

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**David Antolinc**

## **Analiza obnašanja mostu iz armirane plastike**

**Diplomska naloga št.: 3025**

**Mentor:**

prof. dr. Roko Žarnić

**Somentor:**

doc. dr. Vlatko Bosiljkov

Ljubljana, 9. 9. 2008

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani, **DAVID ANTOLINC**, izjavljam, da sem avtor diplomske naloge, z naslovom:  
**»ANALIZA OBNAŠANJA MOSTU IZ ARMIRANE PLASTIKE«**.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatorke FGG.

Ljubljana, 30.07. 2008

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>UDK:</b>             | <b>624.072.7(043.2)</b>  |
| <b>Avtor:</b>           | <b>David Antolinc</b>  |
| <b>Mentor:</b>          | <b>izr. prof. dr. Roko Žarnić</b>  |
| <b>Somentor:</b>        | <b>doc. dr. Vlatko Bosiljkov</b>   |
| <b>Naslov:</b>          | <b>Analiza obnašanja mostu iz armirane plastike</b>  |
| <b>Obseg in oprema:</b> | <b>120 str., 28 pregl., 86 sl., 89 en.</b>   |
| <b>Ključne besede:</b>  | <b>armirana plastika, karbonska vlakna, steklena vlakna, matrica, tankostenski laminatni škatlasti nosilec, sendvič plošča, laminat, kompozit, FRP-Fiber Reinforced Polymers</b> |

### **Izvleček**

V diplomski nalogi obravnavamo analizo obnašanja mostne konstrukcije iz armirane plastike. Na začetku naloge so predstavljeni kompoziti oz. armirane plastike in njihova uporaba. Temu sledi pregled mostov iz armirane plastike (FRP-jev), ki so že zgrajeni in v fazi uporabe. Za razumevanje rezultatov in obnašanja konstrukcije je na kratko opisana teorija laminatnih kompozitnih konstrukcij od nivoja mikromehanike pa vse do globalne analize celotne konstrukcije. Analiza mostne konstrukcije je bila izvedena v programu SAP 2000. Konstrukcija je modelirana s »Shell-layered« ploskovnimi končnimi elementi, saj nam omogočajo kontrolo napetosti po posameznih plasteh. Na osnovi parametrične analize je najprej izmed treh različnih tipov prečnih prerezov izbran najugodnejši. Na koncu je izvedena še optimizacija izbranega prereza glede na konstrukcijsko višino. Zaradi izredno lahke in sorazmeroma toge konstrukcije ima obravnavani most zelo dobre dinamične karakteristike. Za dimenzioniranje obravnavanega mostu je merodajno mejno stanje uporabnosti.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 624.072.7(043.2)  
**Author:** David Antolinc  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Roko Žarnić  
**Co-Supervisor:** doc. dr. Vlatko Bosiljkov  
**Title:** Analysis of the FRP bridge behavior  
**Notes:** 120 p., 28 tab., 86 fig., 89 eq.  
**Key words:** FRP-Fiber Reinforced Polymers, carbon fibers, glass fibers, matrix materials, thin-walled beams, sandwich deck panels, laminates, composites, all FRP bridge system,

### **Abstract**

The study focuses on the load-carrying behavior of hybrid fiber reinforced thin-walled main bridge beams with the sandwich deck panels on top. Firstly, there is a comprehensive overview of the composite materials and their constitutions (matrix, fibers), mainly to show their mechanical advantages and disadvantages with possibilities for using them in civil engineering applications. Follows which is a short state-of-the-art review of the all-FRP bridges constructed in the past. For a better understanding of the behavior of the bridge structure I provided a brief theory explanation of the thin-walled laminates from the micromechanical level to the global analysis of the whole structure. To perform the optimization of the mentioned bridge structure under the determined boundary conditions, the FE software package SAP2000 was used to create a 3D layered shell model. Based on that analysis we designed the whole bridge structure for three different types of transverse bridge sections to sustain the defined loads to meet the requirements of the ultimate limit state and serviceability limit state of the structure. Upon the final results for these three types of bridge sections we selected the most adequate type of section based on the optimization criteria (mass, final costs). At the end we made an optimization of the height for the selected cross section. Due to a low mass to stiffness ratio a, structures made of FRP bridge have good dynamic characteristics. The serviceability limit state is a decisive factor for predicting suitability of the structure to sustain all the applied loads.

## **ZAHVALA**

Za nasvete, pomoč in optimizem pri nastajanju te diplomske naloge se najlepše zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Roku Žarniću in somentorju dr. Vlatku Bosiljkovu. Hvala tudi asistentu doc. dr. Matjažu Dolšku in mlademu raziskovalcu Franciju Sinurju za drobne nasvete in računalniško podporo. Posebna zahvala gre tudi Mitju Blažinčiču, ki je požrtvovalno posodil računalnik brez katerega bi bilo moje delo zelo oteženo.

Mati, ata in Vanja, vam pa najlepša hvala za brezkompromisno in optimistično podporo, ne le ob izdelavi diplomske naloge, temveč za obdobje celotnega študija.

**Kazalo vsebine**

|  |    |
|--|----|
| 1 UVOD.....  | 1  |
| 2 KOMPOZITI – ARMIRANE PLASTIKE (FRP – Fiber Reinforced Polymers)..... | 4  |
| 2.1 Ojačitvena vlakna .....  | 6  |
| 2.1.1 Vlakna organskega izvora .....                                   | 7  |
| 2.1.1.2.2 Poliesterska vlakna .....                                    | 9  |
| 2.1.2 Vlakna anorganskega izvora.....                                  | 10 |
| 2.1.3 Oblike vlaken in tkanin za armiranje polimernih matric .....     | 13 |
| 2.1.4 Povezovalni agent (»sizing«) .....                               | 15 |
| 2.2.0 Matrice.....   | 16 |
| 2.2.1 Polimeri .....   | 17 |
| 2.2.2 Kovine .....   | 22 |
| 2.2.3 Keramike .....   | 22 |
| 2.2.4 Polnila za matrice .....   | 23 |
| 3 LAMELIRANE ARMIRANE PLASTIKE IN NJIHOVE LASTNOSTI .....              | 24 |
| 3.1 Terminologija v laminatnih strukturah .....                        | 27 |
| 3.2 Proizvodni procesi kompozitnih laminatov .....                     | 28 |
| 4 PROJEKT »FUTURE BRIDGE«.....   | 35 |
| 5 PREGLED MOSTOV NAREJENIH IZ ARMIRANE PLASTIKE (»FRP bridges«).....   | 37 |
| 5.1 Most za pešce na Škotskem (Aberfeldy Footbridge) .....             | 37 |
| 5.2. Sugar Grove most v Virginiji (Blaksburg) .....                    | 40 |
| 5.3. Most za pešce čez železniško progo v St. Austell-u.....           | 41 |
| 5.4. Bonds Mill dvizni most .....                                      | 42 |
| 5.5. Pontresina most (Švica).....                                      | 43 |
| 5.6 West Mill most v Angliji .....                                     | 44 |
| 5.7 Dvizni kompozitni most za pešce v Fredrikstad-tu .....             | 46 |
| 6 RAČUNSKA ANALIZA KOMPOZITNO LAMINATNIH KONSTRUKCIJ .....             | 47 |
| 6.1 Mikromehanika.....   | 48 |
| 6.2 Makromehanika .....  | 58 |
| 7 NUMERIČNA ANALIZA MOSTNE KONSTRUKCIJE (SAP2000).....                 | 69 |
| 7.1 Zasnova nosilne konstrukcije .....                                 | 69 |



|   |     |
|---|-----|
| 7.2 Materialne karakteristike.....                | 74  |
| 7.3 Obtežba .....                                 | 79  |
| 7.4 Analiza in izbira prečnega prereza.....       | 85  |
| 7.4.1 Analiza prereza 1 .....                     | 85  |
| 7.4.2 Analiza prereza 2 .....                     | 92  |
| 7.4.3 Analiza prereza 3 .....                     | 97  |
| 7.4.4 Primerjava analiz posameznih nosilcev ..... | 109 |
| 7.5 Optimizacija izbranega prereza.....           | 112 |
| 8 ZAKLJUČEK.....                                  | 116 |
| 9 VIRI .....                                      | 118 |

## Kazalo preglednic

- Preglednica 1.1: Primerjalna tabela značilnih lastnosti vlaken, povzeto po različnih virih.
- Preglednica 2.1: Tipične vrednosti duroplastov (pri temperaturi 23°C), povzete po Fibre Composite Design and Development Group 1997; Hull & Clyne 1996.
- Preglednica 2.2: Tipične vrednosti termoplastov (pri temperaturi 23°C).
- Preglednica 3.1: Primerjava osnovnih lastnosti armiranih plastik z lastnostmi tradicionalnih materialov (Springolo M. 2005).
- Preglednica 3.2: Karakteristike E-Steklo/epoksi kompozitne lamele za različne tipe armiranja (Springolo M. 2005).
- Preglednica 7.1: Osnovne mehanske karakteristike posameznih materialov.
- Preglednica 7.2: Osnovne mehanske karakteristike lamel posameznih kompozitov za različne procente armiranja.
- Preglednica 7.3: Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,1}$ , (Tabela 2.4, EUROCOMP, 1996).
- Preglednica 7.4: Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,2}$ , (Tabela 2.5, EUROCOMP, 1996).
- Preglednica 7.5: Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,3}$ , (Tabela 2.6, EUROCOMP, 1996).
- Preglednica 7.6: Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,4}$ , (Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP, 1996).
- Preglednica 7.7: Določitev števila in širine računskih vozniških pasov.
- Preglednica 7.8: Prometna obtežba.
- Preglednica 7.9: Obtežni primeri in njihove kombinacije.
- Preglednica 7.10: Kontrola napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  in  $\sigma_{12}$  v spodnji karbonski pasnici po posameznih plasteh z dejanskimi pripadajočimi varnostnimi faktorji v najbolj obremenjeni točki pasnice.
- Preglednica 7.11: Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v levi in desni stojini najbolj obremenjenega nosilca.
- Preglednica 7.12: Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v zgornji skorji sendvič plošče.
- Preglednica 7.13: Osnovne dinamične karakteristike za prvih nekaj nihajnih oblik.
- Preglednica 7.14: Kontrola napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  in  $\sigma_{12}$  v spodnji karbonski pasnici po posameznih plasteh z dejanskimi pripadajočimi varnostnimi faktorji v

najbolj obremenjeni točki pasnice (na sredini razspona mostne konstrukcije).

Preglednica 7.15: Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v levi in desni stojini najbolj obremenjenega nosilca.

Preglednica 7.16: Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v zgornji skorji sendvič plošče.

Preglednica 7.17: Osnovne dinamične karakteristike za prvih nekaj nihajnih oblik.

Preglednica 7.18: Kontrola napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  in  $\sigma_{12}$  v spodnji karbonski pasnici po posameznih plasteh z dejanskimi pripadajočimi varnostnimi faktorji v najbolj obremenjeni točki pasnice.

Preglednica 7.19: Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v levi in desni stojini najbolj obremenjenega nosilca.

Preglednica 7.20: Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v zgornji skorji sendvič plošče.

Preglednica 7.21: Osnovne dinamične karakteristike za prvih nekaj nihajnih oblik.

Preglednica 7.22: Cenik povzet po različnih virih.

Preglednica 7.23: Primerjava kontroliranih karakteristik (pomik, masa, cena, dinamika) za različne višine prereza.

## **Kazalo slik**

- Slika 1.1: Primerjalni diagram natezne trdnosti različnih materialov.
- Slika 1.2: Trabant v funkciji cvetličnega korita.
- Slika 2.0: Shematični prikaz polimernega kompozita ojačanega z vlakni.
- Slika 2.1: Shematični prikaz različnih tipov armature (ojačitev).
- Slika 2.2: Različni tipi vlaken.
- Slika 2.3: Osnovni gradnik aramidnih vlaken.
- Slika 2.4: Prikaz enoosno usmerjenih vlaken.
- Slika 2.5: Prikaz različnih načinov tkanja.
- Slika 2.6: Na sliki sta prikazana dva primera dvoosnih tkanin.
- Slika 2.7: Razvrstitev poliuretanov glede na njihovo togost in gostoto.
- Slika 3.1: Na sliki je prikazan sestav troplastnega laminata.
- Slika 3.2: Označevanje laminatov [45/0/45/90/90/30].
- Slika 3.3: Simetričen nebalansiran laminat [A,B,C]<sub>s</sub>.
- Slika 3.4: Antisimetričen balansiran laminat [A,B,C,-C,-B,-A].
- Slika 3.5: Postopek pultruzije.
- Slika 3.6: Postopek navijanja vlaken.
- Slika 3.7: Postopek injektiranja v kalup.
- Slika 3.8: Postopek vakuumske vreče.
- Slika 4.0: Predpostavljena konstrukcijska sistema nosilne mostne konstrukcije.
- Slika 5.0: Pogled na most za pešce v Aberfeldy-ju.
- Slika 5.1: Pogled na krovno ploščo mostu.
- Slika 5.2: Pogled na detajle pritrditve napenjalnega kabla in zaščitne ograje na krovno ploščo.
- Slika 5.3: Nosilec podjetja Strongwell, uporabljen na obravnavanem mostu.
- Slika 5.4: Pogled na nosilce med izgranjo.
- Slika 5.5: Pogled na dokončan most.
- Slika 5.6: Pogled na konstrukcijo v delavnici.
- Slika 5.7: Montaža konstrukcije.
- Slika 5.8: Mostna konstrukcija v dvignjenem stanju.
- Slika 5.9: Pogled na most Pontresina v Švicarskih alpah.

- Slika 5.10: Helikopter, ki pozicionira mostno konstrukcijo na podpore (za to opravilo potrebuje le 1,5h).
- Slika 5.11: Prečni prerez West Mill mostu.
- Slika 5.12: Prerez profila krovne plošče.
- Slika 5.13: Pogled na dokončan most.
- Slika 5.14: Most za pešce v Fredrikstad-tu.
- Slika 5.15: Most za pešce v Fredrikstad-tu v dvignjenem stanju.
- Slika 6.0: Shema poteka računske analize kompozitno laminatnih konstrukcij.
- Slika 6.1: Shema poteka mikromehanike.
- Slika 6.2: Tipična reprezentativna elementa. Na sliki (a) je kvadratna in na sliki (b) je prikazana heksagonalna oblika reprezentativnega elementa.
- Slika 6.3: Reprezentativni element obremenjen v smeri vlaken.
- Slika 6.4: Reprezentativni element obremenjen v smeri pravokotno na vlakna.
- Slika 6.5: Primerjava modulov elastičnosti  $E_{11}$  in  $E_{22}$  v odvisnosti od procenta armiranja  $V_f$ .
- Slika 6.6: Reprezentativni element strižno obremenjen v ravnini lamele.
- Slika 6.7: Reprezentativni element strižno obremenjen po debelini lamele-medplastne strižne napetosti.
- Slika 6.8: Potek makromehanike.
- Slika 6.9: Geometrijski in materialni koordinatni sistem ortotropne plošče.
- Slika 6.10: Smer osnih sil v laminatu.
- Slika 6.11: Smer momentov laminatne plošče.
- Slika 6.12 Geometrija laminata.
- Slika 7.1: Prerez B-B skozi celotno mostno konstrukcijo.
- Slika 7.2: Vzдолžni prerez A-A skozi celotno mostno konstrukcijo. Na sliki sta prikazana različna načina podpiranja, pri čemer je zgornja varianta s podpiranjem na dnu nosilca, na spodnji pa na sendvič plošči.
- Slika 7.3: Tloris celotne mostne konstrukcije.
- Slika 7.4: Na sliki (a) prikaz sendvič strukture, na sliki (b) prerez skozi reprezentativni element satovja.
- Slika 7.5: Prerez 1#.
- Slika 7.6: Prerez 2#.

Slika 7.7: Prerez 3#.

Slika 7.8: Možnost zlaganja za transport.

Slika 7.9: Na slikah (a), (b) in (c) je prikazana obtežba po prečnem prerezu mostu, ki je zaradi preglednosti razdeljena na tri dele, od levega hodnika za pešce in kolesarje do desnega.

Slika 7.10: Tloris obtežne sheme.

Slika 7.11: Materialne karakteristike s karbonskimi vlakni ojačanega kompozita.

Slika 7.12: Primer podajanja sestava laminata s steklenimi vlakni.

Slika 7.13: Prikaz 3D modela s podpiranjem na dnu nosilcev.

Slika 7.14: Prikaz 3D modela s podpiranjem na sendvič plošči.

Slika 7.15: Primerjava maksimalnih pomikov nosilcev za različne načine podpiranja (podprtje nosilca, krovne plošče) in predpisane mejne vrednosti pomikov MSU.

Slika 7.16: Prikaz prereza 3D modela skozi nosilec in del krovne sendvič plošče.

Slika 7.17: Primerjava maksimalnih pomikov nosilcev za različne načine podpiranja (podprtje nosilca, krovne plošče) in predpisane mejne vrednosti pomikov MSU.

Slika 7.18: Skica 3D modela za tretji prerez.

Slika 7.19: Primerjava maksimalnih pomikov nosilcev za različne načine podpiranja (podprtje nosilca, krovne plošče) in predpisane mejne vrednosti pomikov MSU.

Slika 7.20: Razporeditev normalnih napetosti  $\sigma_{11}$  po vseh spodnjih karbonskih pasnicah mostne konstrukcije. Najbolj obremenjena je tretja pasnica z leve proti desni.

Slika 7.21: Potek normalnih napetosti  $\sigma_{11}$  v spodnji karbonski pasnici na najbolj obremenjenem delu.

Slika 7.22: Potek normalnih napetosti  $\sigma_{22}$  v spodnji karbonski pasnici na najbolj obremenjenem delu.

Slika 7.23: Diagram napetosti  $\sigma_{11}$  na vrhu prve plasti v levi stojini.

Slika 7.24: Diagram napetosti  $\sigma_{22}$  na vrhu prve plasti v levi stojini.

Slika 7.25: Diagram napetosti  $\sigma_{12}$  na vrhu prve plasti v desni stojini.

Slika 7.26: Diagram napetosti  $\sigma_{13}$  na spodnji strani osme plasti v levi stojini.

Slika 7.27: Diagram napetosti  $\sigma_{23}$  na spodnji strani sedme plasti v levi stojini.

Slika 7.28: Na levi sliki je diagram napetosti  $\sigma_{11}$ , na desni pa  $\sigma_{22}$  na zgornji strani prve plasti.

Slika 7.29: Na desni strani je diagram napetosti  $\sigma_{12}$  v drugi plasti na vrhu, na desni pa imamo prikazan potek napetosti  $\sigma_{13}$  v peti plasti na vrhu.

Slika 7.30: Diagram napetosti  $\sigma_{23}$  na zgornji strani prve plasti.

Slika 7.31: Potek normalnih napetosti  $\sigma_{11}$  po celotnem prerezu sendvič plošče.

Slika 7.32: Potek normalnih napetosti  $\sigma_{22}$  po celotnem prerezu sendvič plošče.

Slika 7.33: Prvih šest nihajnih oblik.

Slika 7.34: Primerjava količine porabe posameznega kompozita za vse tri tipe prerezov.

Slika 7.35: Primerjava stroškov za porabljeni material vseh treh tipov prerezov.

Slika 7.36: Primerjava pomikov prečnega prereza za različne višine prerezov.

Slika 7.37: Primerjava mase za posamezne kompozite pri različnih višinah mostne konstrukcije.

Slika 7.38: Primerjava skupne mase in cene nosilne konstrukcije.



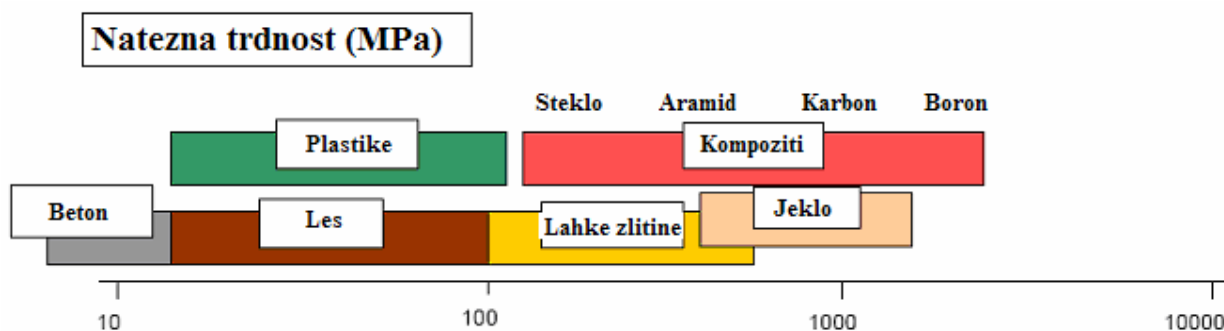




## 1 UVOD

Industrializacija in razvoj civilizacije v zadnjem stoletju nas je pripeljal in postavil pred mnoga vprašanja, katera bi se verjetno našim praočetom zdela nesmiselna. Eno najpomembnejših vprašanj, ki se pojavi že praktično na vsakem koraku je povezano s podnebnimi spremembami, na katere v veliki meri vpliva človek s pretirano in brezglavo porabo energije. To pravkar omenjeno pretirano porabo energije nam diktira sama človeška egoistična narava, ki stremi k vedno višjemu standardu in zadovoljevanju potreb brez kritičnega pogleda na posledice. Rešitve za posledice pričnemo iskati šele takrat, ko nas prizadanejo.

Energetske probleme je smiselno ločiti na dva segmenta in sicer na proizvodnjo energije in porabo energije. Ravno pri porabi energije lahko v panogi kot je gradbeništvo odigramo pomembno vlogo pri zmanjšanju le te, poleg tega pa je potrebno stremeti tudi k čim bolj trajnim in nosilnim materialom. Ravno slednje je v gradbeništvo in v ostale industrijske panoge, ki so povezane z izdelavo konstrukcijskih elementov v zadnjih desetletjih iz letalske industrije razširilo uporabo t.i. armiranih plastik (FRP-jev). Razlog za njihovo uporabo je nizko razmerje med težo in nosilnostjo, kar lahko izkoristimo za izdelavo drznejših konstrukcij.



Slika 1.1 Primerjalni diagram natezne trdnosti različnih materialov.

Drugi razlog je trajnost, saj so se FRP-ji izkazali za izredno korozijsko odporen material. Kot zanimivost naj na tem mestu omenim model avtomobila Trabant oz. Trabi, ki so ga izdelovali v vzhodni Nemčiji v drugi polovici prejšnjega stoletja. Trabant je bil avtomobil, ki je imel okvirno jekleno nosilno konstrukcijo, streha, dno, vrata in preostali deli, ki so običajno

pločevinasti, pa so bili narejeni iz duroplastov, armiranih z volno ali bombažom. Z uporabo tega materiala so se izognili koroziji in znižali lastno težo, kar pa nam implicira nižjo porabo goriva med eksploatacijo avtomobila. Zanimiv je tudi podatek, da so kompozite za plašč avtomobila izdelovali z reciklažo odpadkov bombaža iz Rusije in fenolnih rezin iz Vzhodno Nemške barvne industrije. S tem je Trabi postal prvi avto s karoserijo narejeno iz recikliranega materiala. Na sliki 1.2 lahko vidimo Trabanta, ki že dolga leta služi kot cvetlično korito, kar nakazuje na zelo dobro korozijsko odpornost duroplastov.

