjo bivanjsko kvaliteto.

Projektiranje objektov iz nekonvencionalnih gradbenih elementov, kot je iQwood sistem, predstavlja precejšen izziv. IQwood elementi spadajo v kategorijo križno mozničenega lesa (DCLT), za katerega je v literaturi podanih relativno malo postopkov, navodil in priporočil za projektiranje. Zato so v sklopu te naloge predstavljeni rezultati uklonskih, strižnih in upogibnih preiskav, izvedenih na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Na podlagi omenjenih preiskav so bile izvedene analize obnašanja različnih tipov iQwood elementov, pri strižni, uklonski in upogibni obremenitvi. Na podlagi deformacij posameznega tipa iQwood elementov, smo lahko opazili tudi vpliv orientiranosti posameznih slojev in konfiguracije moznikov na nosilnost. Na podlagi preiskav je bilo ugotovljeno, da imata na uklonsko nosilnost največji vpliv število vertikalno usmerjenih slojev in konfiguracija moznikov, ki vpliva na togost povezave posameznih slojev v celoto. V primeru strižno obremenjenih elementov pa smo ugotovili, da ima na nosilnost največji vpliv orientacija slojev, saj so elementi z diagonalno in vertikalno usmerjenimi sloji lamel dosegali bistveno boljše rezultate, kot elementi s horizontalno in vertikalno usmerjenimi sloji lamel. Ko pa smo obravnavali upogibno obremenjene sloje, smo podobno kot pri uklonsko obremenjenih elementih ugotovili, da ima največji vpliv konfiguracija moznikov oziroma togost povezave posameznih lamel v celoto.

Na podlagi rezultatov preiskav, so bili izdelani numerični modeli z metodo končnih elementov v računalniškem programu SAP2000 [2]. Na podlagi teh modelov so bile izvedene uklonske, strižne in upogibne analize iQwood elementov, ustreznost katerih je bila dokazana s primerjavo le-teh z računskimi in eksperimentalnimi rezultati primerljivih iQwood elementov. Ugotovljeno je bilo, da so kljub manjšim odstopanjem rezultatov zaradi nekaterih predpostavk in poenostavitev numerični modeli ustrezni. Poleg modelov enakih dimenzij kot elementi, na katerih so bile izvedene eksperimentalne preiskave, so bili izdelani tudi modeli krajših strižno obremenjenih sten, pri katerih nas je zanimala oblika horizontalne deformacije. Ugotovili smo, da s krajšanjem dolžine sten narašča delež upogibnih deformacij ter da se stene, krajše od 1 m, večinoma deformirajo le upogibno. V primeru analiz iQwood elementov, ki so bili obremenjeni pravokotno na svojo ravnino, smo poleg elementa debeline 21 cm, ki je bil potreben za primerjavo z eksperimentalnimi preiskavami, izdelali še model debeline 15 cm.

Poleg analize obnašanja iQwood elementov, so v okviru naloge predstavljeni tudi postopki za izračun uklonske, strižne in upogibne nosilnosti teh elementov. Predstavljeni postopki so izdelani na podlagi obnašanja iQwood elementov pri eksperimentalnih in numeričnih preiskavah in temeljijo na predpisih, ki jih določa standard SIST EN 1995-1-1 [1]. Na podlagi primerjave rezultatov računskih postopkov z rezultati eksperimentalnih preiskav in numeričnih analiz je bilo ugotovljeno, da le-ti dosegajo bistveno bolj konservativne vrednosti, iz česar lahko sklepamo, da smo pri projektiranju z uporabo računskih postopkov na varni strani.

Ob primerjavi nosilnosti iQwood in X – Lam elementov lahko ugotovimo, da v povprečju iQwood elementi dosegajo bistveno slabše rezultate. Tako ob primerjavi uklonskih nosilnosti ugotovimo, da iQwood elementi v povprečju dosegajo približno 70 % nižjo uklonsko nosilnost kot primerljivi X – Lam elementi. Podobno kot uklonsko nosilnost lahko primerjamo tudi pomike elementov pri horizontalni in vertikalni obremenitvi. Ugotovimo, da iQwood elementi v povprečju dosegajo približno 250 % večje horizontalne pomike in približno 500 % večje vertikalne pomike kot primerljivi X – Lam elementi.

S primerjavo rezultatov različnih analiz smo ugotovili, da je glavna slabost iQwood elementov njihova velika deformabilnost. Zato je pri vseh obremenitvah potrebno posebno pozornost nameniti kontrolam tako horizontalnih kot vertikalnih pomikov. Prav tako je potrebno ustrezno prilagajanje arhitekturne zasnove objektov, zgrajenih iz iQwood elementov, kar pomeni, da morajo objekti vsebovati zadostno količino sten, daljših od 1 m, tako v vzdolžni kot prečni smeri objekta. V primerih, ko prilagoditev arhitekture ni mogoča, je potrebno najbolj obremenjene elemente izvesti iz ustreznih X – Lam elementov oziroma zagotoviti ustrezne jeklene ali lesene ojačitve. IQwood elementi so tako ob ustrezni arhitekturni zasnovi primerni tako za velike kot male objekte.

