

SISTEM PREDKRIVLJENJA NOSILCEV

A System for Pre-bending Beams

povzetek

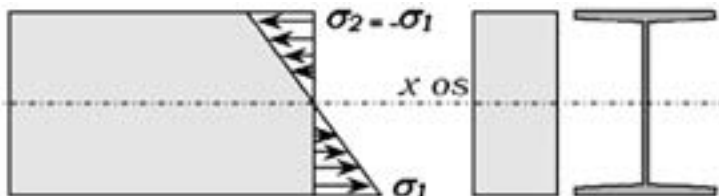
Pri gradnji objektov si želimo, da bi bil zgrajen objekt funkcionalen, lep in varen. Objekti morajo biti ekonomsko sprejemljivi. V zadnjem času je vse pomembnejši tudi ekološki vidik. Les je eden tistih gradbenih materialov, za katerega je potrebno najmanj energije. Prav tako se ob pridobivanju lesa izloči najmanj škodljivih snovi. Kljub temu, da je les obnovljivi vir, pa je z njim potrebno gospodarno ravnati.

Ob preučevanju ekonomičnosti konstrukcij smo podrobneje analizirali upogibno obremenjene nosilce izdelane iz lepljenega lameliranega lesa. Ugotovili smo, da parcialne varnosti med seboj močno odstopajo in da je pravokotni masivni prerez le deloma izkoriščen. Da bi odpravili določene slabosti tovrstnih nosilcev smo razvili sistem predkrivljenja, s katerim pri enaki porabi materiala in pri popolnoma enakih oblikah nosilca dosežemo večjo upogibno nosilnost. Tako lahko s sistemom predkrivljenja pri nosilcih izdelanih iz lepljenega lameliranega lesa zvečamo varnost konstrukcije ali pa zmanjšamo porabo lesa.

ključne besede:

konstrukcija, predkrivljen nosilec, lepljen lameliran les, ekonomičnost

Nosilci so v pretežni meri le upogibno obremenjeni elementi. Upogibna obremenitev je ena tistih vrst obremenitev, ki pri gradbenih elementih zahteva največ materiala. Prav pogosto se zgodi, da je prerez nosilca bistveno večji od prereza stebra. Izbrana statična višina prereza nosilca ima velik vpliv na porabo materiala. Z večanjem razdalje med tlačno in natezno cono se zmanjšuje tudi poraba materiala. Tako je daleč najbolj ekonomičen tip nosilcev paličje. Pogosto si visokih paličnih nosilcev ne moremo privoščiti, zato delno izboljšanje poizkušamo doseči z ustreznim oblikovanjem prečnega prereza. Lep primer so jekleni valjani "I" profili. Tehnologija oblikovanja prereza pa ni vedno tako enostavna, da bi bila v vsakdanji praksi tudi ekonomsko upravičena. Prav zaradi omenjene enostavnosti se običajne lesene lepljene lamelirane nosilce izdeluje le v polnem pravokotnem prerezu. Glede na potek normalnih napetosti znotraj prereza nosilca lahko ugotovimo, da je velik del prereza v bližini nevtralne osi nosilca praktično neobremenjen oziroma neizkoriščen (glej sliko 1).



Slika 1: Naraven potek normalnih napetosti pri upogibu

Vprašanje je ali lahko naravni potek normalnih napetosti pri upogibu spremenimo tako, da bi robne napetosti zmanjšali na račun povečanja napetosti tistih delov prereza, ki so v bližini nevtralne osi. Natančno to je izvedljivo s sistemom predkrivljenja nosilcev.

summary

When constructing buildings, we want them to be functional, beautiful and safe. Buildings have to be economically feasible. Presently the ecological aspect is gaining in importance. Timber is one of the construction materials, which requires least energy. Similarly obtainment of timber causes least quantities of toxic substances. Despite timber being a recyclable resource, we have to use it sparingly.