Nazadnje pa je kot razlog za uporabo armiranih plastik v gradbeništvu potrebno omeniti še možnost projektiranja samega materiala, kajti s tem odigramo pomembno vlogo pri določitvi mehanskih lastnosti materiala, s čimer lahko še dodatno optimiziramo konstrukcijske elemente.



**Slika 1.2** *Trabant v funkciji cvetličnega korita.*

Armirane plastike v gradbeništvu še niso doživele večje uporabe v konstrukcijske namene; predvsem zaradi pomanjkanja primernih enostavnih računskih metod za analizo in kontrolo laminatnih kompozitnih polimernih konstrukcij, poleg tega pa se pojavi še problem v pomanjkanju znanja inženirjev tovrstnih sorazmeroma novih materialov in posledično tudi konstrukcij. Trenutno so nam v pomoč nekatere splošne publikacije kot so EUROCOMP (Clark, J., 1996), CEN (Comite Europeen de Normalisation, 2002), ASCE (American Society of Civil Engineers, 1984) ali interni standardi posameznih izvajalcev, kjer lahko najdemo splošne omejitve in računske kontrole za laminatne kompozitne polimerne konstrukcije. V prihodnosti bo potrebno napraviti še mnogo preiskav, s katerimi bomo tudi potrdili pravilnost računskih modelov in s tem tudi pridobili in osvojili poseben princip dimenzioniranja. S tem pa bomo tudi omogočili širšo sprejemljivost in uporabo tovrstnih konstrukcij. Potrebno je

omeniti tudi problem sorazmeroma visoke cene osnovnega materiala, kar je predvsem posledica ozke usmerjenosti uporabe. Rešitev tega problema pa se kaže predvsem v dodatnih raziskavah obravnavanega materiala v sodelovanju s proizvajalci materiala, na osnovi katerih se bo omogočilo enostavnejše projektiranje in se s tem tudi ponudila možnost širše uporabe armiranih plastik med snovalci konstrukcij. Takšen pristop pa bo v prihodnosti lahko tudi pripeljal do poenostavitve in optimizacije proizvodnje obravnavanega materiala, ki pa navsezadnje vodi tudi do znižanja cen izdelave konstrukcij iz armiranih plastik in njene boljše konkurenčnosti na trgu gradbenega materiala.

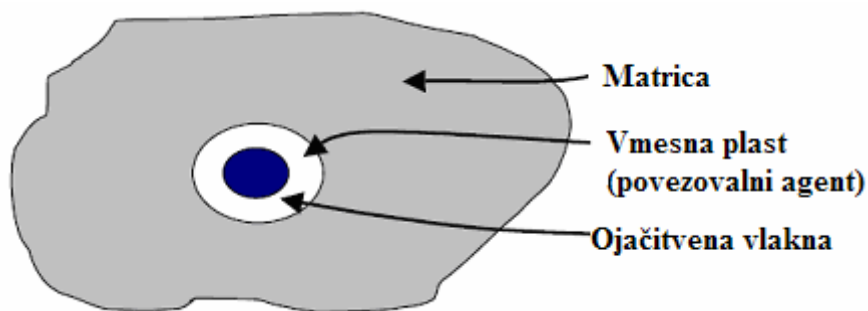
V nadaljevanju je najprej navedena klasifikacija armiranih plastik in posameznih sestavin, vključno z njihovimi opisi. Temu opisu sledi še osnovna teorija računa obnašanja kompozitnih laminatnih elementov, s katero je na koncu poglavja pojasnjeno tudi nekaj fenomenov laminatnih elementov (delaminacija, spremembe mehanskih lastnosti v odvisnosti od poteka vlaken,...).

Bistvo diplomske naloge zajema parametrično študijo nosilne mostne konstrukcije iz armiranih plastik, vključno s preliminarnim dimenzioniranjem. Obravnavana študija mostne konstrukcije je del evropskega projekta FUTURE BRIDGE, ki bo izveden v občini Kamnik, čez reko Kamniško bistrico, sam projekt, pa je nekoliko natančneje opisan v nadaljevanju naloge. Parametrična študija je bila izvedena z metodo končnih elementov s programom SAP2000 v.11, ki nam omogoča tudi kontrolo napetosti po plasteh posameznih laminatov. Kot uvod parametrični študiji je narejen pregled nekaterih mostov izdelanih iz armirane plastike, kateri so že v fazi uporabe.

## **2 KOMPOZITI – ARMIRANE PLASTIKE (FRP – Fiber Reinforced Polymers)**

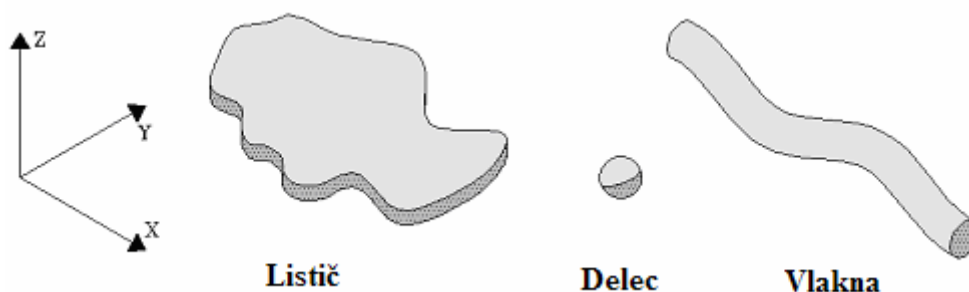
Za učinkovito, varno in inovativno projektiranje konstrukcij je potrebno imeti določen nabor znanja o osnovnih karakteristkah materiala. Pri projektiranju konstrukcij iz konvencionalnih materialov (beton, jeklo, armirani beton, les) imamo dovolj široko poznavanje njihovega sestava in karakteristik, kar je predstavljeno tudi v pripadajočih standardih za posamezen tip materiala. Projektiranje konstrukcij iz FRP-ja se je v zadnjih letih zelo razširilo, do nedavnega pa se je ta material uporabljal le za specialne konstrukcije v letalstvu, vojski,... Ta razširitev in raziskave uporabnosti za namene konstrukcij v gradbeništvo so pripeljale do standardizacije nekaterih tipov konstrukcij ter lastnosti samega materiala (EUROCOMP (Clark, J., 1996), ...).

Polimeri ojačani z različnimi vrstami vlaken ( »FRP« ... Fiber-Reinforced Polymers) imajo posebno mesto med kompozitnimi materiali. V splošnem so kompoziti sestavljeni iz dveh ali več različnih materialov, ki skupaj tvorijo material z novimi izboljšanimi karakteristikami. Z ozirom na polimerne kompozite, so običajno sestavljeni iz ojačitvenih vlaken, povezovalne matrice, polnil in aditivov. Ojačitvena vlakna delujejo kot armatura, ki zagotavlja ustrezne mehanske in temperaturne lastnosti, matrica pa zagotavlja povezanost vlaken ter prenos obremenitev med vlakni preko strižnih napetosti, hkrati pa prevzema tlačne napetosti v kompozitu. Polnila se dodajajo z namenom zmanjšanja stroškov in krčenja končnega izdelka. Aditivi pa pomagajo izboljšati ne le mehanske lastnosti temveč tudi obdelavnost materiala. Včasih se nam v polimernem kompozitu pojavi še dodaten povezovalni agent, t.i. lepilo (»sizing«), ki služi kot povezovalnik med vlakni in matrico, lahko pa ima tudi funkcijo zaščite vlaken med proizvodnjo. Odnos med pravkar naštetimi komponentami običajnega kompozita lahko prikažemo s sledečo shemo:



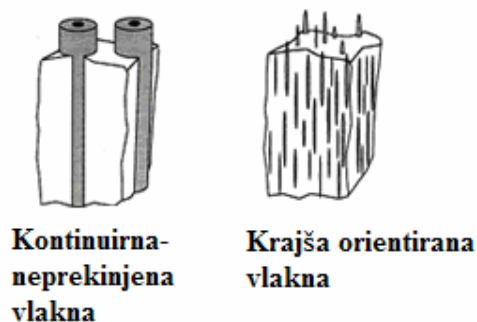
**Slika 2.0** Shematični prikaz polimernega kompozita ojačanega z vlakni.

Z ozirom na število različnih vrst vlaken, matric in če upoštevamo še orientacijo vlaken, kot vplivni parameter na končne lastnosti kompozita, lahko ugotovimo, da imamo na voljo neskončno kombinacij novih kompozitnih materialov. Po večini so matrice organskega izvora, kar pa ni primerno za uporabo pri povišanih temperaturah. Zato se za v primeru izpostavljenosti visokim temperaturam uporabljajo anorganske matrice. Običajno so keramične ali pa kovinske. Podobno kot pri matricah, je armatura lahko organskega ali anorganskega izvora in se jih dobi v obliki vlaken, delcev ali pa lističev, kot je prikazano na sliki spodaj:



**Slika 2.1** Shematični prikaz različnih tipov armature (ojačitev).

Za konstrukcijske namene je najpomembnejša armatura v obliki vlaken, saj najbolj pripomorejo k nosilnosti kompozita. Vlakna lahko glede na obliko razvrstimo v dve skupini. Za nosilne elemente se uporabljajo t.i. kontinuirna oz. neprekinjena vlakna, na drugi strani pa se za manj nosilne elemente uporabljajo krajša vlakna, ki so ponavadi naključno orientirana, lahko pa imajo tudi določeno orientacijo. Na spodnji sliki je primer različnih tipov vlaken. Kompozite ojačane z vlakni lahko srečamo tudi v naravi. Tak primer je les, ki je naravni kompozit, sestavljen iz celuloznih vlaken in lignina.



Slika 2.2 Različni tipi vlaken.

## 2.1 Ojačitvena vlakna

Ojačitvena vlakna lahko opišemo kot material dolge cilindrične oblike in ga lahko primerjamo s človeškim lasom. Premer vlaken v vlaknasto ojačanih polimerih (FRP=VOP=vlaknasto ojačani polimeri) je običajno med 5-14  $\mu\text{m}$ . Med proizvodnim procesom vlaken se molekule orientirajo vzdolž vlaken, poleg tega pa se zmanjša tudi število napak glede na stanje v surovem materialu. Slednje vodi v izboljšanje mehanskih lastnosti vlaken, kar je razvidno tudi iz sledeče primerjave E-steklenih vlaken in njihovega izvornega materiala. Natezna trdnost E-steklenih vlaken doseže približno 70.3 GPa, v surovi obliki istega materiala pa znaša samo 1.5 - 5.8 GPa. Temu povečanju natezne trdnosti po večini botruje zmanjšanje števila in velikosti površinskih napak.

Ponavadi je procent vlaken v kompozitu v razponu med 30% in 70% in jih vgrajujemo v obliki pletenin ali naključno orientiranih krajših vlaken. V večini primerov vlaken za proizvodnjo armiranih plastik v konstrukcijah, so le ta neskončno dolga in jih imenujemo kontinuirna vlakna. S tem jih ločimo od krajših vlaken, dolžine 10nm do 50 mm, ki se uporabljajo za armiranje cementnih materialov. Kontinuirna vlakna orientirana v eni smeri se uporabljajo za armiranje lupin in plošč obremenjenih v eni smeri. Tako armiran laminat ima minimalne mehanske karakteristike v prečni smeri glede na smer vlaken. To lahko s pridom izkoristimo za optimiranje nosilnosti konstrukcije, saj lahko element armiramo samo v obremenjenih smereh in delih obravnavanega elementa. V primeru zagotavljanja enake nosilnosti v vseh smereh ravnine obravnavanega laminata, se je potrebno poslužiti naključne orientacije krajših vlaken ali pa zagotovitve kvazi izotropnosti z večjim številom plasti, ki imajo usmeritve vlaken zamaknjene za določen kot.

Vlakna lahko opredelimo tudi glede na kemijski izvor, kot anorganska ali organska. V sledeči tabeli je nazorno prikazana razporeditev in nekaj primerov vlaken s pripadajočimi lastnostmi, ki se najpogosteje uporabljajo v industriji. Najbolj zastopana vlakna v konstrukterstvu so steklena, karbonska in aramidna vlakna.

**Preglednica 1.1** Primerjalna tabela značilnih lastnosti vlaken; povzeto po različnih virih.

| Vlakno                       |                    | Premer<br>( $\mu\text{m}$ ) | Gostota<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | Natezna<br>trdnost (GPa) | Modul<br>elastičnosti<br>(GPa) |      |
|------------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|------|
| Anorganska vlakna            | Steklo             | E-steklo                    | 8-14                           | 2540                     | 3.45                           | 72.4 |
|                              |                    | S-steklo                    | 8-14                           | 2490                     | 4.58                           | 86.2 |
|                              |                    | C-steklo                    | 8-14                           | 2560                     | 3.31                           | 69   |
|                              | Karbon             | HS Karbon, T300             | 7                              | 1760                     | 3.53                           | 230  |
|                              |                    | AS4 Karbon                  | 7                              | 1800                     | 4                              | 228  |
|                              |                    | IM7 Karbon                  | 5                              | 1800                     | 5.41                           | 276  |
|                              |                    | GY80 Karbon                 | 8.4                            | 1960                     | 1.86                           | 572  |
|                              | Boron              | 20-50                       | 2600                           | 3.44                     | 407                            |      |
| Silikon Karbon<br>(keramika) | 100-150            | 3190                        | 1.52                           | 483                      |                                |      |
| Organska vlakna              | Aramid (Kevlar 49) | 12                          | 1440                           | 3.62                     | 130                            |      |
|                              | Polietilen         | 10-12                       | 970                            | 2.7                      | 87                             |      |

### 2.1.1 Vlakna organskega izvora

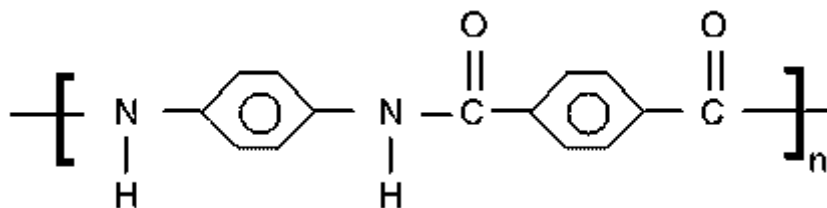
Za vlakna organskega izvora je značilno, da imajo osnovno verigo v kateri so z močnimi kovalentnimi vezmi povezani ogljikovi atomi, na katere so vezani še drugi atomi (dušikovi, kisikovi,...). Med verigami se ustvarjajo šibke Van der Waalsove vezi, ki med drugim povzročajo tudi močno neurejeno strukturo osnovnih verig, kar se kaže v nizki trdnosti in majhnem elastičnem modulu. Mehanske lastnosti je mogoče izboljšati samo s povečanjem urejenosti teh verig.



Nizka specifična teža in visoka nosilnost vlaken organskega izvora diktira njihovo uporabnost v primerih, kjer je teža kritičen parameter. Aramidna vlakna so najbolj znana in zastopana za konstrukcijske namene.

### 2.1.1.1 Aramidna vlakna

Prva generacija kablov za prednapenjanje, v katerih so bila uporabljena aramidna vlakna, so bila proizvedena v osemdesetih letih v Evropi in na Japonskem, danes pa jih lahko dobimo tudi v obliki navadnih armaturnih palic. Aramidna vlakna so sestavljena iz aromatičnih poliamidov, ki jih odlikuje visoka specifična trdnost. Imajo razločno rumeno barvo, negativni temperaturni razteznostni koeficient in so najlažji med vsemi visokonosilnimi vlakni (približno  $1.4 \text{ g/cm}^3$ ). Trenutno je na trgu prisotno pet različic aramidnih vlaken, ki se prodajajo pod znanimi imeni Kevlar<sup>®</sup>, Twaron<sup>®</sup> in Technora<sup>®</sup>.



Slika 2.3 Osnovni gradnik aramidnih vlaken.

Pravkar omenjena vlakna imajo podobno trdnost, vendar različne module elastičnosti, ki varirajo med 70 GPa in 125 GPa. Pri aramidnih vlaknih lahko opazimo izrazito nelinearno obnašanje v tlaku in veliko sposobnost absorbiranja energije. Nelinearno obnašanje v tlaku, zmanjšana tlačna in prečna nosilnost je posledica kompozicije vlaken iz številnih mikro vlaken. Kombinacija relativno visoke cene, težavnosti proizvodnje, visoke absorpcije vlage (do 6% teže), nizke talilne temperature (približno  $425^\circ\text{C}$ ), degradacijo pod vplivom UV žarkov in že prej omenjenih relativno slabih tlačnih mehanskih lastnosti, so vzrok za njihovo dokaj nizko prisotnost v inženirskih aplikacijah. V primerjavi s karbonskimi in steklenimi vlakni imajo aramidna vlakna slabšo sprijemno sposobnost z matrico, poleg tega pa je moč opaziti tudi povečano lezenje. Prednost aramidnih vlaken, kot so izjemno visoka žilavost in

trdnost, se s pridom uporabi v številnih industrijskih produktih, bodisi v surovi obliki ali pa kot armatura za ojačitev FRP kompozitov, kjer je zahtevana absorpcija energije. Zelo dobro poznani primeri, kjer je zahtevana absorpcija energije, so neprebojni zaščitni telovniki, čelade in blažilci v avtomobilih za sipanje energije v primeru trka vozila.

### **2.1.1.2 Druga organska vlakna**

#### **2.1.1.2.1 Polietilenska vlakna**

Izdelava teh vlaken je zahtevna, saj je težko zagotoviti zadostno usmerjenost in urejenost molekul. Sicer imajo vlakna zelo veliko natezno trdnost in majhno specifično težo, zato dosegajo največjo specifično trdnost med vsemi vlakni. Njihov elastični modul je komaj kaj večji od modula steklenih vlaken in precej manjši od modula ogljikovih ali aramidnih vlaken. Tudi njihova tlačna trdnost je zaradi plastovite strukture nizka. Njihova kemijska odpornost je visoka, po drugi strani pa je njihova odpornost na visoke temperature nizka, kar se včasih izkorišča predvsem za talilno lepljenje.

Njihova uporaba v kompozitnih materialih je predvsem omejena zaradi problematične sprijemnosti z različnimi matricami. Kot dodatna negativna faktorja pa se pojavljata še cena in sorazmeroma majhen modul elastičnosti.

#### **2.1.1.2.2 Poliesterska vlakna**

Imajo nizko gostoto, veliko žilavost, dobro odpornost na udarce, kot slabost pa se pojavi nizek modul elastičnosti. Ravno slednje botruje izogibanju uporabe tovrstnih vlaken v kompozitih. Uporabljajo se predvsem tam, kjer je potrebna velika odpornost na abrazijo, udarce, majhna teža in nizka cena. Tak primer je naknadno ojačevanje armirano betonskih elementov s premalo strižne armature za povečanje duktilnosti sicer krhkih elementov.

### **2.1.2 Vlakna anorganskega izvora**

Anorganska vlakna, bodisi metalna ali nemetalna, so bolj odporna, toga, imajo višjo točko taljenja in prenesejo višje temperature, kot običajna organska vlakna. Kot dobre lastnosti je potrebno omeniti tudi njihovo negorljivost ter odlično obnašanje v visokih temperaturah in korozivnem okolju. Ena od slabih lastnosti, z izjemo za metalna vlakna, pa je krhkost. Premer anorganskih vlaken se giblje med 5nm in 15nm z izjemo za vlakna, ki jih pridobimo s pomočjo metode izparilne dekompozicije (npr. vlakna borata ali silikon-karbida) so veliko debelejša in merijo med 100nm in 150nm. Najbolj znana vlakna anorganskega izvora so karbonska in steklena, mednje pa uvrščamo tudi kovinska, borova, silika, silika-karbidna in keramična vlakna. Spodaj so podrobneje opisana karbonska in steklena vlakna.

#### **2.1.2.1 Karbonska vlakna**

Karbonska vlakna, ki jih uporabljamo za proizvodnjo kompozitov, so umetna vlakna, kljub temu, da grafit obstaja v naravi. Ogljikova vlakna z zelo visokim modulom elastičnosti se izdelata s karbonatizacijo predhodnih organskih vlaken, ki se nahajajo v obliki tekstilnih vlaken, katera je mogoče karbonatizirati ne da bi se stalila. Karbonatizaciji sledi grafitizacija pri visoki temperaturi in kot končni produkt dobimo vlakno, ki je po sestavi anorgansko.

Za izdelavo vlaken je najpomembnejša plastovita kristalizacijska oblika ogljika, kjer so atomi v posamezni plasti razporejeni v šesterokotnem vzorcu. Vsak ogljikov atom je povezan s tremi sosednjimi atomi z močnimi kovalentnimi vezmi. Plasti ogljikovih atomov, pa so med seboj povezane s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi. V taki strukturi so atomi v posamezni plasti zelo gosto razporejeni. Elastični modul je odvisen od kemijskih vezi, zato se močne kovalentne vezi med ogljikovimi atomi odražajo v visokem modulu elastičnosti v ravnini plasti, šibke Van der Waalrove vezi, ki nastopajo med posameznimi plastmi, pa narekujejo nizek modul elastičnosti v smeri pravokotno na ravnine plasti. Karbonska vlakna je mogoče dobaviti v različnih kvalitetah in so za razliko od ostalih vrst vlaken zelo odporna na povišane temperature. Dobre mehanske lastnosti zadržijo vse do temperature 1500°C, vendar je

potrebno opozoriti na oksidacijo v primeru nezaščitenih vlaken in temperaturi 427°C na zraku.

Različne kvalitete, ki so na voljo, zavisijo od proizvodnega procesa in čistosti vlaken. V primerjavi s steklenimi vlakni imajo karbonska vlakna višji modul elastičnosti, natezno in tlačno trdnost, opornost na korozijo, lezenje in na utrujanje, v kočni fazi pa imajo karbonska vlakna tudi nižjo gostoto (približno 1,8g/cm<sup>3</sup>) od steklenih. Delimo jih na skupine glede na natezni modul elastičnosti, ki ga dosegajo:

- standardni modul (<265 GPa),
- srednji modul (265-320 GPa),
- visoki modul (320-440 GPa),
- izredno visoki modul (>440 GPa).

Natezna trdnost vlaken se giblje od 3GPa do 6GPa in ni odvisna od modula elastičnosti, tako da lahko najdemo vlakna vseh trdnosti v vsaki od skupin.

Ena od njihovih glavnih negativnih lastnosti je cena, ki znaša približno \$50/kg za najcenejšo varianto. Ravno cena je omejila uporabo karbonskih vlaken na specialne konstrukcije, kjer je potrebna visoka nosilnost. Poleg cene se pojavita še dve pomanjkljivosti. To sta nizka odpornost na udarce (nižja kot pri steklenih ali aramidnih vlaknih) in velika krhkost.