VIRI (IEEE)

[1] "SIST EN 1995-1-1 2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij. Del 1: Splošna pravila in pravila za stavbe."

[2] "SAP2000 Ultimate". Computers and Structures, Inc., Berkeley, 2017.

[3] "European Tehnical Assessment ETA-13/0785", Berlin, jun. 2018. (Pridobljeno 12. 8 2023.)
 [Na spletu]. Dostopno na: <u>https://www.dibt.de/pdf_storage/2018/ETA-13%210785%288.03.04-92%2117%29e.pdf</u>

[4] L. Han, A. Kutnar, J. Sandak, I. Šušteršič, in D. Sandberg, "Adhesive-and Metal-Free Assembly Techniques for Prefabricated Multi-Layer Engineered Wood Products: A Review on Wooden Connectors", *Forests*, let. 14, št. 2. MDPI, 1. februar 2023. doi: 10.3390/f14020311.

[5] "European Tehnical Assessment ETA-14/0334", København, maj 2022.

[6] "Wall panel - CLT - Stora Enso - building / construction / laminate". (Pridobljeno 12. 8.
 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: <u>https://www.archiexpo.com/prod/stora-enso/product-97776-1411543.html</u>

[7] "Masive-Holz-Mauer", Massiv-Holz-Mauer Entwicklungs GmbH. (Pridobljeno 12. 8. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: <u>https://www.massivholzmauer.de/en/products/massiv-holz-mauerr</u>

[8] "Thoma Holz", Thoma Holz GmbH. (Pridobljeno 12. 8. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: https://www.thoma.at/en/wood100-wall-types/

[9] "Gradbeni proizvodi | GOV.SI". (Pridobljeno 11. 11. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: https://www.gov.si/teme/gradbeni-proizvodi/

[10] T. Pazlar, "REPORT No. P 1179/10-640-3 on compression/buckling characteristics of iQwood wall panels", Ljubljana, nov. 2011.

[11] T. Pazlar, "DRAFT OF REPORT No. 921/20 640 1 DRAFT about the compression/buckling resistance of cross layered dowel jointed timber wall panels - IQ wood", Ljubljana, sep. 2021.

[12] T. Pazlar, "REPORT No. P 1179/10-640-1 on shear characteristics of iQwood wall panels", Ljubljana, nov. 2011.

[13] T. Pazlar, "DRAFT OF REPORT No. 921/20 640 1 DRAFT about shear tests of cross layered dowel jointed timber wall panels - IQ wood", Ljubljana, sep. 2021.

[14] T. Patlar, "REPORT No. P 1179/10-640-2 on bending characteristics of iQwood slab elements", Ljubljana, nov. 2011.

[15] H.J. Blaß, "Expert's Report-Evaluation Report Extension of ETA-14/0334 for iQwood iQwood elements", Karlsruhe, jan. 2022.

[16] "International Organization for Standardization, ISO 16670:2003 Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - Quasi-static reversed-cyclic test method".

[17] "CSI Analysis Reference Manual", Berkeley, nov. 2017. [Na spletu]. Dostopno na: www.csiamerica.com (Pridobljeno 16. 4. 2023)

[18] "(PDF) Deflection of CLT Shear Walls in Platform Construction". (Pridobljeno 19. 11. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na:

https://www.researchgate.net/publication/327764550_Deflection_of_CLT_Shear_Walls_in_Platform_ Construction

[19] M. C. de M. Pereira, L. A. Pascal Sohier, T. Descamps, in C. C. Junior, "Doweled cross laminated timber: Experimental and analytical study", *Construction and Building Materials*, let. 273. Elsevier Ltd, 1. marec 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121820.

[20] "ANGLE BRACKETS AND PLATES FOR BUILDINGS". (Pridobljeno 28. 9. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: <u>https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/angle-brackets-and-plates-for-buildings</u>

[21] "Gradbeni proizvodi | GOV.SI". (Pridobljeno 28. 9. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: https://www.gov.si/teme/gradbeni-proizvodi/

[22] D. Beg in A. Pogačnik, *Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih*. Inženirska zbornica Slovenije, 2011.

[23] "European Tehnical Assessment ETA-15/0760", Vienna, apr. 2018. (Pridobljeno 12. 9. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: <u>https://esthus.se/wp-content/uploads/2019/04/ETA15-0760-MHM-ENG.pdf</u>

[24] "Kaj je iQwood?", IQWOOD. (Pridobljeno 12. 8. 2023.) [Na spletu]. Dostopno na: https://www.iqwood.com/wp-content/uploads/katalog-iqwood-sl.pdf

[25] B. Zhang, B. Rasmussen, A. Jorissen, in A. Harte, "Comparison of vibrational comfort assessment criteria for design of timber floors among the European countries", *Eng Struct*, let. 52, str. 592–607, jul. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.03.028.

[26] J. Jančar in B. Dujič, "Primerjava lesenih masivnih panelov sestavljenih iz različno križno spojenih lesenih struktur", str. 1–8, okt. 2011.