During research of construction economics we analysed in detail beams subject to bending that are produced from glued laminated timber. We established that the partial safeties of particular beams' mutually significantly differed and that their perpendicular massive sections were only partly utilised. In view of suppressing certain weaknesses of such beams we developed a system of pre-bending, whereby we used less material. Thus, with an equal form of beams, we achieved larger bending load-bearing capacities. With this system of pre-bending beams produced from glued laminated timber, we can therefore increase the safety of structure or reduce the consumption of timber.

key words:

structure, pre-bent beam, glued laminated timber, economics

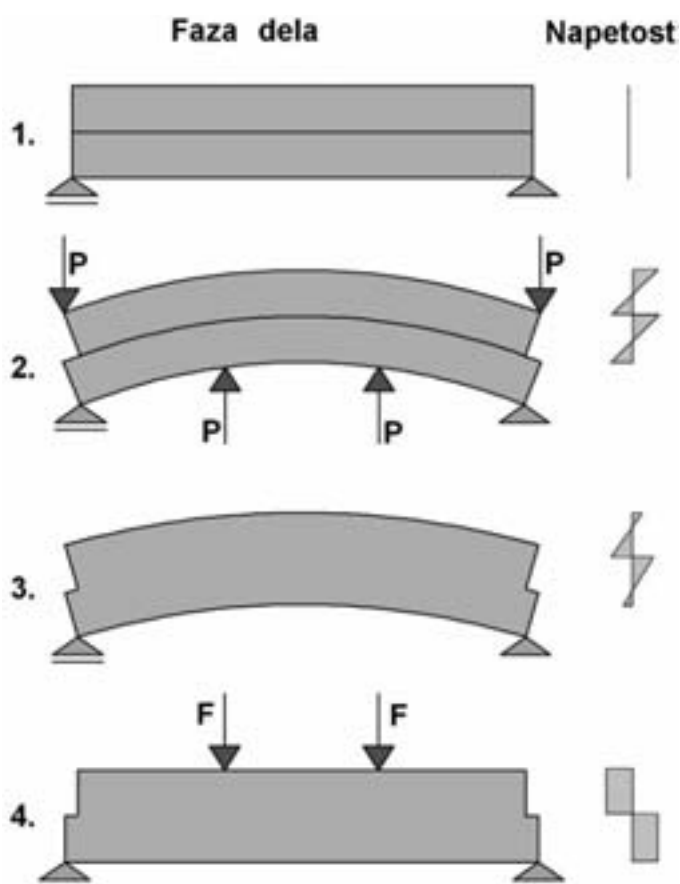
TEHNOLOGIJA IZDELAVE PREDKRIVLJENIH LESENIH LEPLJENIH LAMELIRANIH NOSILCEV

Sistem predkrivljenja nosilcev je izvedljiv za različne materiale in je zato potrebno razviti tudi ustrezno tehnologijo izdelave za posamezni material. Toda tudi tedaj, kadar je tehnološko mogoče izdelati nek prefabriciran gradbeni element, se je potrebno vprašati ali je to ekonomsko smiselno ali pač ne.

Ker je to raziskovalno področje novo in zelo široko, smo se najprej osredotočili le na lesene lepljene lamelirane nosilce oziroma krajše LLLN. Tehnologiji izdelave klasičnih LLLN dodamo le eno a zelo pomembno fazo dela in že dobimo tehnologijo izdelave predkrivljenih lesenih lepljenih lameliranih nosilcev ali krajše PLLLN.

Tehnologija izdelave nosilcev tipa PLLLN temelji na naslednjih fazah dela (glej sliko 2):

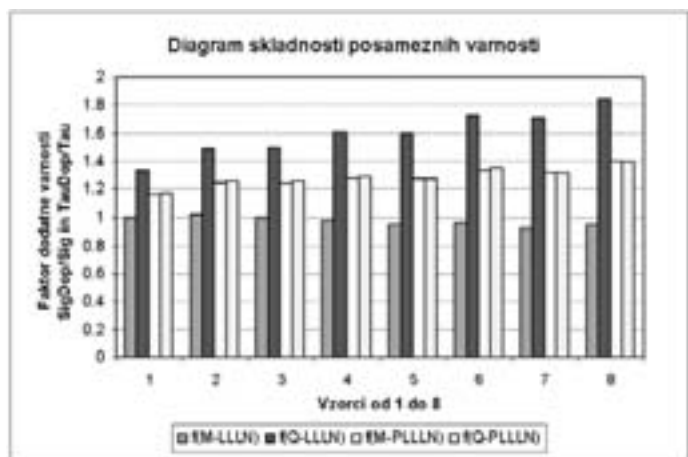
- najprej enako kot pri izdelavi običajnih LLLN posamezne lamele namažemo in jih spnemo, s to razliko, da srednjo rego oziroma kontaktno površino pustimo še suho,
- ko lepilo veže, nastaneta v bistvu dva manjša nosilca, ki ju nato naknadno na kontaktni površini premažemo z lepilom in s silo P ukrivimo v nasprotni smeri od smeri delovanja pričakovane obtežbe,
- po odstranitvi spon šablone v prerezu zlepljenega nosilca nastane ugoden razpored zaostalih napetosti, kot to v tretji fazi prikazuje diagram napetosti na sliki 2,
- po finalni površinski obdelavi nastalega PLLLN in po obremenitvi se seštevek zaostalih napetosti in napetosti, ki nastanejo zaradi zunanje obtežbe F odraža kot enakomerni razpored tako tlačnih kot tudi nateznih napetosti (glej sliko 2, faza 4).