Široko so zastopana v industriji športnih avtomobilov, športnih artiklov in navsezadnje v letalski industriji, ki je tudi glavno gonilo pri razvoju armiranih plastik nasploh.

### **2.1.2.2 Steklena vlakna**

Steklana vlakna so med najbolj uporabljenimi anorganskimi vlakni, čemur botruje tudi njihova nizka cena v primerjavi z ostalimi vlakni. Na voljo je široka paleta steklenih vlaken, ki se med sabo razlikujejo po kemični sestavi. Tako ločimo tri osnovne kategorije steklenih vlaken:

- E-steklo je dobilo ime zaradi svoje dobre električne izolativnosti (E: »electrical«),

-C-steklo ima boljšo odpornost na kemijsko korozijo (C: »corrosion«),

-S-steklo je zaradi večje vsebnosti silicija bolj odporno na visoke temperature (S: »silica«).

V praksi je med najbolj zastopanimi E-steklo, zaradi njegove cene (\$10/kg), ki je približno štirikrat nižja od naslednjega na cenovni lestvici, S-stekla. E-steklo je tudi najmanj nosilno izmed zgoraj naštetih. V primerjavi s karbonskimi in aramidnimi vlakni pa imajo steklena vlakna nižjo trdnost in modul elastičnosti. Zastopana so v vseh segmentih industrije (letalska, športna, avtomobilska,...). Njihova glavna slabost pa je relaksacija pod dolgotrajno obtežbo.

### **2.1.2.3 Keramična vlakna**

Keramična vlakna se večina uporabljajo kot lomljena vlakna pri temperaturah nad 1000°C. Pravakar omenjena sposobnost, prenašanja visokih temperatur, nam omogoča izdelavo posebnih termoizolacijskih kompozitov. Sorazmerno visoka cena narekuje njihovo omejeno uporabo, največkrat v letalski industriji. Običajno so v obliki brčic (»whiskers«), ki so kratka in izredno trdna vlakna, ki nastanejo s postopkom kristalizacije in imajo polikristalinsko strukturo.

### **2.1.2.4 Borova vlakna**

Ta vlakna so v svoji zasnovi kompozitna, kjer so kovinska (večinoma volframova) ali posebna ogljikova vlakna prevlečena s plastjo bora, ki bistveno izboljša mehanske lastnosti vlaken.

Nekoč so ta vlakna obetala veliko in pričakovalo se je, da bodo postala prevladujoča, vendar je cena zapletene proizvodnje tako visoka, da se danes uporabljajo redko, po večini za vojaške namene.

### **2.1.2.5 Kvarčna vlakna**

Pri teh vlaknih gre za posebno izvedbo steklenih vlaken, z veliko vsebnostjo kremenca. Imajo bistveno boljše mehanske lastnosti kot steklena ter izredno odpornost na visoke temperature. Majhna in draga proizvodnja zavirata širšo porabo teh vlaken.

### **2.1.3 Oblike vlaken in tkanin za armiranje polimernih matric**

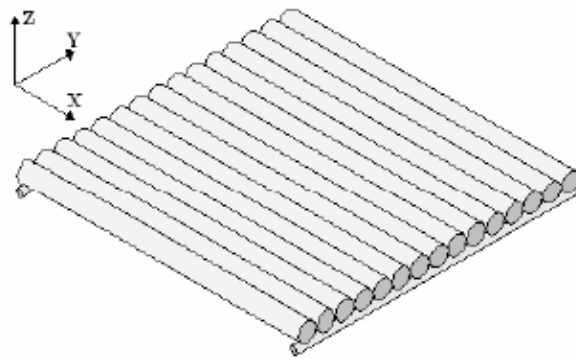
Vlakna, ki se uporabljajo za armiranje polimerov, imajo podobne dimenzije kot niti v tekstilni industriji, zato je možno metode šivanja iz tekstilne industrije prenesti tudi v proizvodnjo armiranih plastik. Posamezna vlakna se velikokrat tke ali šiva v različne tkanine za poenostavitev dela z njimi in zagotovi tudi dodatne smeri vlaken, kar pa nam omogoča izdelavo kompozitov, ki so nosilni v večih smereh. Vlakna so prepletena med seboj. Lahko pa se uporabi sekundarni material, ki jih poveže in zagotovi njihov pravi položaj. Vrste tkanin se ločijo po usmerjenosti posameznih vlaken in metodah, po katerih so med seboj povezana. Tako lahko razlikujemo med dvo ali tro dimenzionalno orientiranimi vlakni v tkaninah. Glavni tipi dvodimenzionalnih tkanin, ki so zastopana v konstrukterstvu so opisani v nadaljevanju. Vsaka vrsta tkanin je na voljo v različnih masah na kvadratni meter.

#### **2.1.3.1 Tkanina s kratkimi, naključno orientiranimi vlakni (»Chopped strand mat – CSM«)**

Obravnavane tkanine so narejene iz naključno orientiranih kratkih in sorazmerno debelih vlaken. V fazi proizvodnje so ta vlakna povezana s tankim filmom lepila, ki obdrži pozicijo vlaken do vgradnje v matrico. Pogosto je to lepilo takšno, da se raztopi v kontaktu s stirenskimi matricami in tako lepilo nima nosilne vloge v končnem izdelku armirane plastike. Tovrstne tkanine imajo nizko natezno trdnost in modul elastičnosti, kar je posledica naključne orientacije vlaken. Pravkar navedeno nam omejuje uporabo tovrstnih tkanin na manj pomembne elemente in v zaščitnih plasteh.

### 2.1.2.5 Enoosne tkanine

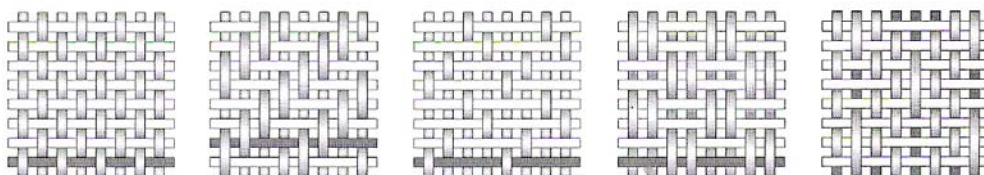
Že po imenu je moč sklepati, da gre za tkanino z glavnimi vlakni usmerjenimi paralelno v določeni smeri. Običajno ima takšna tkanina majhno število prečnih vlaken, ki imajo funkcijo povezovanja glavnih vlaken. Tovrstne tkanine se vgrajujejo v laminato v smeri glavnih napetosti vzporedno z osjo vlaken in s tem maksimalno izkoristimo nosilnost. Na sliki spodaj je prikazana tkanina z enoosno usmerjenimi vlakni.



Slika 2.4 Prikaz enoosno usmerjenih vlaken.

### 2.1.3.3 Tkanine nosilne v dveh smereh

Tovrstne tkanine imajo enako število vlaken v dveh med sabo pravokotnih smereh. Na naslednji sliki je prikazanih nekaj načinov tkanja. Potrebno je tudi omeniti, da so obravnavane tkanine, zaradi neravnosti vlaken, slabše nosilne od dveh med sabo pravokotno naloženih enoosno usmerjenih vlaken, kjer je upoštevana ista količina vlaken za obe vrsti tkanin. V primeru tlaka imamo zaradi neravnosti vlaken vnaprej izbočeno linijo vlaken, kar povzroča hitrejšo porušitev, v primeru natega pa se vlakna poskušajo zravnati in s tem povzročajo napetosti pravokotno na ravnino lamele.

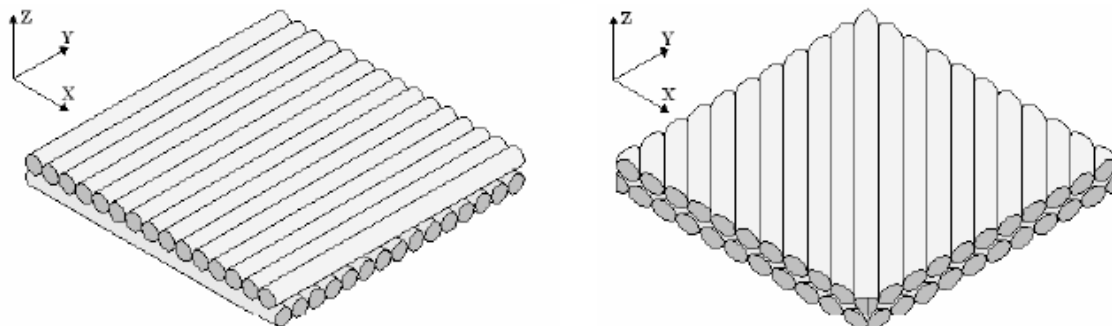


Slika 2.5 Prikaz različnih načinov tkanja.

#### 2.1.3.4 Večosne tkanine

Tovrstne tkanine so sestavljene iz večih plasti enoosnih tkanin, pri čemer vlakna v posamezni plasti potekajo v eni smeri, plasti pa so med seboj sešite s šibkimi in redkimi sekundarnimi šivi, ki nimajo nobene funkcije v smislu prenašanja obtežbe. Vlakna za sekundarne šive so ponavadi iz poliestra, ki ima nizko ceno in primerne lastnosti za šivanje. Pri tovrstnih tkaninah se izognemo v naprej deformirani obliki vlaken, kot je to bilo opisano za prejšnjo vrsto tkanin in se s tem izboljšajo mehanske karakteristike. Kot dodatna prednost večosnih tkanin pa se pojavi tudi lažja obdelava, saj je tovrstne tkanine precej lažje prilagajati zapletenim oblikam.

Glavna pomankljivost tovrstnih tkanin pa je sekundarna povezovalna nit, ki se z matrico veže drugače in velikokrat slabše kot primarna vlakna in s tem predstavlja šibko mesto kompozita. Naslednji problem pa se izpostavi v primeru večih plasti vlaken, saj z določenimi avtomatiziranimi procesi težko zagotovimo zadostno količino matrice med vsemi plastmi vlaken (problem omakanja vlaken).



**Slika 2.6** Na sliki sta prikazana dva primera dvoosnih tkanin.

#### 2.1.4 Povezovalni agent (»sizing«)

Poškodbe vlaken so lahko posledica proizvodnega procesa. Za minimiziranje tovrstnih poškodb se na vlakna v predhodni fazi nanese t.i. povezovalni agent (»sizing«), ki zaščiti vlakna pred mehanskimi poškodbami. Ime, povezovalni agent, pa ima pravzaprav zaradi njegovega prvotnega povezovalnega namena med matrico in vlakni, saj imajo določena



vlakna omejeno sprejemnost z matrico, kar pa rešujemo z obravnavanim povezovalnim agentom.

### 2.2.0 Matrice

Ojačitvena vlakna, obravnavana do sedaj, imajo visoke natezne module elastičnosti in trdnosti vzdolž osi vlaken, vendar pa je za praktično uporabo potrebno zagotoviti tudi določeno stopnjo tlačne in strižne odpornosti. To dosežemo s povezavo vlaken v trden material preko matric oz. rezin. Rezine imajo predvsem funkcijo razporeditve obtežbe med vlakni, pomembno pa vplivajo tudi na strižno in kemično odpornost, trajnost in odpornost na povišane temperature celotnega kompozita.

Matrica mora biti toga, vendar se ne sme porušiti krhko. Porušitev vlaken v nategu je večinoma zelo krhka, zato je takšna porušitev značilna tudi za natezno obremenjen kompozit. Kadar je kompozit natezno obremenjen, se mora matrica vsaj toliko deformirati, kot vlakna.

Žilavost opisuje sposobnost preprečevanja širjenja razpok v materialu. V splošnem velja pravilo, da je ob bolj deformabilni matrici tudi celoten kompozit bolj odporen na širjenje razpok. Z drugimi besedami, bolj krhke matrice nam dajo kompozit, ki hitreje rapoka in tudi hitreje propada.

Podobno kot vlakna, lahko tudi matrice ločimo glede na njihov izvor na anorganske in organske. Anorganske matrice nam omogočajo obstojnost kompozitov pri visokih temperaturah in visokih stopnjah abrazije. Na drugi strani pa nastopajo matrice organskega izvora, ki imajo dobre kemične lastnosti in odlične mehanske lastnosti, v primerjavi z anorganskimi (keramičnimi) matricami pa so tudi veliko cenejše. V splošnem so sposobne prenesti temperature do 150°C in maksimalno do 300°C. Nizka cena in sprejemljivo delovno temperaturno območje sta razloga za širšo uporabo organskih matric v gradbeništvu. Organske matrice so z drugimi besedami polimerne matrice, ki jih delimo na duroplaste in termoplaste. V nadaljevanju so tudi podrobneje opisani.

### 2.2.1 Polimeri

Kot že omenjeno zgoraj, so matrice po večini narejene iz polimerov. Polimeri so snovi, ki so zgrajene iz makromolekul, v katerih se določena strukturna enota (iz majhnega števila gradnikov) večkrat ponavlja. Strukturna enota polimerov se imenuje »mer«. Meri so med seboj povezani s kovalentnimi vezmi, molekule pa s sekundarnimi kemijskimi vezmi (Van der Waalsova, vodikova vez,...). Kovalentne vezi povzročajo slabo prevodnost elektrike in toplote. Molekule polimerov običajno vsebujejo med 1000 in 100 000 gradnikov. Polimeri nastanejo s procesom polimerizacije, ki je lahko kondenzacijska (postopna reakcija molekul v verigo; stranski produkt je običajno voda) ali aditivna (osnovni gradniki se združujejo brez stranskega produkta). Glede na obnašanje se delijo na duroplaste in termoplaste in je vsaka od teh skupin kasneje tudi podrobneje opisana.

Kljub precej bolj zapleteni zgradbi od kovin in keramik, je njihova proizvodnja veliko enostavnejša in cenejša. Imajo dokaj nizko trdnost in modul elastičnosti ter so veliko bolj občutljivi na povišane temperature in UV žarke.

Obnašanje polimerov v ognju je lastnost, ki je odvisna od večih parametrov, kot so sposobnost širjenja plamena po površini, penetracija goriva in indeks kisika. Indeks kisika je minimalna količina potrebnega kisika, ki omogoča gorenje.

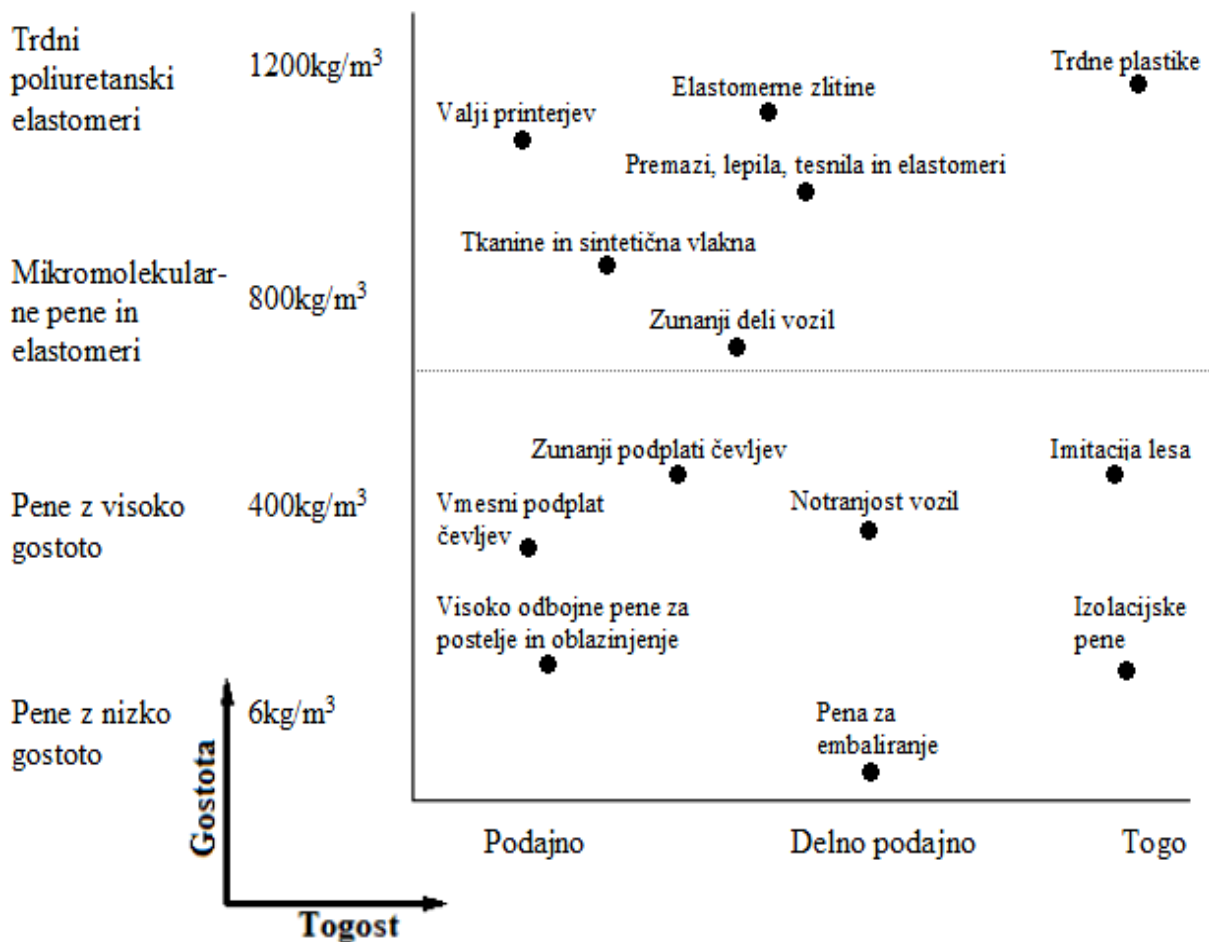
Stopnja gorljivosti polimera je funkcija treh glavnih parametrov:

- vrsta in količina matrice (prevladujoč faktor!),
- količina dodatkov, ki zavirajo vžig,
- vrsta in količina ojačitvenih vlaken.

Poliester, vinil ester, epoxidi in fenolni polimeri so materiali, ki kažejo na višjo požarno odpornost. Fenolne matrice so še posebej zanimive, saj imajo nizko stopnjo oddajanja dima brez toksičnih produktov. V primeru uporabe duroplastov (epoksidi), se ponavadi dodajajo aditivi za preprečevanje vžiga, dodajajo pa se tudi steklena vlakna.

### 2.2.1.1 Duroplasti (duromeri)

Duroplasti so polimeri, ki postanejo pri segrevanju trdi in togi in taki ostanejo tudi po ponovnem ohlajanju. Duroplastičnost je značilna za zamrežene polimere, ki so nastali s stopenjsko polimerizacijo. Pri zvišanju temperature se proces stopenjske polimerizacije nadaljuje, molska masa in zamreženost pa se večata. Zato molekule postanejo vedno bolj toge, material pa vedno bolj trd. Med najpomembnejšimi predstavniki duroplastov v konstrukterstvu je epoksidna smola, zelo pomemben predstavnik pa so tudi poliuretanske pene. Poliuretanske pene se ponavadi uporabljajo kot izolacije, polnila ali pa kot jedra za sendvič plošče. Na sliki spodaj je prikazana razvrstitev poliuretanov glede na njihovo gostoto in togost.



Slika 2.7 Razvrstitev poliuretanov glede na njihovo togost in gostoto.

**Preglednica 2.1** Tipične vrednosti duroplastov (pri temperaturi 23°C) povzete po *Fibre Composite Design and Development Group 1997; Hull & Clyne 1996*

|   | <b>Epoksid</b> | <b>Vinil-ester</b> |
|---|----------------|--------------------|
| <b>Gostota (kg/m<sup>3</sup>)</b>                                   | 1200-1300      | 1120-1320          |
| <b>Natezna trdnost (MPa)</b>  | 55-130         | 73-81              |
| <b>Natezni modul elastičnosti (MPa)</b>                             | 2.75-4.1       | 3-3.5              |
| <b>Poissonov količnik</b>   | 0.2-0.33       | 0.2-0.3            |
| <b>Elongacija (%)</b>   | 4-8            | 3.5-5.5            |
| <b>Temperaturni razteznostni koeficient (10<sup>-6</sup>m/m/°C)</b> | 50-80          | 52.6-64.8          |
| <b>Temperatura ki povzroči zvijanje (°C)</b>                        | 50-300         | 93-135             |
| <b>Krčenje (%)</b>  | 0.5-2          | 5.4-10             |
| <b>Približna cena (\$/kg)</b>                                       | 10-12          | 6-8                |

### 2.2.1.1.1 Epoksidne smole

Epoksidne smole so najpomembnejši predstavnik duroplastov, ki se uporabljajo za matrice kompozitov. Epoksid je polimer, ki vsebuje epoksidno skupino (kisikov atom povezan z ogljikovima). Družina epoksidnih smol je zelo široka, ker se uporablja cela vrsta dodatkov, ki spreminjajo osnovne značilnosti. Pogosto se z dodatki vpliva na viskoznost, gibkost, občutljivost na UV svetlobo,... Imajo relativno visoko delovno uporabno temperaturno območje, vse do 300°C. Odlikuje jih tudi odlična odpornost na kemikalije in vremenske vplive, nizka stopnja krčenja (do 3%), sposobnost penetriranja med vlakna in sprijemnost z vlakni. Epoksidi imajo tudi negativno plat, ki se odraža predvsem v dolgem negovalnem času, visoki ceni in nizki odpornosti na udarce.

Epoksidi dobujemo v dveh delih – rezina in trdilec. Trdilec povzroča kemijsko reakcijo za oblikovanje matrice. Z izbiro količine trdilca lahko tudi vplivamo na karakteristike končne matrice. Kemijska reakcija je eksotermna in jo lahko pospešimo z višanjem temperature.

### **2.2.1.1.2 Preostale duroplastične smole**

Sem uvrščamo poliamide in bismalemide (BMI). Poliamidi so polimeri, ki prenesejo relativno visoke temperature (250-300°C). Kot preostali duroplasti je tudi ta krhek, glavni problem pa predstavlja eliminacija vode in raztapljanja med nego polimera.

Bismalemidi imajo nekoliko nižjo stopnjo temperaturne obstojnosti (180-200°C) v primerjavi s poliamidi in so zelo odporni na temperaturno - vlažnostne efekte.

### **2.2.1.2 Termoplasti (plastomeri)**

Termoplasti so polimeri, za katere je značilno, da imajo dolge linearne molekule in kateri pri segrevanju postanejo mehki, pri kasnejšem ohlajanju in po preoblikovanju pa ponovno postanejo trdi. Prehod trdo-mehko se običajno ponavlja tudi pri večkratnem segrevanju in ohlajanju in ni potrebna kemijska reakcija. Potrebno se je tudi zavedati, da izpostavljenost previsoki temperaturi ali predolga izpostavljenost primerni temperaturi poslabša lastnosti termoplastov, predvsem odpornost na udarce.