Slika 2: Shema predkrivljenja lesenih lepljenih lameliranih nosilcev

PRIMERJAVA PARCIALNIH VARNOSTI NOSILCEV TIPA LLLN IN PLLLN

Sistem predkrivljenja nosilcev ima sicer ugoden vpliv na povečanje upogibne nosilnosti, ki pa je odvisen tudi od strižne nosilnosti. Pri predkrivljenju v nosilec poleg ugodnih normalnih napetosti vnesemo tudi dodatne strižne napetosti. Vpliv kombinacije obeh vrst napetosti smo numerično simulirali na osmih vzorcih standardnih prerezov in dolžin nosilcev, ki jih sicer izdelujejo v podjetju Hoja d.o.o. v Ljubljani.



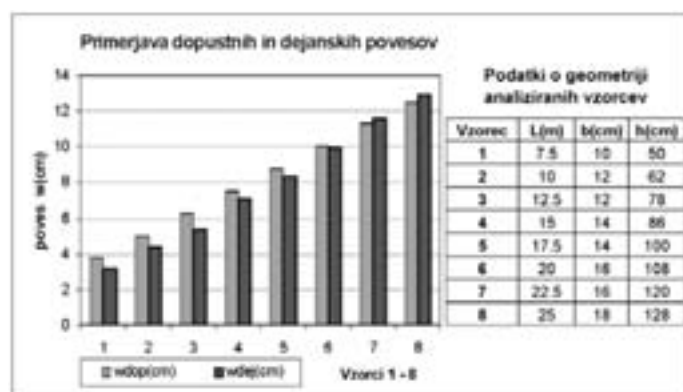
Slika 3: Primerjava dodatnih varnosti glede na tip nosilca

Rezultati analiz so pokazali, da gre za veliko neskladje parcialnih varnosti proti porušitvi na strig in na upogib v primeru nosilcev tipa LLLN. Vzorci predstavljajo ravne nosilce s konstantnim prerezom, ki so obremenjeni z zvezno obtežbo kot prostoležeči nosilci. Za vsak vzorec smo poiskali ustrezno stopnjo predkrivljenja in sicer takšno, da sta dodatna varnost f na strig in upogib enaki. Na sliki 3 so prikazani rezultati analize usklajenosti posameznih varnosti. Analiza temelji na metodi dopustnih napetosti. Kot je opaziti, nekateri vzorci predpisane varnosti na upogibne napetosti sploh ne dosegajo (večinoma velja $f(M-LLN) < 1$), medtem, ko so varnosti na strig ves čas večje od zahtevanih ($f(Q-LLN) > 1$) in kažejo na to, da bi lahko strižna obremenitev znašala najmanj 33 % in največ do 84 % več, kot pa je dopustno.

Pri predkrivljenih nosilcih (PLLN) sta dodatna faktorja varnosti $f(M-PLLN)$ in $f(Q-PLLN)$ izračunana na podlagi predpostavke, da se te vzorce izdelava iz istim prerezom lesa kot LLLN. Stopnja predkrivljenja je bila projektirana tako, da sta bili posamezni dodatni varnosti enaki.

Dejstvo je, da lahko s predkrivljenjem spreminjamo strižno obremenitev v bližini nevtralne osi in sicer v smeri paralelno s kontaktno površino. Kolikor večjo upogibno nosilnost želimo pridobiti z predkrivljenjem toliko večje strižne obremenitve se pojavijo. Predkrivljenje lahko torej uporabimo tudi kot regulator skladnosti posameznih varnosti.

V primerjavi z diagramom na naslednji sliki 4, kjer je prikazano stanje povesov, je opaziti, da poves niti ni merodajen za vzorce od 1 do 6. Poves je pomemben le za zadnja dva nosilca z najdaljšima razponoma. To velja le za prostoležeče nosilce. V primerih nosilcev s previsnimi polji in v primerih kontinuirnih nosilcev prek več polj pa povesi običajno niso več merodajni. Tako je v takšnih primerih pomembna le še upogibna nosilnost, ki pa jo s sistemom predkrivljenja lahko povečamo.



Slika 4: Primerjava povesov glede na tip nosilca

EKSPERIMENTALNA ANALIZA

Poleg numeričnih analiz smo opravili tudi nekaj eksperimentalnih preizkusov. Preizkušance so izdelali v podjetju Hoja d.o.o. s prav enakimi materiali kot jih običajno uporabljajo pri izdelavi klasičnih LLLN. V drugem delu eksperimentalnih raziskav smo uporabili tudi les boljše kvalitete. Nosilci so bili v obeh primerih izdelani iz smrekovega lameliranega lesa lepljenega z melaminskim lepilom. To lepilo je dovoljeno uporabljati tako za notranje kot tudi za zunanje konstrukcijske

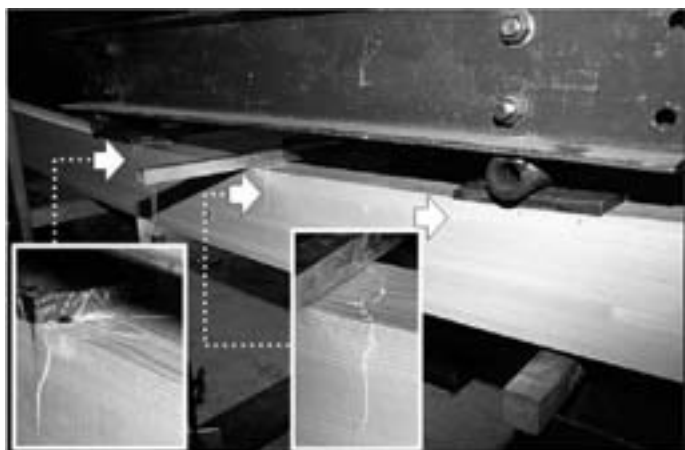
elemente. Prerez preizkušancev je bil sestavljen iz desetih lamel debeline 19 mm in širine 10 cm. Tako je celoten prerez znašal $b/h = 10/19$ cm. Preizkušanci so v dolžino merili 3.65 m. Statični razpon pri upogibnih preizkusih je znašal 3.45 m.

Rezultati upogibnih preizkusov so pokazali, da se pri uporabljeni običajni kvaliteti lesa nosilci porušijo vedno le s pretrgom natezne cone. V sliki 5 je prikazana ena takšnih tipičnih porušitev nosilcev tipa PLLLN, kjer je zanimivo tudi to, da se po pretrgu natezne cone nosilec povsem poravnava kot, da se z gornjim delom ni nič zgodilo. Pri klasičnih nosilcih tipa LLLN pa nosilec po porušitvi ostane odprt.



Slika 5: Tipična porušitev PLLLN preizkušancev iz običajne kvalitete smrekovega lesa

Pri običajnem lesu sta tlačna in natezna trdnost absolutno gledano približno enaki. Pri idealnem lesu brez grč, pa je natezna trdnost absolutno gledano bistveno večja od tlačne trdnosti. Po švicarskih standardih SIA 164 je razmerje trdnosti celo večje od 1:2 v korist natezne trdnosti. To dalje pomeni, da bi morali pri predkrivljenju nosilcev tipa PLLLN iz lesa boljše kvalitete izbrati asimetričen prerez, pri katerem bi tlačni del obsegal sorazmerno večjo površino prereza kot pa natezni del. To se je pokazalo tudi pri rezultatih upogibnih preizkusov, saj se je v primeru vizualno izbranega boljšega lesa, ki je bil praktično brez grč, nosilec tipično porušil v tlaku, kar je prikazano na sliki 6.