Linearne molekule termoplastov so sposobne prenesti precej večje deformacije pred porušitvijo od duroplastov, pri katerih so verige močno križem povezane. Deformacije termoplastov se pri porušitvi gibljejo v območju 30% do 100%, za razliko od duroplastov, kjer je to območje med 1% in 3%. Največji problem termoplastov je njihova odpornost na vplive okolja. Njihove lastnosti se hitro slabšajo z večanjem temperature in vsrkavanjem vlage. Polimeri namreč v vlažnem okolju nabreknejo, spremeni pa se jim tudi temperaturni razteznostni koeficient. Temperaturna obtežba lahko povzroči velike notranje napetosti zaradi razlik med temperaturno razteznostnim koeficientom matrice in vlaken, kar je še posebno izrazito pri polimerih. Posebno pozornost je potrebno nameniti tudi omočitvi vlaken, saj imajo termoplasti zelo visoko viskoznost pri obdelovalni temperaturi. Ravno zaradi te visoke viskoznosti so potrebne visoke strižne napetosti za zagotovitev zadostnega tečenja matrice, kar pa rezultira v poškodovanju vlaken (prekinitve kontinuirnih vlaken).

Poli eter eter keton (PEEK) je najbolj zastopan predstavnik matric v visoko obremenjenih in zmogljivih aplikacijah. Odlikuje ga tudi visoka odpornost na lomljenje, ki je pomembna v konstrukterstvu za določanje tolerance poškodb. Naslednji predstavnik je polifenil sulfid (PPS), ki ima dobro odpornost na kemikalije. Polisulfon (PSUL) je amorfen termoplast z

visoko stopnjo elongacije pred poružitvijo in ohranijo odlično stabilnost tudi pri povišanih temperaturah in vlagi. V praksi so med najbolj zastopanimi plastomeri polistiren, polvinil klorid, nylon in nenasičene poliestri, pri čemer so slednji najbolj zastopani v konstrukterstvu in so v nadaljevanju tudi podrobneje opisani.

**Preglednica 2.2** *Tipične vrednosti termoplastov (pri temperaturi 23°C)*

|   | <b>Nezasičeni poliester</b> | <b>PEEK</b> | <b>PPS</b> | <b>PSUL</b> | <b>PEI</b> | <b>PMR-15</b> |
|---|-----------------------------|-------------|------------|-------------|------------|---------------|
| <b>Gostota (kg/m<sup>3</sup>)</b>                                   | 1100-1400                   | 1300-1320   | 1360       | 1240        | 1270       | 1400          |
| <b>Natezna trdnost (MPa)</b>  | 34.5-103.5                  | 100         | 82.7       | 70.3        | 105        | 185.5         |
| <b>Natezni modul elastičnosti (MPa)</b>                             | 2.1-3.45                    | 3.24        | 3.3        | 2.48        | 3          | 3.03          |
| <b>Poissonov količnik</b>   | 0.2-0.3                     | 0.4         | 0.36       | 0.37        | 0.37       | 0.36          |
| <b>Elongacija pri poružitvi (%)</b>                                 | 1-5                         | 50          | 4          | 75          | 60         | 12            |
| <b>Temperaturni razteznostni koeficient (10<sup>-6</sup>m/m/°C)</b> | 30.9-60                     | 47          | 49         | 56          | 56         | 36            |
| <b>Temperatura ki povzroči zvijanje (°C)</b>                        | 60-205                      | 160         | 135        | 174         | 200        | 274           |

#### **2.2.1.2.1 Nenasičene poliesterske smole**

Nenasičene poliesterske smole imajo veliko dvojnih ogljikovih vezi (C=C). Poliestri nastanejo s kemično reakcijo med glikolom (etilen, propilen ali dietilen) in nenasičeno dibazno kislino. Pojem nenasičen pomeni, da so v molekuli prosta reakcijska mesta. Med izdelavo se dodaja razna redčila (stiren) za zmanjšanje viskoznosti, absorberje za UV žarke ter sredstva za nego (katalizatorje) in trdilce. Dodajanje stirena povzroči višjo stopnjo požarnega tveganja za tekoči poliester, poleg tega pa je takšna masa tudi kancerogena.

Poliesterske smole so močno zastopane v proizvodnji kompozitnih materialov. To pa predvsem zaradi njihove nizke cene in enostavnega avtomatiziranega postopka proizvodnje. Ponujajo še druge dobre lastnosti kot so dimenzionalna stabilnost, dobra omočljivost vlaken in penetracija med vlakni ter dobra odpornost na kemikalije (na hidrokarbonate). Na drugi

strani pa je njihova uporaba omejena z nizko odpornostjo na udarce in visoko stopnjo krčenja med nego (okoli 8-12%). Občutljivi so tudi na UV žarke in v primeru izpostavljenosti izparevanja vode obstaja nevarnost hidrolize. Za uporabo poliestrov v območjih, kjer je nevarnost požara, morajo biti zaščiteni z retardanti vžiga.

### 2.2.2 Kovine

Lastnosti kovin je mogoče spreminjati z različnimi tehnologijami, predvsem z vgradnjo drugih snovi (npr. ogljikovih atomov pri jeklu) v kristalno strukturo in z ustvarjanjem dislokacij. S temi posegi bistveno vplivamo na povečanje meje elastičnosti in krhkosti, zelo malo pa na elastični modul. To je posledica predvsem tujkov, ki kristalno mrežo popačijo, njihove lastnosti pa niso izražene. Na elastični modul lahko vplivamo samo z vgradnjo vlaken v kovinsko matrico. Vlakna, ki se jih vgrajuje v kovinske matrice, imajo tudi manjšo gostoto od kovin, kar pa vodi k povečanju relativne togosti  $E/\rho^2$  (Chawla, K., 1998).

### 2.2.3 Keramike

Keramike so sestavljene iz ene ali več kovin in nekovinskih atomov kot so kisik, ogljik in dušik. Povezujejo jih močne kovalentne vezi, kar ima za posledico manjše zdrse kristalne strukture v primerjavi s kovinami. Zato se keramike pred poružitvijo zelo malo deformirajo, imajo zelo nizko žilavost in so zelo trde. Karakterizira jih tudi anizotropno obnašanje, občutljivost na mehanske in temperaturne šoke, imajo pa tudi nizko natezno trdnost. Na drugi strani pa jih odlikuje visok modul elastičnosti, nizka gostota in odpornost na visoke temperature.

Posebne vrste keramike je tudi steklokeramika, kjer 95% do 98% volumna materiala predstavlja kristalna, preostanek pa steklasta faza. Kristali kristalne faze so izredno drobni delci, velikosti manj kot  $1\mu\text{m}$ . Tako drobne delce se dobi z dodajanjem snovi za tvorjenje osnovnih jeder ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) v času taljenja in skrbno načrtovano kristalizacijo. V postopku dobimo visoko kvalitetno mikroskopsko strukturo brez por. To pa je tudi razlog za bistveno

boljše mehanske lastnosti od keramik, s primernimi dodatki pa še izredno nizek temperaturni razteznostni koeficient, s čimer dosežemo visoko odpornost na temperaturne spremembe.

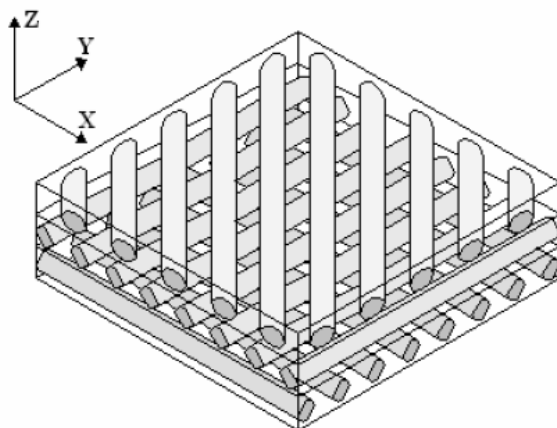
#### **2.2.4 Polnila za matrice**

Polnila se dodajajo v matrice za doseganje nižje cene in lažjega končnega izdelka. To dosežemo bodisi z oblikovanjem jedra v materialu ali pa jih vgradimo v maso matrice. Vrsta in količina polnil vpliva na končne mehanske lastnosti kompozita, vplivajo pa tudi na spremembo viskoznosti. Tipična polnila, ki se uporabljajo v praksi za izdelavo armiranih plastik so bombaž, lesna celuloza, pesek, steklene mikrosfere in mikrofilterski pepel, pri čemer so zadnje tri primerne za uporabo v konstrukcijske namene v gradbeništvu.



### 3 LAMELIRANE ARMIRANE PLASTIKE IN NJIHOVE LASTNOSTI

Izkaže se, da je za potrebe v konstrukterstvu najbolj primerna oblika osnovnega prereza konstrukcije laminat (več različno orientiranih plasti) v primeru, da imamo polimerne kompozite kot izbrani material. Komponente izdelane po tem principu, imajo ponavadi kontinuirna vlakna, ki potekajo neprekinjeno po celotni dolžini elementa. Laminati so sestavljeni iz večih lamel, ki imajo določene orientacije vlaken, debelino in materialne lastnosti. Ravno te pravkar omenjene možnosti nam omogočajo optimizacijo togosti in nosilnosti posamezne komponente. Lamela je plošča oz. plast, ki je ojačana z enosmernimi vlakni ali tkanino oblito z matrico in s tem tudi predstavlja ortotropen material z glavnimi osmi v smeri vlaken. Na sliki 3.1 spodaj je prikazan laminat, sestavljen iz treh plasti z različno orientacijo vlaken. Pomembno je omeniti, da lahko v primeru relativno tankih laminatov zanemarimo lastnosti materiala pravokotno na ravnino. V naslednji tabeli 3.1 so prikazane karakteristike različnih laminatov, tabela 3.2 pa navaja lastnosti posameznih tipov lamel.



**Slika 3.1** Na sliki je prikazan sestav troplastnega laminata.

**Preglednica 3.1** Primerjava osnovnih lastnosti armiranih plastik z lastnostmi tradicionalnih materialov (Springolo M. 2005).

| Vrsta kompozita                     | Karbon/epoksi AS4/3501-6 | Karbon/epoksi T300/5208 | Karbon/epoksi G30-500/2431 | Boron/epoksid | Kevlar 49/epoksi | E-Steklo/epoksi | Jeklo (za valjane prereze) | Beton | Les (za lesene nosilce) |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------|------------------|-----------------|----------------------------|-------|-------------------------|
| Modul $E_{11}$ (GPa)                | 131                      | 153                     | 129                        | 204           | 76               | 38.6            | 200                        | 25    | 12                      |
| Modul $E_{22}$ (GPa)                | 11.2                     | 11.2                    | 8.6                        | 18.5          | 5.5              | 8.27            | 200                        | 25    | 8                       |
| Poissonovo število $\nu_{12}$       | 0.28                     | 0.33                    | 0.31                       | 0.23          | 0.34             | 0.26            | 0.27                       | 0.2   | 0.2-0.4                 |
| Strižni modul $G_{12}$ (GPa)        | 6.55                     | 7.1                     | 4.1                        | 5.59          | 2.3              | 4.41            | 79                         | 10.4  | 0.61                    |
| Natezna trdnost (MPa)               | 2280                     | 1524                    | 1210                       | 1490          | 1380             | 750             | 300                        | 2     | 14                      |
| Gostota ( $\text{kg/m}^3$ )         | 1550                     | 1550                    | 1570                       | 1850          | 1380             | 1740            | 7860                       | 2320  | 900                     |
| Specifični modul (MNm/kg)           | 84.5                     | 98.7                    | 82.2                       | 110           | 55.1             | 22.2            | 25.5                       | 10.8  | 7.8                     |
| Specifična trdnost (kNm/kg)         | 1470                     | 983                     | 771                        | 805           | 1000             | 431             | 38                         | 1     | 8.4                     |
| Cena *(\$1000/ $\text{m}^3$ )       | 100                      | 100                     | 80                         | 277.2         | 36               | 20              | 10                         | 0.125 | 1                       |
| Cena * (\$/kg)                      | 64.51                    | 64.51                   | 50.96                      | 149.84        | 26.09            | 11.50           | 1.27                       | 0.05  | 1.11                    |
| Specifična cena modula * (\$/GNm)   | 763.5                    | 653.65                  | 619.89                     | 1362.16       | 473.4            | 517.75          | 49.89                      | 4.98  | 140                     |
| Specifična cena trdnosti * (\$/MNm) | 43.88                    | 65.63                   | 66.11                      | 186.13        | 26.1             | 26.66           | 33.48                      | 53.87 | 132.27                  |

**Preglednica 3.2** Karakteristike E-Steklo/epoksi kompozitne lamele za različne tipe armiranja  
(Springolo M. 2005).

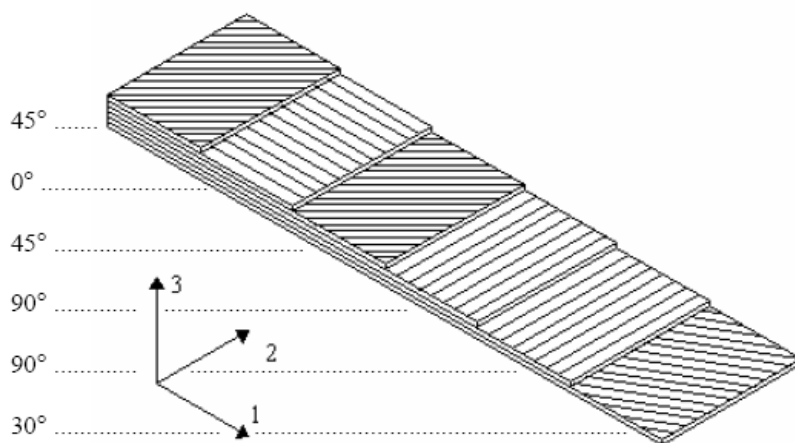
| Dopustne materialne lastnosti |   |       |       |      |      |       |
|-------------------------------|---|-------|-------|------|------|-------|
| Orientacija vlaken            |   | UD    | WR    | DB   | CSM  | UD(C) |
| 0°                            | $\sigma_t$  | 588   | 187   | 65   | 98   | 900   |
|                               | $\sigma_c$  | 372   | 339   | 150  | 150  | 472   |
|                               | E   | 26800 | 13700 | 9482 | 8200 | 79800 |
| 90°                           | $\sigma_t$  | 40    | 166   | 65   | 98   | 81    |
|                               | $\sigma_c$  | 372   | 420   | 150  | 150  | 114   |
|                               | E   | 10000 | 12177 | 9482 | 8200 | 4900  |
| -                             | $\tau_u$  | 50    | 80    | 146  | 69   | 88    |
|                               | G   | 4500  | 3200  | 8168 | 2800 | 4500  |
|                               | t   | 0.68  | 1.35  | 0.58 | 0.67 | 0.51  |
|                               | $\rho$  | 1740  | 1510  | 1630 | 1380 | 1340  |
|                               | $\nu$   | 0.3   | 0.1   | 0.52 | 0.3  | 0.1   |
| Opomba:                       |   |       |       |      |      |       |
| UD                            | Enosmerna steklena vlakna (62% glede na težo kompozita)                           |       |       |      |      |       |
| WR                            | Steklena tkanina (45% glede na težo kompozita)                                    |       |       |      |      |       |
| DB                            | Dvoosna steklena tkanina (55% glede na težo kompozita)                            |       |       |      |      |       |
| CSM                           | Tkanina z naključno orientiranimi steklenimi vlakni (32% glede na težo kompozita) |       |       |      |      |       |
| UD(C)                         | Enosmerna karbonska vlakna  |       |       |      |      |       |
| $\sigma_t$                    | Natezna trdnost (MPa)   |       |       |      |      |       |
| $\sigma_c$                    | Tlačna trdnost (MPa)  |       |       |      |      |       |
| E                             | Modul elastičnosti (MPa)  |       |       |      |      |       |
| $\tau_u$                      | Strižna trdnost (MPa)   |       |       |      |      |       |
| G                             | Strižni modul (MPa)   |       |       |      |      |       |
| t                             | Debelina lamele (mm)  |       |       |      |      |       |
| $\rho$                        | Gostota (kg/m <sup>3</sup> )  |       |       |      |      |       |
| $\nu$                         | Poissonovo število  |       |       |      |      |       |

### 3.1 Terminologija v laminatnih strukturah

Za opis sestava laminata je določena standardna oblika, v kateri je zajeto:

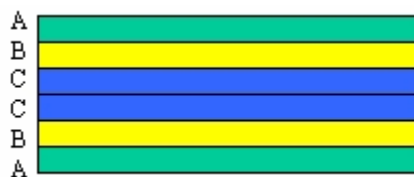
- sestav laminata je opisan med oglatimi oklepaji ( [..., ..., ..., ...] ),
- oblike tkanin oz. vlaken so opisane s kraticami, z izjemo za enosmerno tkanino, kjer je to lahko opuščeno,
- v primeru različno usmerjenih lamel je njihovo zaporedje ločeno z vejico »«,«,
- simetrične laminate lahko opišemo tako, da v oglatih oklepajih napišemo samo polovico sestava laminata in nato na koncu za oklepajem dodamo črko »s«, s čimer nakažemo, da gre za simetričen laminat, kar pomeni da se naveden sestav v oglatih oklepajih simetrično ponovi (Simetričen laminat je definiran kot laminat, ki ima simetričen sestav gledena center laminata).

Na sledečem primeru je prikazan splošen opis laminata z različno orientiranimi plastmi vlaken.



Slika 3.2 Označevanje laminatov [45/0/45/90/90/30].

Poleg pravkar omenjene klasifikacije na simetrične oz. nesimetrične je potrebno omeniti tudi opredelitev na balansirane oz. nebalansirane laminate. Balansirani laminati so tisti laminati, ki imajo za vsako lamelo, ki je orientirana pod kotom  $\theta$  lamelo, ki je orientirana pod kotom  $-\theta$ . Na slikah spodaj je shematično prikazan sestav za simetričen in nesimetričen prerez laminatov.



**Slika 3.3** Simetričen nebalansiran laminat  $[A,B,C]_s$ .



**Slika 3.4** Antisimetričen balansiran laminat  $[A,B,C,-C,-B,-A]$ .

Za dodatno pojasnitev zgoraj omenjenih vrst sestavov laminatov, pa tukaj navajam še nekaj primerov, ki so zapisani v standardni obliki:

|                       |     |  |
|-----------------------|-----|--|
| $[45,0,90,-90,0,-45]$ | ... | Balansiran antisimetričen sestav laminata.   |
| $[45,0,90,90,0,45]$   | ... | Nebalansiran simetričen sestav laminata.     |
| $[45,0,90,90,0,-45]$  | ... | Nebalansiran antisimetričen sestav laminata. |
| $[-30,30,30,-30]$     | ... | Balansiran simetričen sestav laminata.       |

### 3.2 Proizvodni procesi kompozitnih laminatov

Obstajajo različni postopki proizvodnje komponent iz armirane plastike. Med najbolj zastopanimi postopki proizvodnje nosilcev iz armiranih plastik so: pultruzija, navijanje vlaken, injektiranje v kalup in ročno oz. strojno lameliranje. Lameliranje in postopek z navijanjem vlaken poteka vzporedno, s t.i. postopkom vakuumske vreče («Vacuum bagging»), in avtoklavne konsolidacije. V nadaljevanju so opisani pravkar omenjeni postopki.

### 3.2.1 Pultruzija

Pultruzija je proizvodna metoda za proizvodnjo kontinuiranih nosilcev s konstantnim prerezom in možnostjo reguliranja dodajanja ojačitvenih vlaken v vzdolžni smeri. S tem postopkom dosežemo tudi konstantno kvaliteto izdelka, sam postopek pa je enostaven in je v osnovni obliki v uporabi že od petdesetih let prejšnjega stoletja.

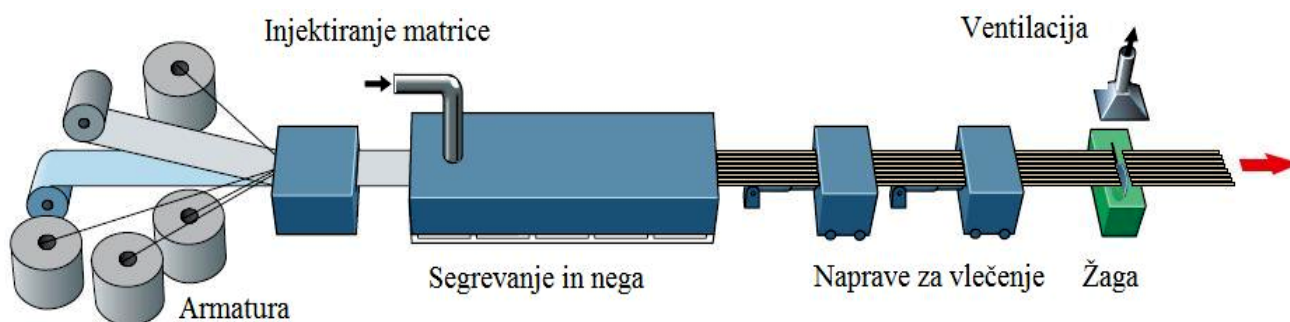
Sam postopek pultruzije poteka tako, da kontinuirno armaturo vlečemo skozi vodilo oz. šablono za natančno razvrstitev vlaken po prerezu. Vlakna se nato vlečejo dalje skozi proizvodnjo opremo, kjer jih tudi zalijemo z matrico (polimernim materialom). Matrico se ponavadi dodaja z injektiranjem, s čimer poenostavimo kontroliranje armature, hitrost proizvodnje in olajša spreminjanje matrice med proizvodnjo. Pridobljeni kompozit se nato vleče skozi predzadnjo fazo toplotne obdelave, kjer je profil negovan do dokončne geometrije. V zadnji fazi s posebno žago razrežemo pridobljene profile na željeno dolžino. Na sliki 3.5 je tudi shematično prikazan postopek pultruzije.

Prednosti pultruzije se kažejo predvsem v:

- hitri in ekonomični izdelavi,
- natančno nadzorovanje matrice (injektiranje v šablono),
- vlakna niso tkana ali šivana (so cenejša),
- mehanske lastnosti vzdolž nosilca lahko spreminjamo, saj lahko kontroliramo volumski delež vlaken,
- zmanjšanju količine strupenih plinov med proizvodnjo, kar je posledica zaprtega sistema proizvodnje.

Pomanjkljivosti pa se kažejo v:

- konstantnih prerezih,
- ceni proizvodnje linije,



Slika 3.5 Postopek pultruzije.

### 3.2.2 Navijanje vlaken («Filament Winding»)

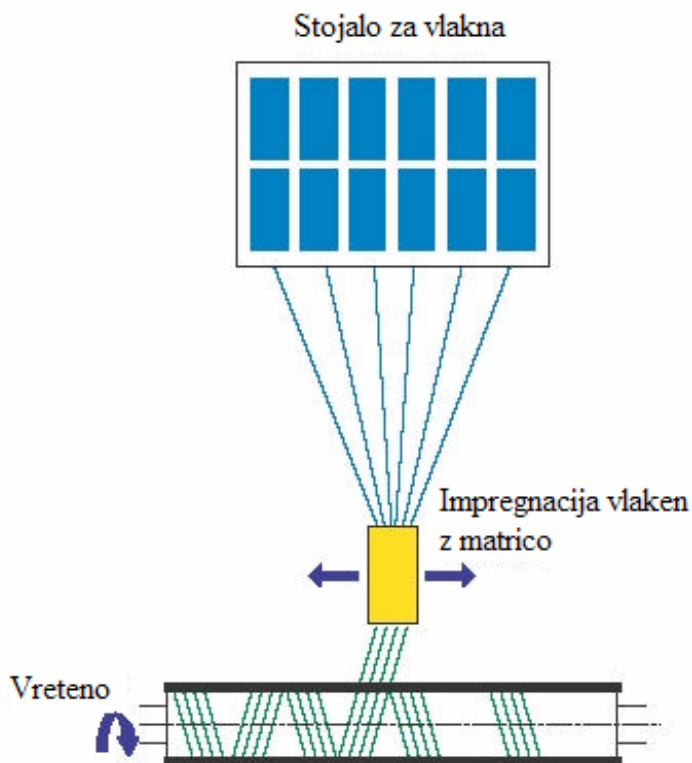
Pri tem postopku proizvodnje vlakna vlečemo skozi kopel iz matrice in jih na ta način impregniramo, nato pa jih navijamo na vreteno do željene debeline kompozita. Z vretenom oz. valjem določamo končno obliko elementa. Najpogosteje pa se obravnavani postopek uporablja za proizvodnjo votlih profilov kot so cevi, rezervoarji, posode. Procent armiranja pa znaša med 30 in 70% teže prereza kompozita. Na sliki 3.6 je shematično prikazan obravnavani postopek.

Prednosti tega postopka so:

- proces je zelo hiter,
- količino matrice je mogoče natančno nadzorovati,
- cena vlaken je nižja, saj ni potrebnega vmesnega procesa v katerem se vlakna tkejo ali šivajo,
- izdelek ima zelo dobre mehanske lastnosti, ker je vzorec navijanja prilagojen posameznim zahtevam.

Pomanjkljivosti pa so:

- končni izdelek ima vedno konveksno obliko,
- vlakna je izredno težko usmeriti vzdolž smeri elementa,
- boben je potrebno izdelati za vsako dimenzijo izdelka posebej,
- zunanja površina je neobdelana in hrapava.



Slika 3.6 Postopek navijanja vlaken.

### 3.2.3 Injektiranje v kalup (»Injection moulding«)

Pri tem postopku matrico z vsemi dodatki pod pritiskom injektiramo v jeklen kalup z armaturo. Pritisk ustvarimo s hidravličnim batom in s spiralnim vijakom, samo zaporedje in potek celotnega postopka pa je prikazan na sliki 3.7. Po ohladitvi, torej, ko se matrica shladi in postane trden material, kalup odpremo in odstranimo končni izdelek. Ta postopek je enostaven za avtomatizacijo in prilagoditev produktom s kompleksno geometrijo. Omogoča nam tudi visoko kvaliteto, masovno proizvodnjo enakih izdelkov in tudi odlično zaključno površino. V primeru uporabe matrice, ki vsebuje votla polnila, se lahko zgodi, da jih pritisk, ki ga ustvarjata hidravlični bat in spiralni vijak poškodujeta (pride do stisnjenja). Za preprečevanje tega pojava je potrebno uporabljati metodo črpanja.

Prednosti tega postopka so:

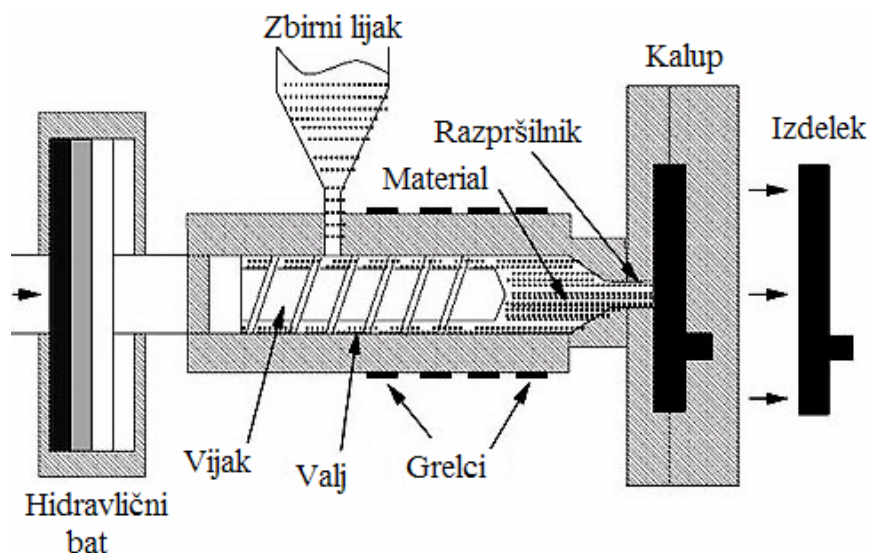
- doseže se lahko zelo velik volumski delež vlaken in zelo nizka votlavost,



- nizka emisija strupenih snovi zaradi zaprtega sistema v kalupu (vse se dogaja v kalupu),
- zahteva malo ročnega dela,
- vse površine so lepo obdelane.

Pomnjkljivosti pa so:

- potrebni kalupi so dragi in veliki, ker morajo prenašati visoke pritiske,
- omejena velikost končnega izdelka,
- razmeroma velik kalo, zaradi včasih nepopolne impregnacije vlaken.



Slika 3.7 Postopek injektiranja v kalup.

### 3.2.4 Ročno in strojno lameliranje

Ročno polaganje kompozitnih plasti je verjetno prvi postopek izdelave kompozitov in poteka tako, da plast za plastjo ročno nanašamo na odprte kalupe. Te plasti so vnaprej pripravljene in že vsebujejo armaturo. Ta metoda se izkaže kot učinkovita za izdelavo manjših, kompleksnih izdelkov, z oteženim dostopom. Ima pa tudi nekaj pomanjkljivosti, ki se kažejo predvsem v:

- oteženem kontroliranju razmerja med matričnim materialom in ojačitvenimi vlakni,

- proizvodnji, ki je neurejena in nevarna za zdravje,
- stiskanju, ki je neenakomerno in nekontrolirano,
- poteku dela, ki je ročno in zahteva veliko znanja, natančnosti in potrpežljivosti,
- izpostavljenosti celotnega postopka nečistočam,
- fizični omejitvi zaporednega nanosa plasti zaradi sušenja matrice, kompaktiranja in obdelavnosti,
- dvigovanju vlaken, predvsem okoli vogalov.

Vse pravkar omenjene pomanjkljivosti so povezane s kontrolo, kar tudi predstavlja največji problem tega postopka. Te pomanjkljivosti pa se v končnem produktu odražajo z visoko variacijo materialnih karakteristik.

Za strojno polaganje se ponavadi uporabljajo vnaprej impregnirana vlakna, t.i. »pre-preg«. Dobavimo jih lahko v obliki pasov ali plošč, ki jih nato nanašamo v zahtevanem številu, debelini in orientaciji. Končni produkt izpostavimo povišani temperaturi in tlaku za odstranitev zračnih žepov med posameznimi plastmi.

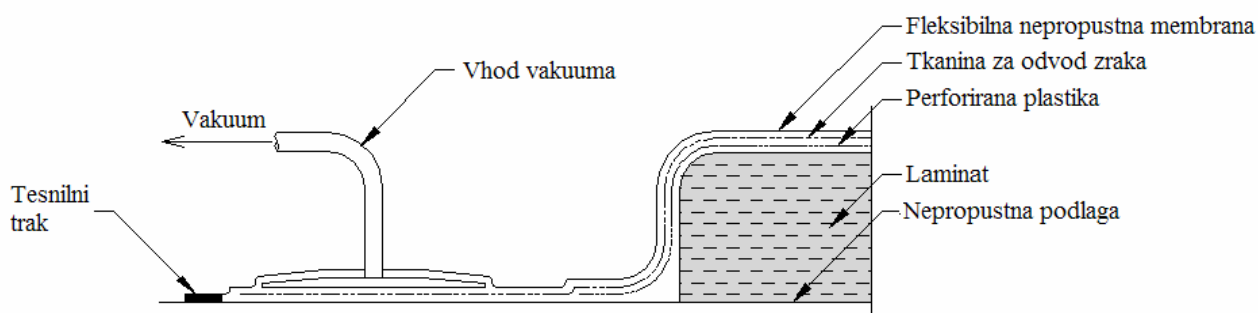
### **3.2.5 Konsolidacijski postopki**

Konsolidacijski postopki proizvodnje armiranih plastik se uporabljajo v primerih, kadar želimo povečati razmerje med vlakni in matrico, zadržati vlakna ob kalupu in iztisniti zračne pore iz laminata. V praksi so najbolj zastopani metodi vakuumske vreče (»Vacuum bag«) in avtoklavne konsolidacije.

#### **3.2.5.1 Vakuumska vreča (»Vacuum Bag«)**

V primeru ročnega nanosa posameznih plasti je potrebno za izboljšanje kompaktnosti celotnega laminata po končanem nanosu celoten laminat tlačno obremeniti. Pri postopku vakuumske vreče to dosežemo s podtlakom, sam postopek pa je shematično prikazan na sliki 3.8. Postopek poteka tako, da željeni laminat položimo na nepropustno podlago, čezenj pa

položimo perforirano plastiko, ki omogoča zraku in matrici odvajanje iz laminata, poleg tega pa preprečuje zlepljenje s tkanino, ki zagotavlja pretok zraka do vakuumskega izhoda med samim postopkom. Na koncu je čez vse skupaj položena še plast fleksibilne nepropustne membrane. Vakuuum uvedemo šele pa zatesnitvi vseh komponent.



Slika 3.8 Postopek vakuumske vreče.

### 3.2.5.2 Avtoklavna konsolidacija

Pri tem postopku gre za podobno idejo kot v prejšnjem. Razlika je v tem, da v tem postopku nanašamo pritisk v avtoklavnih komorah. V teh komorah lahko dovajamo paro in visok tlak. Povišanje tlaka spremlja tudi povišanje temperature, kar nam omogoča tudi toplotno obdelavo matrice. V primeru uporabe pare je potrebno element zatesniti v nepropustno membrano, da preprečimo vstop vode v kompozit.

## 4 PROJEKT »FUTURE BRIDGE«

Projekt »FUTURE BRIDGE« je namenjen razvoju novega visoko tehnološkega in stroškovno ugodnega koncepta nosilne konstrukcije mostov. Z izrazom visoko tehnološko se cilja predvsem na uporabo relativno novega, in v aplikacijah gradbeništva, redko zastopanega materiala armiranih plastik (FRP-Fiber Reinforced Polymers). Z vpeljavo tega visoko tehnološkega materiala se obeta daljša življenjska doba konstrukcij in hitrejša obnova obstoječih dotrajanih konstrukcij. Glavni cilj je torej razvoj učinkovite in cenovno zanimive konstrukcije, kar se kaže predvsem v:

- cena konstrukcije ni višja od 280 €/m<sup>2</sup>,
- 90m dolga konstrukcija je postavljena v 48h,
- popravilo nekonstrukcijskih poškodb ni daljše od 3h,
- popravilo konstrukcijskih poškodb traja manj kot 8h,
- zvišanje nosilnosti zaradi povečanja prometa v 24h,
- predvideni interval prenove mostu obremenjenega z gostim vsakodnevnim prometom je 40 let (AB most 20 let),
- obdobje brez potrebnih posegov je 25 let (AB most 13 let),
- nizka stopnja potresne ranljivosti.

Razvoj tega mostu se je sprožil ob dejstvu povečanja evropske unije, saj imajo nove članice slabše razvito cestno infrastrukturo in jo bo potrebno okrepiti. Republika Slovenija je kot nova članica aktivno vključena v ta projekt, saj se načrtuje postavitev takšnega mostu v občini Kamnik čez reko Kamniško Bistrico. S sodelavci Katedre za preiskovanje materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo pa sodelujemo že v fazi projektiranja, nadaljevali pa bomo tudi s testiranjem vzorčnega nosilca v laboratoriju in v končni fazi še opazovali dejansko obnašanje mostne konstrukcije. Opis preliminarnega dimenzioniranja in delne parametrične študije je opisan v nadaljevanju.

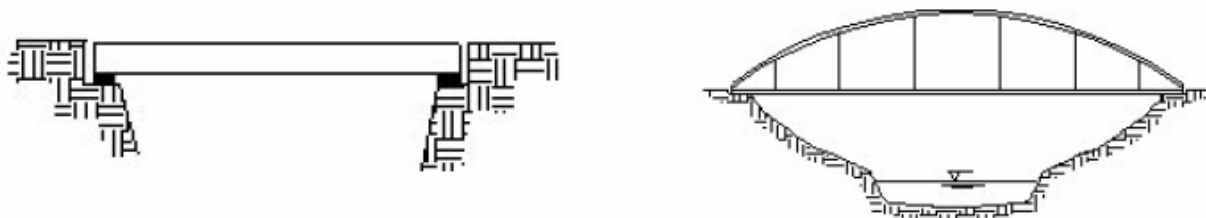
Potrebno se je zavedati dejstva, da mostovi v cestni infrastrukturi predstavljajo približno 20% končne cene celotnega cestnega omrežja in ravno obravnavani projekt je nastavljen z

namenom ugotovitve ekonomske upravičenosti in možnosti prihrankov ob uporabi armiranih plastik kot konstrukcijskih elementov.

Bistveni elementi novega koncepta za obravnavani projekt so:

- Krovna plošča (»Deck«) in nosilci so izdelani iz armirane plastike (FRP, karbonsteklo / duroplasti – termoplasti) oz. kompozitov. Za opornike oz. stebre je predpostavljeno, da se bodo izdelali iz betona armiranega s palicami iz armirane plastike. Razvoj koncepta krovne plošče vodi tudi v možnost uporabe le tega za obnovo obstoječih dotrajanih krovnih plošč.
- Za optimalno dimenzioniranje je izbrana vsestranska optimizacija materiala.
- Simultano razvijanje konstrukcije z načrtovalci in proizvajalci tovrstnih konstrukcij.
- Razvoj proizvodnje na gradbišču (»On-site«).
- Fleksibilno načrtovanje in proizvodnja za majhne ali velike serije proizvodnje.
- Razvoj mobilne proizvodnje linije.
- Razvoj novega hibridnega materiala za doseg izboljšanih karakteristik pri povišanih temperaturah, požaru in doseg možnosti reciklaže.

Na spodnji sliki sta prikazana konstrukcijska sistema, ki bosta podrobneje analizirana tekom projekta. Pri prvem sistemu gre za prostoležeči upogibni nosilec s škatlastim prerezom, na katerega je pritrjena krovna plošča. V drugem primeru, pa imamo kot glavno nosilno konstrukcijo ločni nosilec. V nadaljevanju diplomske naloge sem se osredotočil samo na prvi sistem prostoležečega nosilca z različnimi oblikami in izvedbami škatlastih profilov nosilcev, ter različnih krovnih plošč (honeycomb, beton).



**Slika 4.0** Predpostavljena konstrukcijska sistema nosilne mostne konstrukcije.

## **5 PREGLED MOSTOV NAREJENIH IZ ARMIRANE PLASTIKE (»FRP bridges«)**

Sodobni kompozitni materiali (armirane plastike) ponujajo projektantom v primerjavi s standardnimi materiali, kot sta jeklo in armirani beton, mnogo prednosti. Glavne prednosti so predvsem višji faktor med togostjo in težo, ter med trdnostjo in težo, kar nam omogoča snovanje drznejših konstrukcij. Očitno zmanjšana masa armiranih plastik nam kasneje omogoča hitrejšo in bolj ekonomično gradnjo (zmanjšanje časa gradnje; zmožnost prenašanja večjih elementov, manj prekinitev gradnje, zmanjšanje stroškov zaradi manjše potrebe podpornih konstrukcij, nosilcev, kablov; zmanjšanje porabe energije na račun transporta). Kot dodaten razlog za uporabo armiranih plastik pa je korozijska odpornost, še posebej na soli. Ravno te lastnosti pa so potrebne za dolgo življenjsko dobo in izkoriščenost mostov. Z arhitekturnega vidika nam nov koncept proizvodnje in konstrukcije omogoča nove estetske možnosti in geometrijske učinkovitosti. Kot že omenjeno, lahko armiranim plastikam določimo tudi željene elektro in termalne lastnosti. Tako lahko npr. električno nekonduktivne (brez karbonskih vlaken) uporabimo blizu elektro napeljav za zaščito, termalno obstojni (ponavadi to dosežemo z uporabo karbonskih vlaken) pa nam omogočajo opustitev posebnih dilatacijskih priključkov.

V nadaljevanju tega razdelka je obravnavanih nekaj mostov, ki so bili postavljeni v zadnjih petindvajsetih letih po vsem svetu. Rezultati opazovanj teh mostov so se izkazali kot uspešne rešitve v mnogih primerih, bodisi mostovih za pešce ali pa za avtomobilski promet. Na koncu so podani še zaključki in napoved prihodnosti za tovrstne mostove na osnovi pregleda nekaterih praktično izvedenih mostov.

### **5.1 Most za pešce na Škotskem (Aberfeldy Footbridge)**

Most za pešce v Aberfeldy-ju je, glede na konstrukcijsko zasnovo, prvi in hkrati tudi najdaljši tovrstni most za pešce, izdelan iz armirane plastike. Zgrajen je bil leta 1992 in premošča reko Tay, ki teče skozi golf igrišče. Glede na koncept konstrukcije gre za viseči most, z dvema pilonoma na razdalji 63m. Pilona imata obliko črke A, segata v višino 18m, izdelana pa sta iz

plastike, armirane s steklenimi vlakni (»GRP ... Glass Reinforced Polymers«). Material, uporabljen za izdelavo nateznih kablov, so aramidna vlakna (Kevlar), ki so povezana z lahko matrico polietilena. Krovna plošča je sestavljena iz pultrudiranih profilov, širine 600mm, z ojačitvenimi nosilci na robovih, izbrani material pa je enak kot za pilone (stekleno armirana plastika). Celoten most je bil zgrajen v samo osmih tednih, brez večjega žerjava na gradbišču, saj so komponente izredno lahke.



**Slika 5.0** Pogled na most za pešce v Aberfeldy-ju.

Mostna konstrukcija se v času eksploatacije v splošnem obnaša zelo dobro. V detajlnem smislu pa so se pojavili določeni problemi. Tako je bilo potrebno leta 1997 krovno ploščo učvrstiti z dodatno ploščo iz stekleno armirane plastike, saj so se pojavile manjše razpoke zaradi prekoračenja obtežbe na površini krovne plošče.



**Slika 5.1** Pogled na krovno ploščo mostu.



Na ograji in parapetih je moč opaziti erozijo zaščitnih plasti matrice in s tem izpostavljenosti steklenih vlaken, na drugi strani pa so preostali konstrukcijski deli praktično nepoškodovani. Na tem mestu je evidentno kako pomembna je izbira ustrezne matrice, saj so elementi ograje in nosilnih elementov izdelani iz različnih vrst matric. Problemi se pojavijo tudi z detajli pritrditve nosilcev ograje na krovno ploščo, saj se je povezava med njimi zrahljala ali celo popolnoma izgubila. To je posledica vibracij krovne plošče. Kot rešitev pa se omenja povečanje togosti kablov za zmanjšanje pomikov, ali pa povečanje kapacitete pomikov v detajlu pritrditve. Nekoliko večji problem tega mostu pa predstavlja dinamični odziv, saj ob normalnem sprehodu čez most prične nihati, kar lahko pojasnimo delno z razrahljanimi napenjalnimi kabli, delno pa lahko to pripišemo majhni masi konstrukcije. V namen izboljšanja dinamičnih lastnosti so bile na mostno konstrukcijo inštalirane obtežbe.



**Slika 5.2** Pogled na detajle pritrditve napenjalnega kabla in zaščitne ograje na krovno ploščo.



## 5.2. Sugar Grove most v Virginiji (Blaksburg)

V tem primeru gre za zamenjavo obstoječega dotrajanega mostu. Glavno nosilno konstrukcijo predstavljajo hibridni I profili (dimenzija posameznega nosilca je 45/90cm), z dvema stojinama, izdelani sta iz armirane plastike. V pasnicah so za armaturo uporabljena karbonska vlakna za povečanje togosti nosilca. Pomemben podatek, ki se pojavi na tem mestu je ta, da je celoten čas izgradnje potekal samo pet dni. Na sliki spodaj je prikazan primer uporabljenega nosilca in tudi stranski pogled na celoten most.



**Slika 5.3** Nosilec podjetja Strongwell, uporabljen na obravnavanem mostu.



**Slika 5.4** Pogled na nosilce med izgradnjo.



*Slika 5.5 Pogled na dokončan most.*

### **5.3. Most za pešce čez železniško progo v St. Austell-u**

Ta most za pešce je zanimiv zaradi inovativnega koncepta, saj je ograja poleg osnovne funkcije varovanja izkoriščena še za prenašanje obtežbe. Gre za prostoležečo trodelno konstrukcijo, katere glavna razpetina je 14 metrov in tehta le 5 ton. Osnovni prerez konstrukcije je izdelan s postopkom pultruzije, na panelih ograje pa je nameščena zaščita proti vandalizmu v obliki vlitih plošč.



*Slika 5.6 Pogled na konstrukcijo v delavnici.*



*Slika 5.7 Montaža konstrukcije.*

#### **5.4. Bonds Mill dvizni most**

Omenjeni most je prvi kompozitni most na svetu za namen cestnega prometa. Most je zasnovan kot dvizni most, širine 4,3m in dolžine 8,2m. Prerez nosilne konstrukcije je sestavljen iz šestih vzdolžnih škatlastih profilov, ki so zlepljeni skupaj, celice oz. praznine pa so zapolnjene z epoksidno peno. Krovna plošča je sestavljena iz dvoplastnega pultrudiranega profila. S tem mostom so dosegli izboljšano trajnost mostu in s tem tudi stroškovno učinkovitejši produkt.



*Slika 5.8 Mostna konstrukcija v dvignjenem stanju.*

### 5.5. Pontresina most (Švica)

Most je zasnovan kot palična konstrukcija, ki je sestavljena iz dveh delov, vsak dolžine 12,5m, pri čemer ima en del lepljene, drugi pa vijakačne stike. Na obeh delih neodvisno potekajo meritve za ugotovitev vpliva različnih tipov spojev. Posamezen del tehta 3300kg in ga je možno vsako pomlad deinstalirati in transportirati s helikopterjem v izogib nevarnosti poplav in morebitnega poškodovanja konstrukcije.