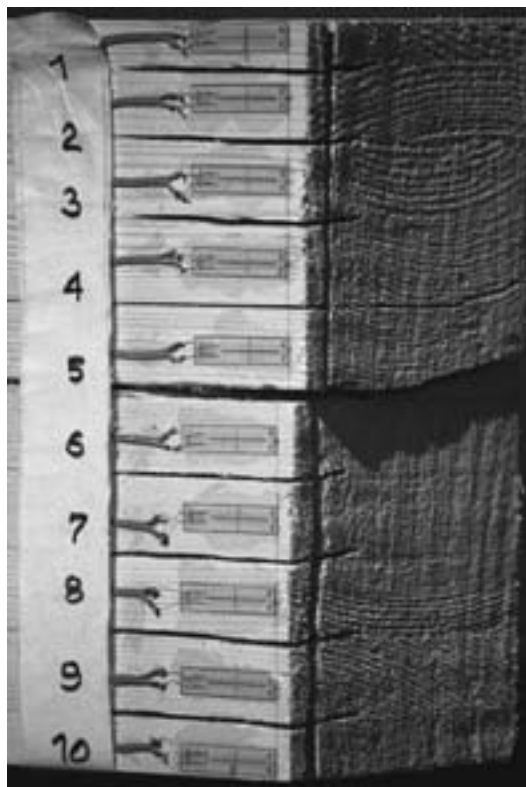


Slika 6: Tipična porušitev PLLLN preizkušancev iz vizualno izbrane boljše kvalitete smrekovega lesa

Tako se je pri slabši kvaliteti lesa izkazalo, da imajo predkrivljeni leseni lepljeni lamelirani nosilci (PLLLN) večjo upogibno nosilnost od klasičnih lesenih lepljenih lameliranih nosilcev (LLLN). Povprečje kaže za 23.66 % večjo nosilnost predkrivljenih nosilcev (PLLLN) v primerjavi s klasičnimi (LLLN). Omeniti je potrebno, da so bili preizkusi opravljeni praktično takoj po izdelavi to je dva dni po predkrivljenju, ko je vpliv reologije oziroma lezenja še zelo majhen.

Primerjave rezultatov upogibnih preizkusov boljšega lesa pa kažejo na to, da pri boljši kvaliteti lesa nikakor ni smiselno uporabljati predkrivljenja v izbrani geometriji. Vzorci tipa PLLLN so v povprečju dosegli celo 10.55 % manjšo porušno nosilnost kot vzorci tipa LLLN. Tako je za izboljšanje rezultatov v korist PLLLN potrebno načrtovati prerez, ki je sestavljen iz neenakih delov. Za uspešno načrtovanje pa žal nujno potrebujemo ustrezne podatke mehanskih karakteristik uporabljenega lesa, kot na primer poznavanje tlačne in natezne trdnosti ter elastičnih modulov. Pomembni so tudi parametri viskoznih modelov lezenja. Vse to pa je povezano z visokimi stroški predhodnih raziskav, ki jih bo potrebno opraviti pred nadaljnimi raziskavami.

Seveda je pomembno oceniti tudi morebitne izgube, ki bi nastale zaradi lezenja. Iz literature in raznih izkušenj drugih raziskovalcev vemo, da se prek 90 % lezenja izvrši v približno štirih mesecih. Tako smo v primeru boljšega lesa opravili tudi nekaj kasnejših preizkusov, po tem, ko so bili nosilci že 120 dni izpostavljeni vplivom zaostalih napetosti. Z merjenjem zaostalih deformacij takoj po izdelavi in zaostalih deformacij 120 dni po izdelavi smo poizkušali oceniti vpliv izgub. Tako smo s pomočjo desetih merilnih lističev sledili deformacijam v času upogibnega preizkusa in v času razreza, ko lahko ob sprostitvi zaostalih napetosti tudi izmerimo velikost zaostalih deformacij.



Slika 7: Merjenje zaostalih deformacij PLLLN

Z žaganjem na posamezne koščke lesa, na katere se predhodno nalepi merilne lističe (angl.: strain gauges) se sproščajo zaostale deformacije. Tlačno obremenjeni deli lesa se ob razreзу podaljšajo, natezni pa skrajšajo. Merilni lističi sledijo podlagi in se tako deformirajo s tem pa se spreminja tudi električni tok. S pomočjo ustreznih pretvornikov spremembe električnega toka digitaliziramo, jih preračunamo v deformacije in jih nato avtomatsko beležimo z osebnim računalnikom. Tako smo lahko sledili spremembam deformacij tudi še 7 dni po razreзу, kot to prikazuje slika 8.