*Slika 5.9 Pogled na most Pontresina v Švicarskih alpah.*



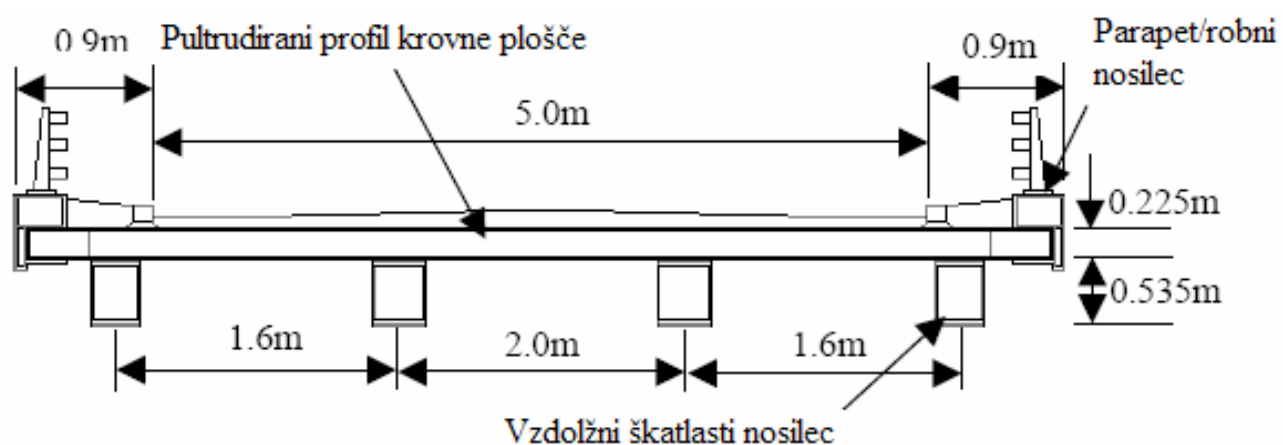


*Slika 5.10 Helikopter, ki pozicionira mostno konstrukcijo na podpore (za to opravilo potrebuje le 1,5h).*

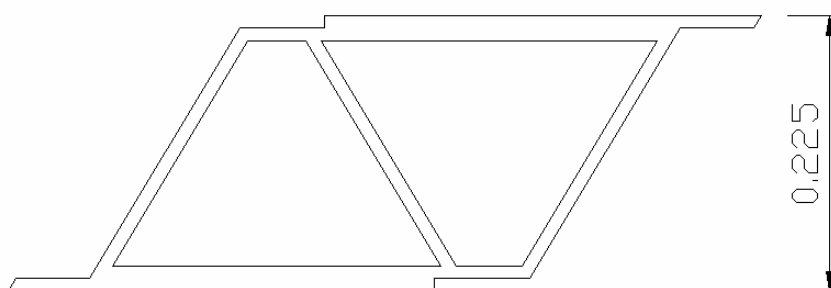
### **5.6 West Mill most v Angliji**

Most je postavljen v Oxfordshire-u in predstavlja enega najbolj naprednih mostov v Evropi. Nosilna konstrukcija je zasnovana kot prostoležeč nosilec, z razpetino 10m in širino 6.8m. Prečni prerez je sestavljen iz vzdolžnih škatlastih nosilcev, na katere so pritrjeni posebni pultrudirani profili v prečni smeri, izbrani material pa je kompozit poliesterske matrice in karbonskih ali steklenih vlaken. Geometrija posameznih prerezov in sestava konstrukcije je razvidna s slik 5.11 in 5.12. Skupna teža nosilne konstrukcije znaša 12t, kjer teža krovne plošče predstavlja  $100\text{kg/m}^3$ .

Nosilna konstrukcija je bila izdelana v začasno postavljeni proizvodnji na gradbišču samem, montaža kostrukcije pa je bila izvedena v samo pičle pol ure.



Slika 5.11 Prečni prerez West Mill mostu.



Slika 5.12 Prerez posameznega profila krovne plošče.



Slika 5.13 Pogled na dokončan most.

### 5.7 Dvižni kompozitni most za pešče v Fredrikstad-tu

Ta most se locira na Norveškem, v Fredrikstad-tu, in je najdaljši tovrstni most v Skandinaviji. Zasnovan je iz dveh dvižnih delov dolžine 28m, s prečnim prerezom zaprtega dvojno ukrivljenega vzdolžnega profila, ki ima v notranjosti vgrajene ojačitve in je v celoti izdelan iz armirane plastike. Krovna plošča je zasnovana kot sendvič struktura, ki ima jedro izdelano iz balze, dodatno pa ima vgrajene kable za ogrevanje mostu v nizkih temperaturah okolja. Vsaka stran se dviguje s pomočjo cilindra, ki je montiran pod nosilcem.



Slika 5.14 Most za pešče v Fredrikstad-tu.



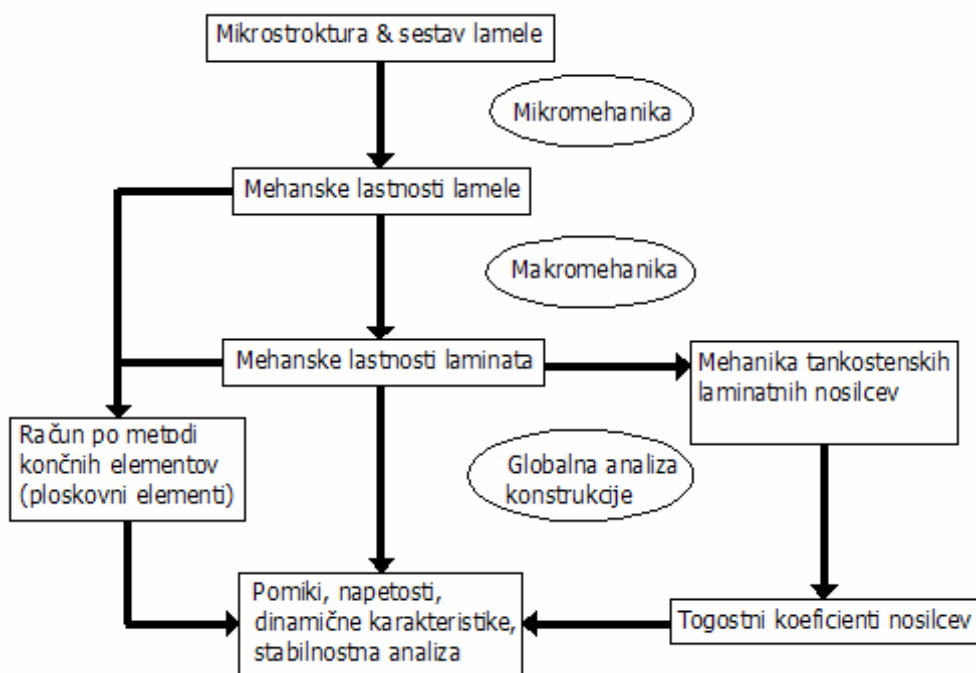
Slika 5.15 Most za pešče v Fredrikstad-tu v dvignjenem stanju.

## 6 RAČUNSKA ANALIZA KOMPOZITNO LAMINATNIH KONSTRUKCIJ

Modeliranje in projektiranje kompozitno laminatnih konstrukcij poteka nekoliko kompleksnejše v primerjavi z modeliranjem konstrukcij iz običajnih izotropnih materialov. Kot že v uvodu omenjeno, se kot načrtovalci kompozitne konstrukcije lahko aktivno vključimo v zasnovu, analizo in načrtovanje materiala samega. To izvedemo preko mikromehanike, na osnovi razpoložljivih informacij proizvajalca o njegovih proizvodnih sposobnostih in razpoložljivih materialih (vlakna, matrice, vrsta proizvodnega procesa,...). Na osnovi rezultatov mikromehanike, pa določimo osnovne mehanske karakteristike za celoten prerez laminata ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $G_{12}$ ,...), kar poimenujemo makromehanika. Obe fazi, mikromehaniko in makromehaniko včasih poimenujemo tudi kot homogenizacijo laminatnega prereza, saj dobimo enotne ortotropne mehanske karakteristike v posamezni smeri obravnavanega laminata, kar pa je pripravno za globalno analizo laminatnih konstrukcij s pomočjo računalniških programov, ki ne omogočajo detajlnejše analize po posameznih lamelah (nivo mikromehanike). Na tem mestu je potrebno tudi izpostaviti dejstvo, da ne moremo v vseh primerih laminatov izraziti nadomestnih materialnih karakteristik. Takšen primer so antisimetrični nebalansirani laminati.

V naslednji fazi analize lahko s teorijo tankostenskih laminatnih nosilcev izpeljemo izraze za določitev togosti (upogibna, strižna,...) nosilcev različnih oblik vendar se je potrebno zavedati, da lahko na ta način obravnavamo konstrukcijo le na globalnem nivoju (ne vemo kaj se dogaja po posameznih plasteh). V končni fazi običajno preverimo napetosti in končne pomike celotne konstrukcije na osnovi ploskovnih končnih elementov ali pa posredno, preko teorije tankostenskih laminatnih nosilcev. Na sliki spodaj je shematično prikazan potek obravnavane analize kompozitno laminatnih konstrukcij.

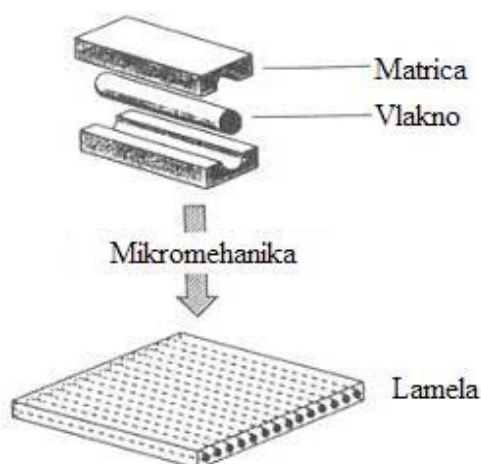




Slika 6.0 Shema poteka računske analize kompozitno laminatnih konstrukcij.

## 6.1 Mikromehanika

Pri kompozitnih materialih ponavadi poznamo mehanske in druge lastnosti za posamezne komponente posebej. Za pravilno predikcijo obnašanja konstrukcije narejene iz kompozitov, pa potrebujemo materialne karakteristike kompozita, ki jih določimo na osnovi mikromehanike, katera obravnava interakcijo med posameznimi komponentami kompozita. Potek mikromehanike je shematično prikazan na sliki 6.1 spodaj.

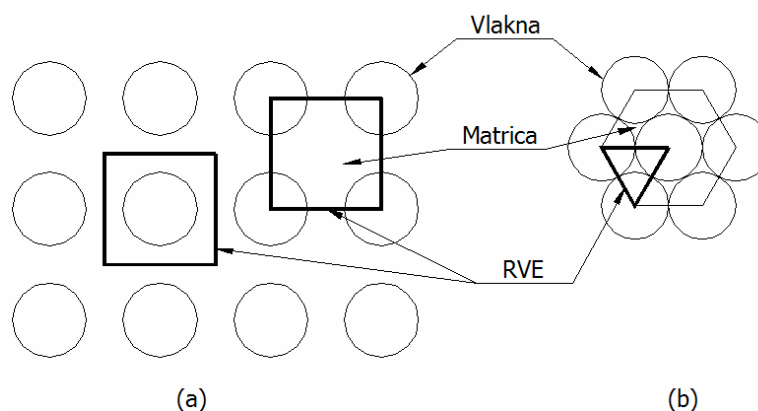


Slika 6.1 Shema poteka mikromehanike.

S tem lahko na osnovi mikromehanike kompozita določimo togost in nosilnost posamezne lamele. Potrebno se je tudi zavedati, da s kontrolo napetosti v matrici, vlaknih in na stikih med matrico in vlakni izločimo nekatere porušne mehanizme.

Pri obravnavi mikromehanike naredimo nekatere predpostavke:

- matrica in vlakna so linearno elastična,
- vlakna so neskončno dolga,
- razpored vlaken je periodičen v kvadratni ali heksagonalni obliki po prerezu, kar zajamemo z reprezentativnim elementom kompozita (RVE = Reprezentativni Volumen Elementa), s tem pa preidemo iz heterogenega materiala na homogenega.



Slika 6.2 Tipična reprezentativna elementa. Na sliki (a) je kvadratna in na sliki (b) je prikazana heksagonalna oblika reprezentativnega elementa.

Za določitev elastičnih konstant kompozitnih materialov se uporabljajo trije različni modeli mikromehanike:

- numerični modeli, kot je metoda končnih elementov,
- modeli na osnovi teorije elastičnosti,
- model merilo mešanice (ROM=rule-of-mixtures), ki bazira na trdnosti materiala.

Od vseh pravkar naštetih modelov mikromehanike je slednji najbolj intuitiven in preprost za razumevanje, hkrati pa je osnova za vse ostale modele. Z modelom merila mešanice obravnavamo posamezen reprezentativni element, katerega opišemo z volumskimi razmerji posameznih komponent. Tako definiramo volumski delež vlaken  $V_f$ , matrice  $V_m$  in por  $V_v$ , za katere velja:

$$\begin{aligned}
 &0 < V_f < 1 \\
 &\text{in} \\
 &0 < V_m < 1 \\
 &\text{ter} \\
 &V_f + V_m + V_v = 1
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

V prvi fazi lahko na osnovi tega izpeljemo izraz za določitev gostote kompozita glede na posamezne komponente. Iz masnih deležev:

$$\begin{aligned}
 M_f &= \frac{m_f}{m_c} && \dots && \text{masni delež vlaken} \\
 M_m &= \frac{m_m}{m_c} && \dots && \text{masni delež matrice}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

kjer so

$$\begin{aligned}
 m_f &\dots \text{ masa vlaken} \\
 m_m &\dots \text{ masa matrice} \\
 m_c &\dots \text{ masa kompozita}
 \end{aligned}$$

sledi, da je gostota kompozita enaka

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f + m_m}{v_c} = \frac{\rho_f \times v_f + \rho_m \times v_m}{v_c} \quad (6.3)$$

kjer so

$v_c$  ... prostornina kompozita

$v_f$  ... prostornina vlaken

$v_m$  ... prostornina matrice.

Ob upoštevanju volumskega razmerja za vlakna  $V_f = \frac{v_f}{v_c}$  in matrico  $V_m = \frac{v_m}{v_c}$  lahko zgornji izraz poenostavimo in dobimo

$$\rho_c = \rho_f \times V_f + \rho_m \times V_m \quad (6.4)$$

Za analizo kopolitne konstrukcije, pa je najpomembnejša določitev mehanskih lastnosti. Za kompozitno lamelo je zaradi ortotropne narave materiala potrebno določiti pet različnih elastičnih mehanskih karakteristik (pri izotropnem materialu je potrebno določiti le dve mehanski karakteristiki  $E$  in  $\nu$ ):

- $E_{11}$  ... modul elastičnosti v smeri vlaken,
- $E_{22}$  ... modul elastičnosti v smeri pravokotno na potek vlaken,
- $G_{12}$  ... strižni modul elastičnosti v ravnini lamele,
- $G_{23}$  ... strižni modul elastičnosti pravokotno na ravnino (medplastni strižni modul),
- $\nu_{12}$  ... poissonovo število v ravnini lamele.

Vse te mehanske karakteristike so funkcije volumskega deleža vlaken, njihove izpeljave pa so prikazane v nadaljevanju. Na osnovi teh izrazov so kasneje tudi izračunane karakteristike kompozitov, ki so uporabljeni v parametrični študiji mostne konstrukcije.

Za modul elastičnosti v smeri vlaken  $E_{11}$ , kot dominantno karakteristiko kompozita, lahko za določitev numerične vrednosti uporabimo kar model merila mešanice brez modifikacije. Za izpeljavo izraza za določitev tega modula vpeljemo še dodatno predpostavko o kompatibilnosti deformacij vlaken in matrice, kar lahko zapišemo kot:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_{cl} = \frac{\Delta l}{l} \quad (6.5)$$

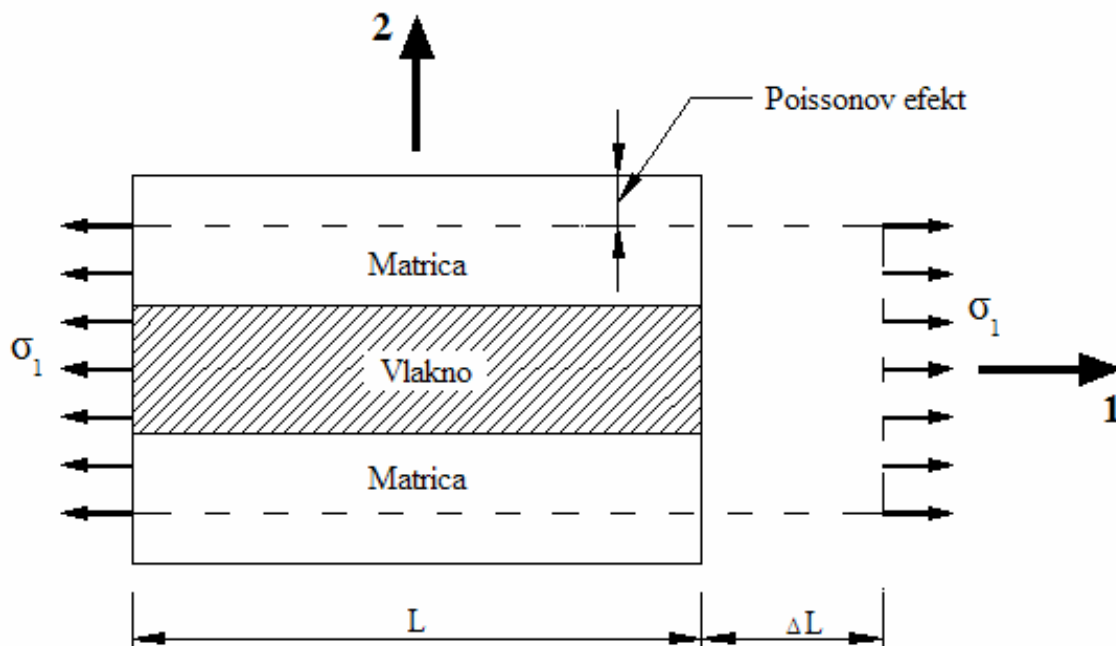
kjer so

- $\varepsilon_f$  ... deformacija vlaken,  
 $\varepsilon_m$  ... deformacija matrice,  
 $\varepsilon_{cl}$  .. deformacija kompozita.

Zaradi predpostavke o elastičnosti obeh komponent kompozita veljajo naslednji zvezi:

$$\begin{aligned} \sigma_f &= E_f \times \varepsilon_l & \dots & \text{napetost v vlaknih} \\ \sigma_m &= E_m \times \varepsilon_l & \dots & \text{napetost v matrici} \\ E_f & & \dots & \text{modul elastičnosti vlaken} \\ E_m & & \dots & \text{modul elastičnosti matrice} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Vzemimo primer manjše kompozitne plošče (reprezentativnega elementa), ki jo obremenimo s povprečno napetostjo  $\sigma_l$  v smeri poteka vlaken, kar je prikazano tudi na naslednji sliki.



Slika 6.3 Reprezentativni element obremenjen v smeri vlaken.

Napetosti delujejo na površini:

$$A = A_f + A_m \quad (6.7)$$

$$\begin{array}{lll} A_f & \dots & \text{prerez vlaken,} \\ A_m & \dots & \text{prerez matrice.} \end{array}$$

Skupna obremenitev, ki deluje na pravkar omenjeno površino je enaka:

$$P = \sigma_l \times A = \sigma_f \times A_f + \sigma_m \times A_m, \quad (6.8)$$

kar pa lahko preoblikujemo v:

$$\sigma_l = \varepsilon_l \times (E_f \times V_f + E_m \times V_m), \quad (6.9)$$

kjer sta:

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad \text{in} \quad V_m = \frac{A_m}{A}. \quad (6.10)$$

Na osnovi zveze Hookovega zakona za homogen material

$$\sigma_l = E \times \varepsilon_l \quad (6.11)$$

lahko zapišemo modul elastičnosti  $E_{11}$  kot:

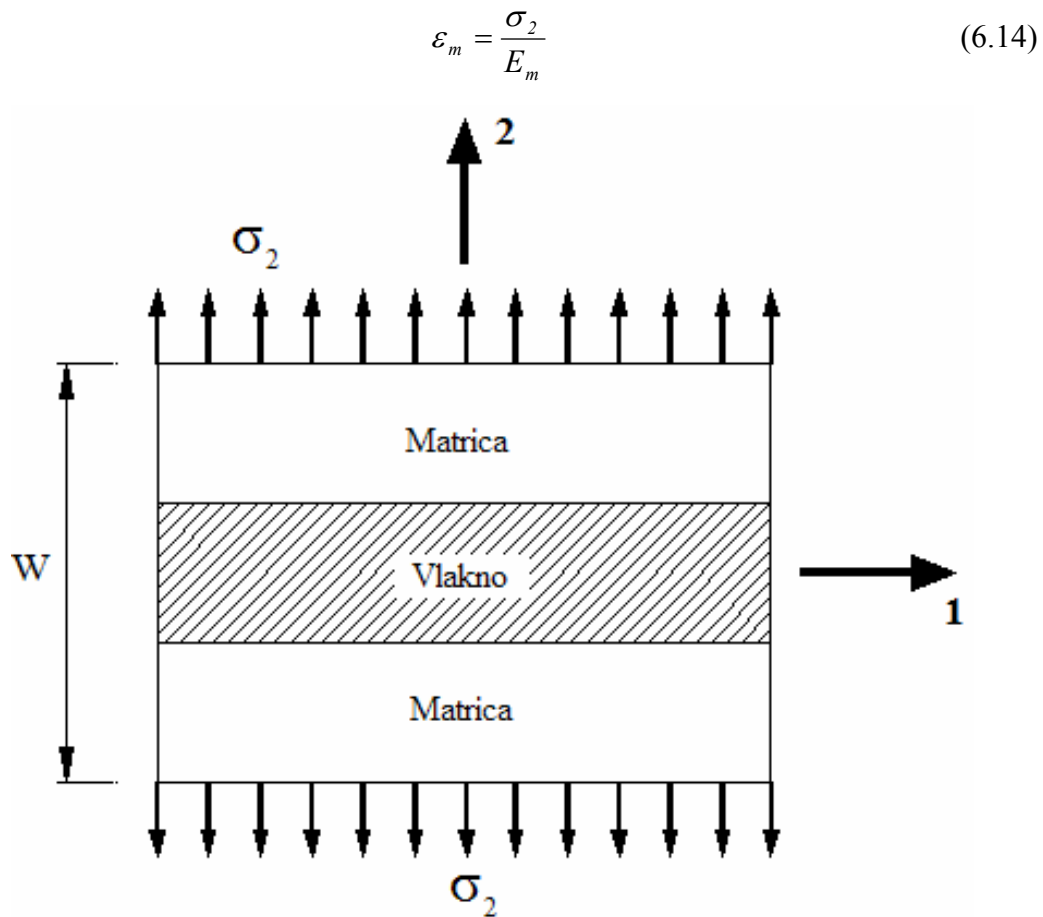
$$E_l = E_f \times V_f + E_m \times V_m. \quad (6.12)$$

Za določitev mehanskih lastnosti v prečni smeri na potek vlaken upoštevamo enakost napetosti v matrici in vlaknih, kar nam omogoča predpostavka o idealno togem stiku med matrico in vlakni, to pa lahko zapišemo kot:

$$\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m \quad (6.13)$$

Glede na predpostavko o linearnem obnašanju materialov lahko deformacije zapišemo kot:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f}$$



Slika 6.4 Reprezentativni element obremenjen v smeri pravokotno na vlakna.

Te deformacije delujejo na širini  $W$  obravnavanega reprezentativnega elementa, torej lahko raztezek v prečni smeri zapišemo kot:

$$\varepsilon_2 \times W = \varepsilon_f \times V_f \times W + \varepsilon_m \times V_m \times W, \quad (6.15)$$

kar lahko ob upoštevanju zvez (6.13) in (6.14) preoblikujemo in dobimo:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_f} \times V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} \times V_m. \quad (6.16)$$

Podobno kot za modul elastičnosti vzdolž vlaken  $E_{11}$ , lahko iz Hookovega zakona  $\sigma_2 = E_{22} \times \varepsilon_2$  za homogen (ekvivalenten) material prejšno enačbo zapišemo kot:

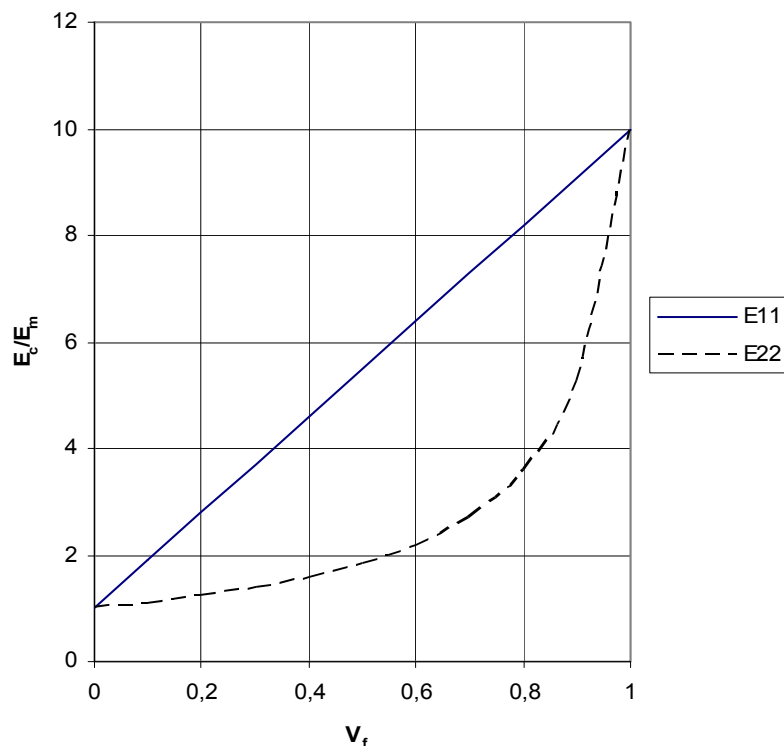
$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}. \quad (6.17)$$

Pravkar naveden izraz predstavlja inverz formule merila mešanice (en. (6.1)-6.17)). Izkaže se, da je modul  $E_{22}$  mehanska karakteristika, pri kateri matrica odigra glavno vlogo. Slednje nam dokazuje tudi diagram spodaj, ki jasno kaže, da se vpliv količine vlaken v kompozitu na modul elastičnosti  $E_{22}$  pozna šele pri zelo visokih procentih armiranja. Na podlagi testov je ugotovljeno, da enačba (6.17) ni dovolj natančna in jo lahko uporabimo samo za grobo oceno. Za boljšo oceno vrednosti  $E_{22}$  uporabimo semi-empirično formulo po Halpin-Tsai-u:

$$E_{22} = E_m \left[ \frac{1 + \xi \times \eta \times V_f}{1 - \eta \times V_f} \right] \quad (6.18)$$

$$\eta = \frac{\left( \frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left( \frac{E_f}{E_m} \right) + \xi} \quad (6.19)$$

oz. kakšen drug empirični približek. Parameter  $\xi$  v prejšni enačbi predstavlja empirično dobljen parameter.



**Slika 6.5** Primerjava modulov elastičnosti  $E_{11}$  in  $E_{22}$  v odvisnosti od procenta armiranja  $V_f$ .



Kot naslednjo karakteristiko lahko določimo Poissonovo število, ki je v splošnem definirano kot razmerje med deformacijo v prečni smeri, ki jo povzroči vsiljena deformacija v vzdolžni smeri in med to vsiljeno deformacijo, kar lahko zapišemo kot:

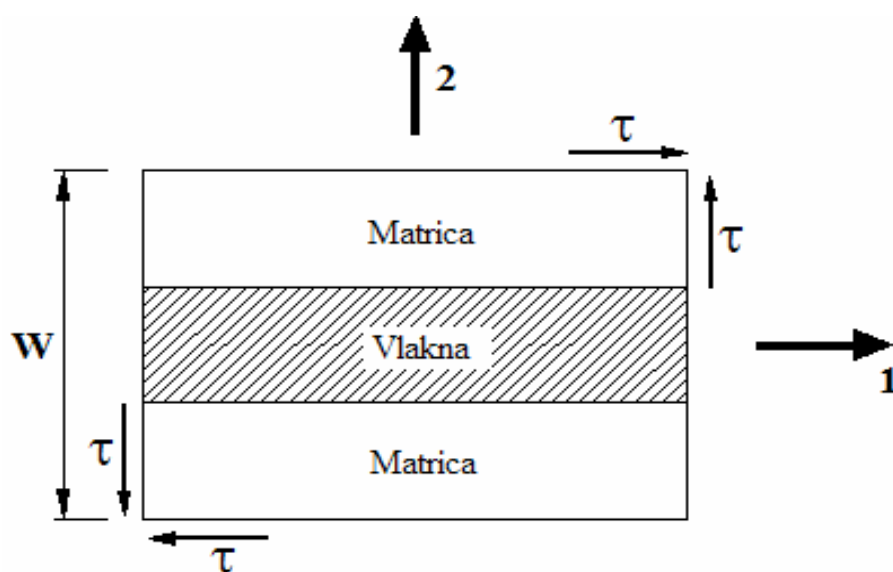
$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (6.20)$$

$\varepsilon_i$  ... deformacije v smeri vlaken (vsiljene deformacije),  
 $\varepsilon_j$  ... deformacija v prečni smeri.

Običajno so Poissonova števila za matrice in vlakna zelo podobna, zato se vrednosti le teh za kompozite zelo malo razlikujejo od posameznih komponent. Pravkar omenjeno nam sugerira, da lahko za določitev Poissonovega števila  $\nu_{ij}$  z zadovoljivo natančnostjo uporabimo formulo merila mešanice. Za primer lamele ga lahko na ta način zapišemo kot:

$$\nu_{12} = \nu_f \times V_f + \nu_m \times V_m. \quad (6.21)$$

Naslednja karakteristika, ki je zelo pomembna pri kompozitnih materialih je strižni modul v ravnini lamele  $G_{12}$ . Spodnja slika nam prikazuje potek strižnih napetosti  $\tau$  na reprezentativni element kompozita.



Slika 6.6 Reprezentativni element strižno obremenjen v ravnini lamele.

Podobno kot preostale mehanske lastnosti lahko tudi to dobimo na onovi formule pravila mešanice:

$$G_{12} = \frac{G_m \times G_f}{V_m \times G_f + V_f \times G_m} \quad (6.22)$$

Vendar je podobno kot pri prečnem modulu elastičnosti  $E_{22}$ , tudi v tem primeru za pravilno predikcijo strižnega modula  $G_{12}$  potrebno izraz (6.22) korigirati. Korigiran izraz za določitev strižnega modula  $G_{12}$  na osnovi cilindričnega modela je enak:

$$G_{12} = G_m \times \left[ \frac{(1 + V_f) + (1 - V_f) G_m / G_f}{(1 - V_f) + (1 + V_f) G_m / G_f} \right] \quad (6.23)$$

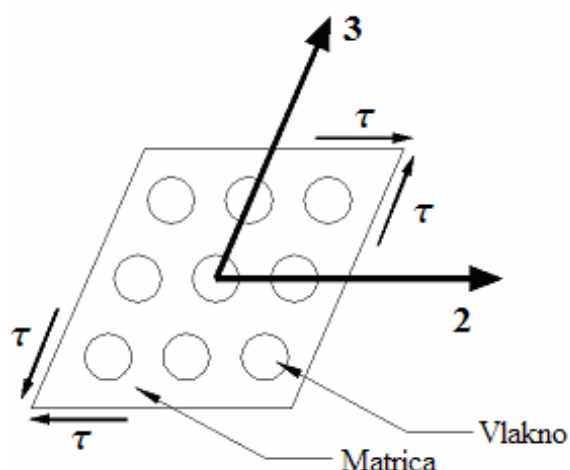
|       |     |                        |
|-------|-----|------------------------|
| $G_m$ | ... | strižni modul matrice, |
| $G_f$ | ... | strižni modul vlaken.  |

Zelo pomembna pa je tudi mehanska karakteristika medplastni strižni modul, ki je karakteristika kompozita glede na debelino plasti. Na spodnji sliki je shematično prikazano delovanje strižnih napetosti  $\sigma_4 = \tau_{23} = \tau_{32}$  in potek deformiranja plasti zaradi tovrstnih napetosti. Medplastni strižni modul pa določimo na osnovi semi-empirično dobljenega izraza:

$$G_{23} = G_m \frac{V_f + \eta_{23}(1 - V_f)}{\eta_{23}(1 - V_f) + V_f \times G_m / G_f} \quad (6.24)$$

$$\eta_{23} = \frac{3 - 4 \times \nu_m + G_m / G_f}{4(1 - \nu_m)}, \quad (6.25)$$

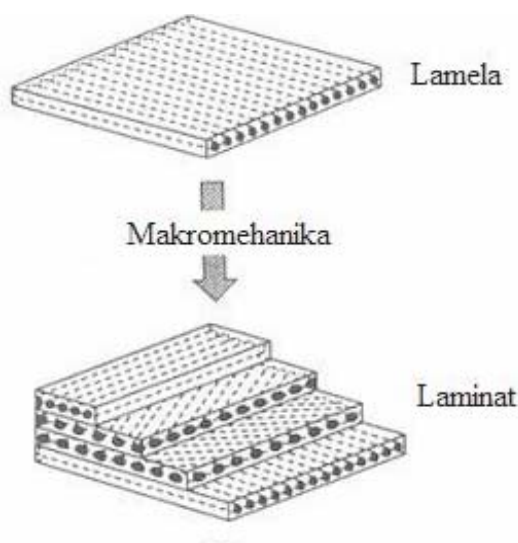
kjer faktor  $\eta_{23}$  predstavlja korekcijski faktor, ki je izpeljan na osnovi testov.



Slika 6.7 Reprezentativni element strižno obremenjen po debelini lamele-medplastne strižne napetosti.

## 6.2 Makromehanika

Kompozitne konstrukcije običajno uporabljamo v obliki laminatov za doseganje željenih mehanskih lastnosti. S posameznimi lamelami lahko s pravilno orientacijo njihovih vlaken oz. njihovih glavnih smeri izdelamo prerez (laminat), ki optimalno zadosti zunanjim obremenitvam. Na tem nivoju se ne ukvarjamo več s sestavo posamezne lamele, ampak uporabimo rezultate mikromehanike ( $E_{11}, E_{22}, G_{12}, G_{23}, \nu_{12}$ ) in s temi vrednostmi operiramo dalje kot s homogenim ortotropnim materialom, kar poimenujemo makromehanika. Slika 6.8 spodaj shematično prikazuje potek makromehanike, ki iz karakteristik posamezne lamele in orientacije določa mehanske karakteristike celotnega sestava laminata.



Slika 6.8 Potek makromehanike.

V nadaljevanju so najprej prikazane enačbe snovi za posamezno lamelo, nato pa še račun togostne matrike za celoten laminat, ki je sestavljen iz poljubnega števila lamel.

Enačbe snovi za najbolj splošen primer materiala in njegovih lastnosti lahko zapišemo kot:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (6.26)$$

in inverz kot

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (6.27)$$

Iz pravkar navedene enačbe lahko opazimo, da imamo za najbolj splošen primer 36 materialnih konstant, med katerimi je 21 med sabo neodvisnih (matrika  $[S_{ij}]$  je simetrična).

Za večino materialov pa je zgornja matrika  $[S_{ij}]$  še nadalje reducirana, kar je posledica različnih simetrij obravnavanega materiala in elementa. To lahko vidimo na primeru izotropnega materiala, kjer so mehanske lastnosti neodvisne od smeri in na ta način iz matrike  $[C_{ij}]$  ostaneta samo še konstanti  $C_{11}$  in  $C_{12}$  med sabo neodvisne. Podobno se matrika  $[S_{ij}]$  reducira tudi za splošen ortotropni material, ki ima tri med sabo pravokotne osi simetrije materiala in jo lahko zapišemo kot:

$$\{S_{ij}\} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Ortotropno lamelo, kot osnovni gradnik laminata, lahko zaradi majhne debeline obravnavamo kot element obremenjen v svoji ravnini. To pomeni, da lahko napetosti po debelini elementa zanemarimo ( $\sigma_3 = 0$ ), na podlagi te predpostavke pa lahko reduciramo podajnostno matriko (6.28) in dobimo:

$$\{S_{ij}\} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

ali pa izrazimo inverz in dobimo togostno matriko ortotropne lamele:

$$\{C_{ij}\} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}, \quad (6.30)$$

za katero ponavadi uporabljamo oznake  $Q_{ij}$ , namesto  $C_{ij}$ . zato, da že s simboli nakažemo reducirano togostno matriko ortotropne plošče in tako lahko enačbe snovi zapišemo kot:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (6.31)$$

kjer so členi matrike  $[Q_{ij}]$  enaki:

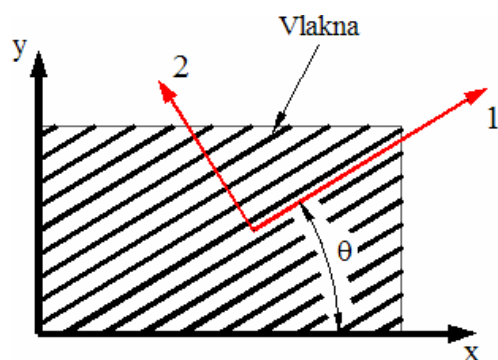
$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{E_{22}\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \\ Q_{44} &= G_{23} \\ Q_{55} &= G_{13} \end{aligned} \quad (6.32)$$

|                   |     |   |
|-------------------|-----|---|
| $E_{11}$          | ... | modul elastičnosti v smeri vlaken (smer <b>1</b> ),               |
| $E_{22}$          | ... | modul elastičnosti v smeri pravokotno na vlakna (smer <b>2</b> ), |
| $G_{12} = G_{13}$ | ... | strižni modul v ravnini lamele (vpliv vlaken),                    |
| $G_{23}$          | ... | medplastni strižni modul (odvisen od matrice),                    |
| $\nu_{12}$        | ... | Poissonov število v ravnini lamele.                               |

Za obravnavo kompozitne lamele je nujno definirati dva koordinatna sistema:

- geometrijskega z osmi x, y, z in
- materialnega z osmi 1, 2, 3.

Geometrijski koordinatni sistem sledi robovom plošče, materialni pa smeri vlaken oz. glavnim materialnim smerem. Na sliki spodaj sta prikazana oba koordinatna sistema, kjer je materialni koordinatni sistem zarotiran za kot  $\theta$  glede na os x geometrijskega koordinatnega sistema.



**Slika 6.9** Geometrijski in materialni koordinatni sistem ortotropne plošče.

Transformacijska matrika  $[T]$  nam omogoča transformacijo togostne matrike lamele iz materialnega v geometrijski koordinatni sistem, kar nam omogoča kasnejšo določitev togostnih koeficientov laminata. Po transformaciji togostna matrika lamele preide v splošno obliko  $[\bar{Q}_{ij}]$  in jo lahko zapišemo kot:

$$\left\{ \bar{Q}_{ij} \right\} = [T_1] \times [Q_{ij}] \times [T_2]^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & 0 & 0 & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & 0 & 0 & \bar{Q}_{26} \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{54} & \bar{Q}_{55} & 0 \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}, \quad (6.33)$$

kjer so  $[T_1]$  in  $[T_2]$  ob upoštevanju  $m = \sin \theta$  in  $n = \cos \theta$  enaki:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 2mn \\ 0 & 0 & m & n & 0 \\ 0 & 0 & -n & m & 0 \\ mn & -mn & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

$$[T_2] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & -mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & mn \\ 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & n & m & 0 \\ 2mn & -2mn & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix}. \quad (6.35)$$

Člene matrike  $[\bar{Q}_{ij}]$  lahko po transformaciji zapišemo v razviti obliki kot:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{44} &= Q_{44}n^2 + Q_{55}m^2 \\ \bar{Q}_{55} &= Q_{44}m^2 + Q_{55}n^2 \\ \bar{Q}_{45} &= (Q_{55} - Q_{44})mn \end{aligned} \quad (6.36)$$

Togost celotnega laminata dobimo z izračunom notranjih sil za celoten prerez, kar izvedemo z integracijo napetosti oz. konstitucijskih enačb vseh lamel po prerezu laminata, proces pa imenujemo makromehanika. Predpostavke pri obravnavi laminata, ki jih naredimo so sledeče:

- stik med posameznimi lamelami je idealno tog, kar ima za posledico, da prerez laminata ostane raven in pravokoten na sredinsko ravnino pred in po deformaciji (deformacije  $\gamma_{yz}$  in  $\gamma_{xz}$  so konstantne po debelini prereza oz. so neodvisne od  $z$ ),
- pomiki v ravnini laminata so linearna funkcija debeline (Kirchhoffova predpostavka),
- deformacije v smeri debeline laminata so zanemarljive  $\varepsilon_z = 0 \Rightarrow w = w(x, y)$ .



Ob upoštevanju vseh pravkar navedenih predpostavk lahko enačbe deformacij zapišemo v sledeči obliki:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \varepsilon_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ 0 \\ 0 \\ K_s \end{bmatrix}, \quad (6.37)$$

kjer so:

$$\begin{array}{lll} \varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \varepsilon_s^0 & \dots & \text{deformacije srednje ravnine,} \\ \gamma_{yz}^0, \gamma_{xz}^0 & \dots & \text{prečne strižne deformacije srednje ravnine,} \\ K_x, K_y, K_s & \dots & \text{ukrivljenosti plošče.} \end{array}$$

Kot je že bilo omenjeno v tem poglavju, lahko konstitucijske enačbe za posamezno lamelo zapišemo kot:

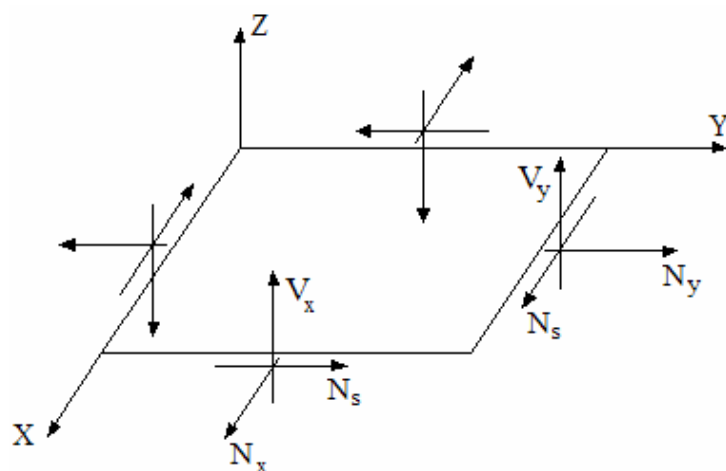
$$[\sigma]^k = [\bar{Q}]^k [\varepsilon]^k, \quad (6.38)$$

kjer indeks  $k$  predstavlja posamezno plast.

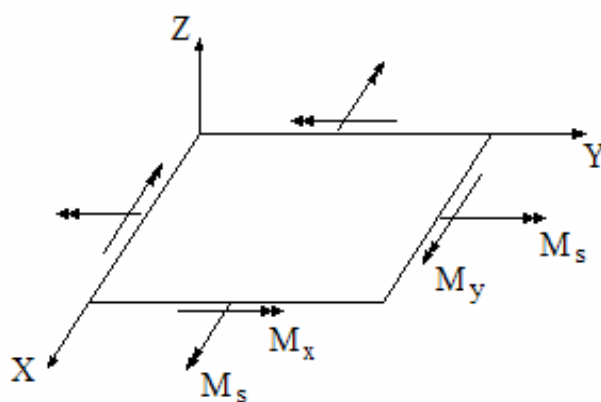
Sedaj pa vstavimo zvezo 6.37 v enačbo 6.38 in dobimo:

$$[\sigma]^k = [\bar{Q}]^k [\varepsilon^0] + z [\bar{Q}]^k [K], \quad (6.40)$$

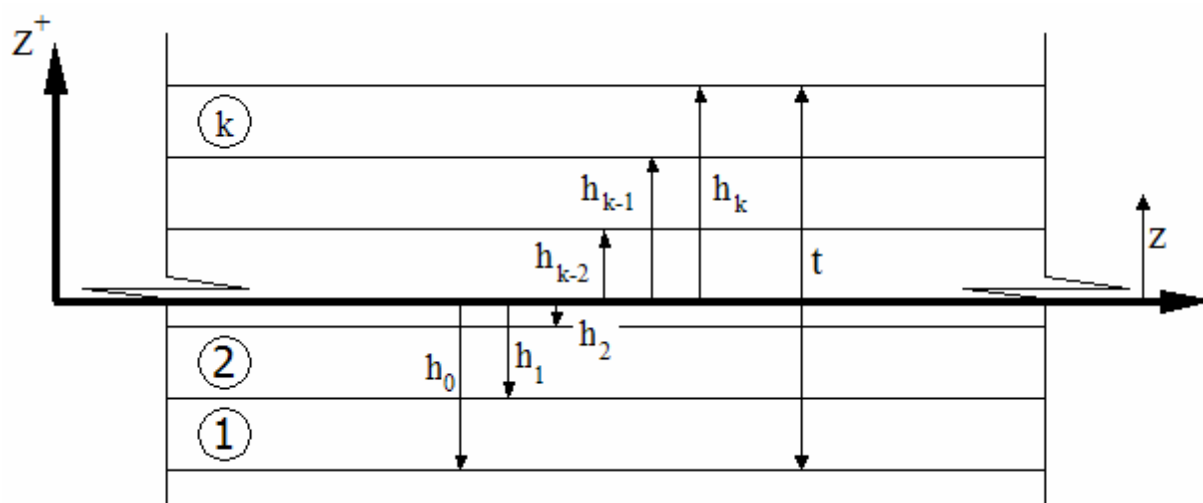
iz teh napetosti pa lahko sedaj izrazimo njihove rezultante za posamezno vrsto napetosti z zagotavljanjem ravnotežja prereza glede na sredinsko ravnino. Smeri posameznih notranjih sil so prikazane na sliki spodaj.