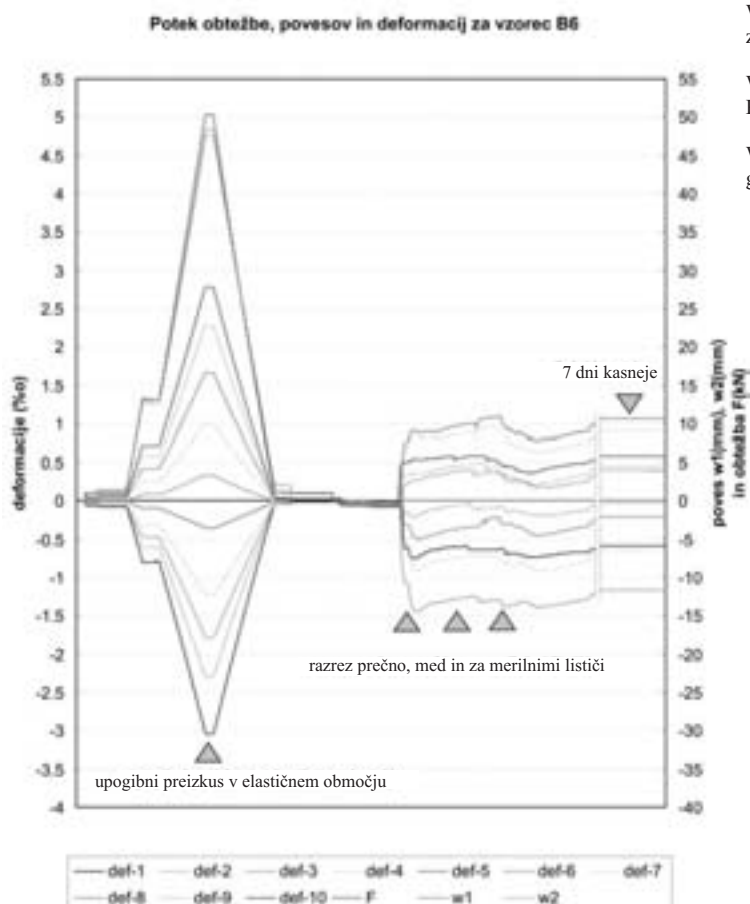
Tehnologija predkrivljenja razvita za primer lesenih lepljenih lameliranih konstrukcij je prenosljiva tudi na druge primere. Prav zaradi široke uporabnosti je sistem predkrivljenja patentiran, saj lahko sistem predkrivljenja apliciramo tudi na ploskovne elemente in na elemente, ki so napravljeni iz drugih materialov (steklo, karbon, ...). Danes se pri kompozitnih konstrukcijah uporabljajo tudi zelo dragi materiali. Zato je vsak prihranek materiala v teh primerih še posebej dobrodošel.

VIRI

Wallner E., 2001, Predkrivljen lepljen lameliran lesen nosilec, Zbornik 23. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled

Wallner E., 2002, Postopek povečanja upogibne nosilnosti s predkrivljenjem, Patent SI 20759 A

Wallner E., 2002, Izboljšani leseni lamelirani nosilci, Zbornik 24. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled



Slika 8: Kronološki pregled vseh izmerjenih količin vzorca B6 (PLLLN)

Rezultati kažejo, da je po štirih mesecih moč govoriti o tem, da kljub vplivu lezenja pri površinsko povsem nezaščitenem nosilcu tipa PLLLN, v predkrivljenem nosilcu še vedno obstajajo dokaj visoke zaostale deformacije, ki dajejo napetosti velikostnega razreda dopustnih napetosti in celo več.

SKLEP

Na podlagi opravljenih eksperimentalnih raziskav in numeričnih simulacij lahko trdimo, da je ob določenih pogojih s sistemom predkrivljenja mogoče povečati upogibno nosilnost lesenih lepljenih lameliranih nosilcev. Realno je pričakovati za 25 % večjo upogibno nosilnost. Predvsem je spodbudno to, da postopek ne zahteva dodatnih materialov. To pomeni, da imamo bodisi večjo varnost pri enaki porabi lesa ali pa predpisano varnost pri manjši porabi lesa.