Slika 6.10 Smer osnih sil v laminatu.



Slika 6.11 Smer momentov laminatne plošče.



Slika 6.12 Geometrija laminata.

Osne sile v ravnini laminata izrazimo z integracijo napetosti po posameznih plasteh za celotno višino prereza laminata  $(-t/2, t/2)$  na enoto dolžine kot:

$$\begin{aligned}
 N_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \\
 N_y &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dz \\
 N_s &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_s dz \\
 V_y &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{yz} dz \\
 V_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xz} dz
 \end{aligned} \tag{6.41}$$

in podobno lahko definiramo momente z ravnotežjem napetosti glede na sredinsko ploščo:

$$\begin{aligned}
 M_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \\
 M_y &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \\
 M_{xy} &= M_s = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_s z dz
 \end{aligned} \tag{6.42}$$

Razvito obliko pravkar navedenih enačb dobimo z upoštevanjem zveze (6.40), kar lahko zapišemo z izrazom (seštejemo vse integrale posameznih lamel):

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left( \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_s \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right), \tag{6.43}$$

kar pa lahko zapišemo v kompaktnejši obliki:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_s \end{bmatrix} \quad (6.44)$$

oz. skrajšano:

$$[N] = [A][\varepsilon^0] + [B][K]. \quad (6.45)$$

Člene zgornjih matrik  $[A]$  in  $[B]$  pa dobimo s sledečimi izrazi:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{I}{2} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2). \quad (6.46)$$

Podobno proceduro izvedemo še za momente in dobimo:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_s \end{bmatrix} \quad (6.47)$$

oz. v skrajšani obliki:

$$[M] = [B][\varepsilon^0] + [D][K],$$

kjer so členi matrike  $[D]$  enaki:

$$D_{ij} = \frac{I}{3} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3). \quad (6.48)$$

Vse pravkar navedene enačbe lahko zapišemo še v kompaktni obliki:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix}. \quad (6.49)$$

Prečni sili obravnavamo posebej in ločimo togostne matrike od zgoraj navedenih. Prečni sili sta tako enaki:

$$\begin{bmatrix} V_y \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{54} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}, \quad (6.50)$$

člene matrike  $[H]$  pa dobimo s sledečim izrazom:

$$H_{ij} = \frac{5}{4} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left[ t_k - \frac{4}{t^2} \left( t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12} \right) \right] \quad \text{za } i,j=4,5. \quad (6.51)$$

Zgoraj navedene matrike  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[D]$  in  $[H]$  imajo tudi svoja imena, ki jih narekuje njihova narava oz. funkcija. Matriko  $[A]$  na ta način poimenujemo razteznostna togostna matrika, saj povezuje osne sile  $N$  z deformacijami v srednji ravnini  $\varepsilon_0$ . Podobno imenujemo matriko  $[D]$  - upogibna togostna matrika, ker povezuje momente  $M$  z ukrivljenostmi  $K$ . Matriko  $[B]$ , ki povezuje momente  $M$  z deformacijami  $\varepsilon_0$  in osne sile  $N$  z ukrivljenostmi  $K$ , pa lahko poimenujemo razteznostno-upogibno togostna matrika. Posebno mesto pa ima t.i. prečno strižno togostna matrika  $[H]$ , ki povezuje prečne deformacije  $(\gamma_{yz}, \gamma_{xz})$  s prečnimi silami  $(V_y, V_x)$ . Ta matrika se uporablja kadar laminat analiziramo po teoriji prvega reda strižnih deformacij, s čimer zajamemo vpliv prečnih sil na obnašanje laminata. V primeru, da zanemarimo to togostno strižno matriko, pa dobimo enačbe klasične teorije plošč. Potrebno se je zavedati dejstva, da je slednja teorija manj natančna in se lahko uporablja samo za preliminarno oceno, saj pri kompozitnih konstrukcijah (laminatih) strižne sile, zaradi nižjega strižnega modula ( $G = E/10$ ) kot pri običajnih materialih ( $G \approx E/2.5$ ), zelo vplivajo na velikost pomikov in deformacij.

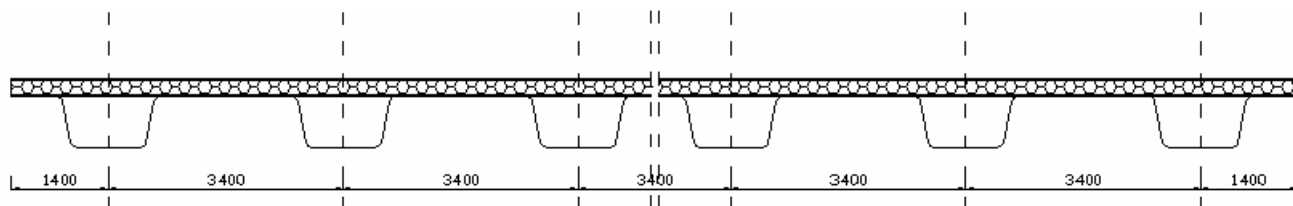
## 7 NUMERIČNA ANALIZA MOSTNE KONSTRUKCIJE (SAP2000)

Račun obnašanja nosilne mostne konstrukcije smo izvedli s programom SAP2000, ki temelji na metodi končnih elementov. S pomočjo programa SAP2000 sem najprej izvedel preliminarno dimenzioniranje mostne konstrukcije. Modeli mostne konstrukcije so narejeni s ploskovnimi »Shell-layered« končnimi elementi in prostorskimi »Solid« končnimi elementi. Tankostenski laminatni prerezi so modelirani s »Shell-layered« končnimi elementi, saj nam omogočajo kontrolo napetosti po posameznih plasteh – lamelah, vključno z medplastnimi strižnimi napetostmi. Posameznemu končnemu elementu lahko predpišemo lastnosti posamezne plasti, vključujoč orientacijo glavnih materialnih osi, vrsto materiala in debelino lamele.

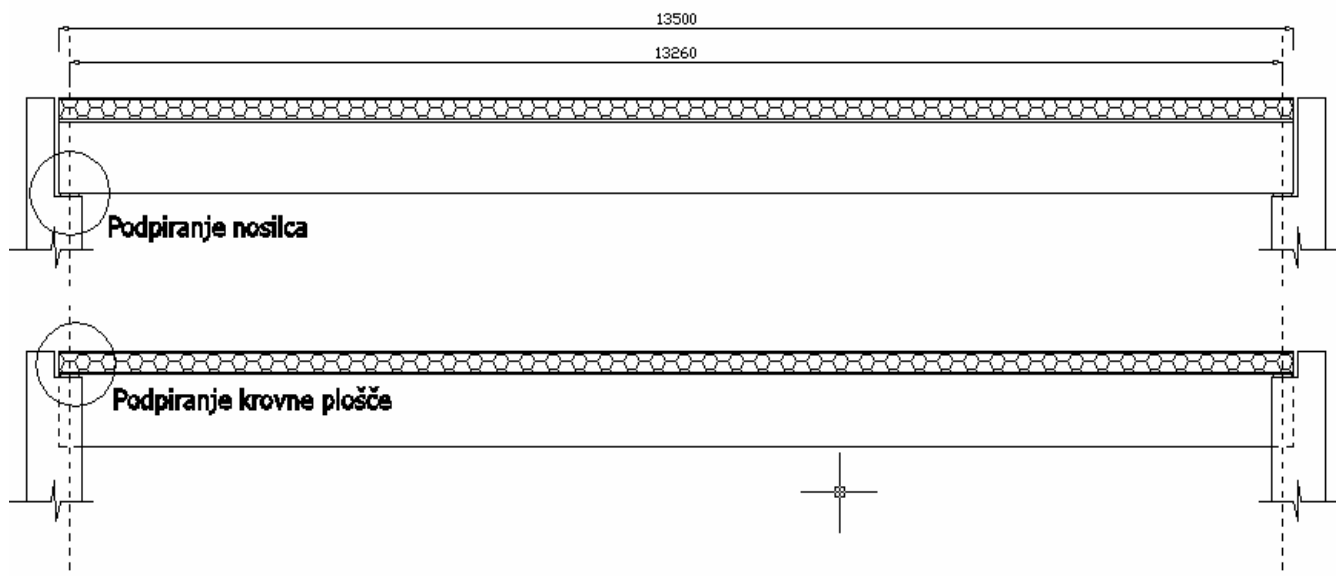
Predvidena krovna plošča je sendvič struktura, katero zunanje plasti stekleno ojačanega laminata smo modelirali s ploskovnimi »Shell-layered«, jedro pa s prostorskimi »Solid« končnimi elementi.

### 7.1 Zasnova nosilne konstrukcije

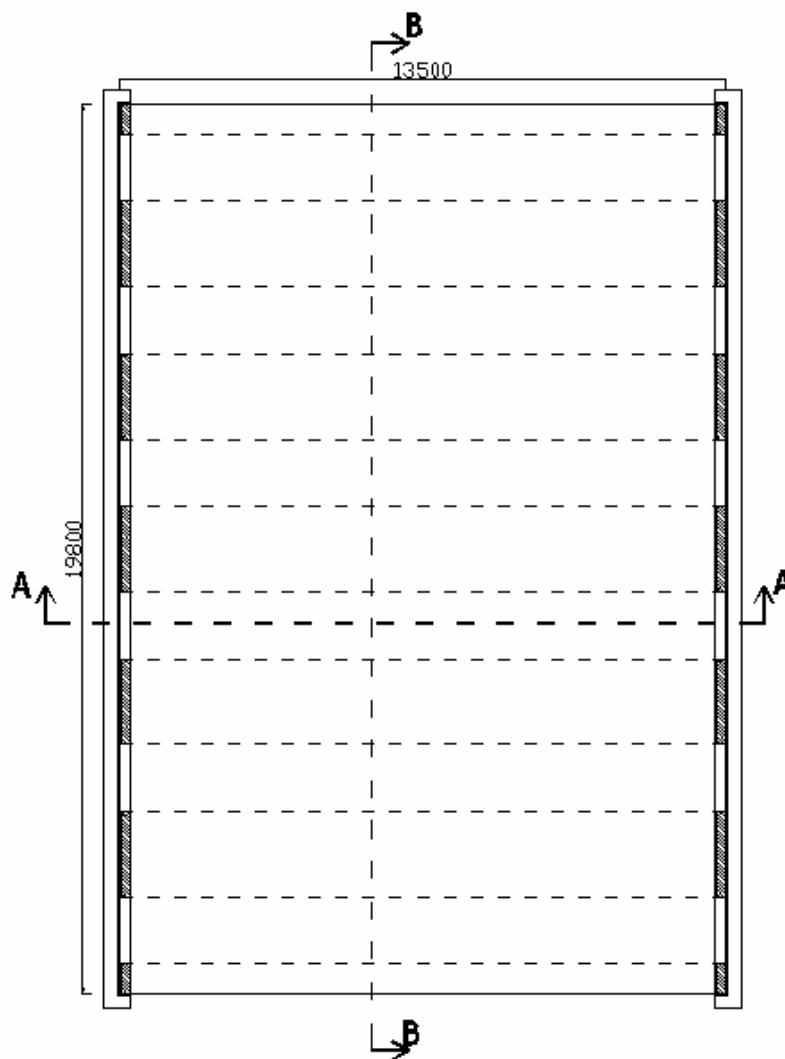
Celotno mostno konstrukcijo smo obravnavali kot 3D model z zgoraj omenjenimi končnimi elementi. Konstrukcija je zasnovana kot prostoležeči nosilec dolžine 13.5m s krovno ploščo na vrhu širine 19.8m. V analizi smo obravnavali dva načina podpiranja. Pri prvem smo konstrukcijo podprli na dnu nosilca, pri drugem pa na krovni plošči med nosilci.



**Slika 7.1** Prerez B-B skozi celotno mostno konstrukcijo.



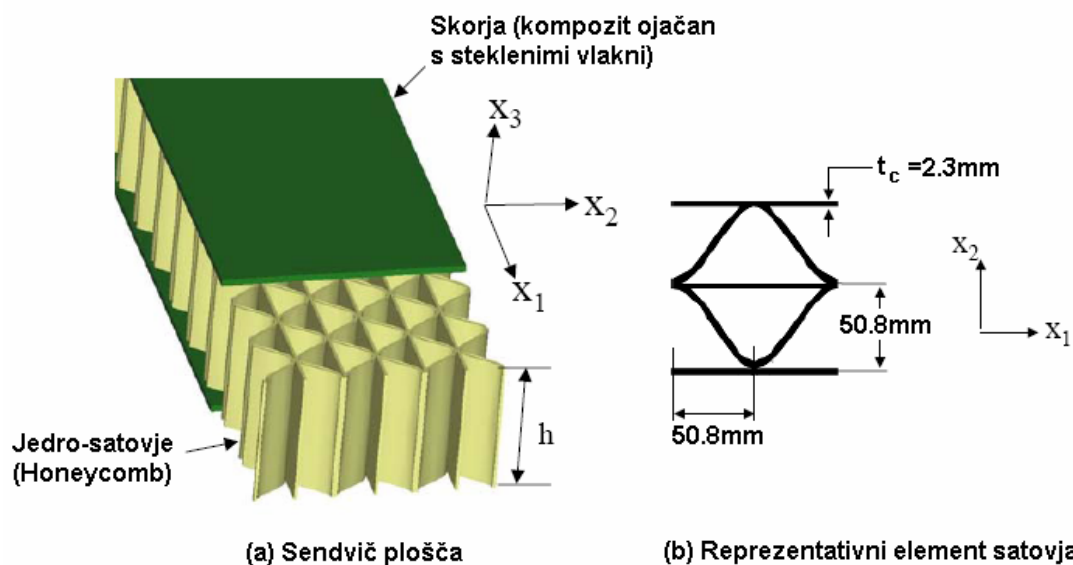
*Slika 7.2 Vz dolžni prerez A-A skozi celotno mostno konstrukcijo. Na sliki sta prikazana različna načina podpiranja, pri čemer je zgornja varianta s podpiranjem na dnu nosilca, na spodnji pa na sendvič plošči.*



Slika 7.3 Tloris celotne mostne konstrukcije.

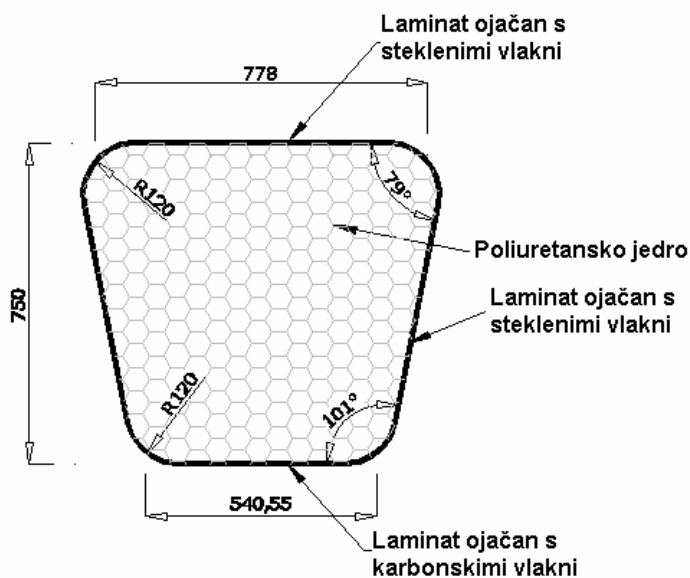
V prvi fazi parametrične analize smo izvedli optimizacijo izbire prečnega prereza. Pri tem smo analizirali odziv konstrukcije na celotnem mostu za tri različne tipe prečnih prerezov. V tej prvi fazi smo spreminjali samo glavni vzdolžni nosilec, krovna plošča pa je v vseh primerih sedvič plošča, debeline 200mm. Sendvič plošča je sestavljena iz krajnih kompozitnih lamel ojačanih s steklenimi vlakni in jedrom, ki je narejeno iz aramidnih vlaken, v obliki satovja (»Honeycomb«). Prerez takšne plošče je prikazan na sliki 7.4. Zadržali smo tudi višino in število glavnih nosilcev, katerim smo spreminjali le posamezne prereze laminatov za zagotovitev mejnega stanja uporabnosti in nosilnosti.





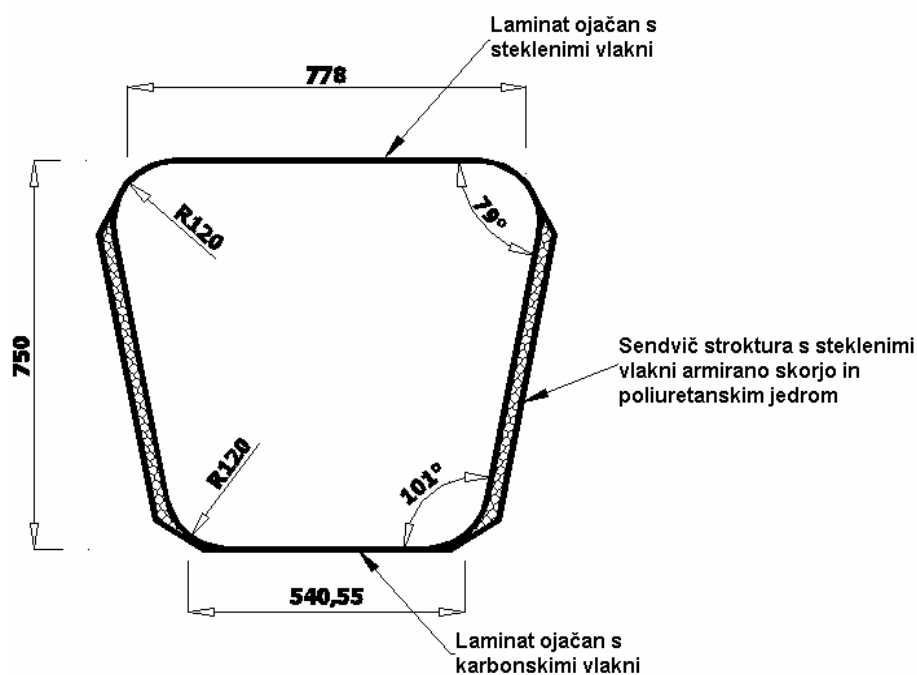
**Slika 7.4** Na sliki (a) prikaz sendvič strukture, na sliki (b) prerez skozi reprezentativni element satovja.

Najprej smo obravnavali nosilec 1# višine 750mm, ki je tudi prikazan na spodnji sliki. Opazimo lahko, da gre za zaprti škatlasti profil s hibridnimi kompozitnimi stenami, kjer so matrice stojine in zgornje pasnice ojačane s steklenimi vlakni, medtem pa je spodnja pasnica armirana s karbonskimi vlakni. Notranjost prereza je zapolnjena s poliuretansko peno, katera v fazi proizvodnje služi kot model nosilca, na katerega lahko nanesimo sloje kopolitov, s tem pa poenostavimo proces proizvodnje. Bistvena slabost tega prereza je relativno visoka cena poliuretana.



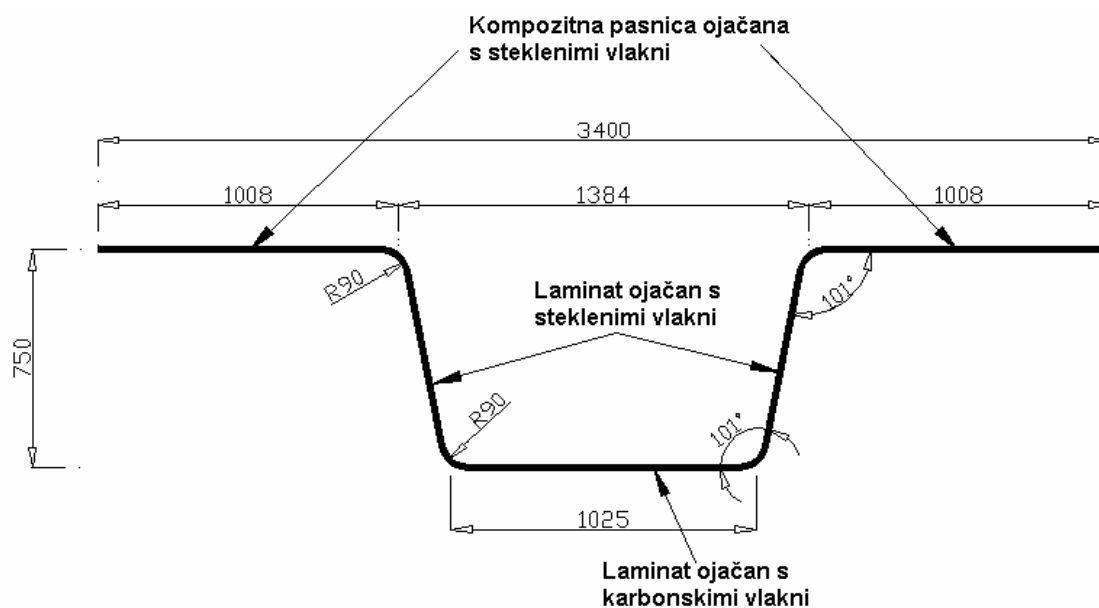
Slika 7.5 Prerez 1#.

Z namenom znižanja stroškov prereza 1# smo skreirali prerez 2#. Kot je razvidno s spodnje slike, je ta prerez sestavljen iz spodnje karbonske pasnice, s steklenimi vlakni ojačane zgornje pasnice in sendvič stojin. Krajni plošči sendvičev so narejene iz kompozitov, ojačanih s steklenimi vlakni, jedro pa je iz poliuretana. Pomankljivost tega prereza je v proizvodnem procesu, saj je izdelava stojin zelo zahtevna in časovno potratna.

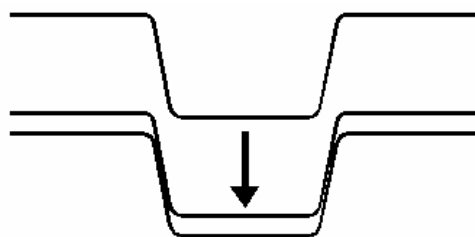


Slika 7.6 Prerez 2#.

Kot tretjo varianto prereza pa smo obravnavali odprti škatlasti tankostenski profil, ki je pritrjen na sendvič krovno ploščo, ki prevzema tlake in upogibe. Na sliki spodaj lahko vidimo sestavo takšnega prereza. Ta prerez je tudi izbrani prerez za nadaljno študijo, testiranje in realizacijo mostu na terenu, saj se ta prerez izkaže kot stroškovno in proizvodno najugodnejši. Prednosti pa se kažejo tudi v logistiki, saj lahko te odprte profile zložimo skupaj med transportom (slika 7.8) in s tem pridobimo na transportnem prostoru.



Slika 7.7 Prerez 3#.



Slika 7.8 Možnost zlaganja za transport.

## 7.2 Materialne karakteristike

Posebna pozornost je pri modeliranju namenjena materialnim karakteristikam. V poglavju mikromehanika je navedena teoretična osnova za modeliranje kompozitnih materialov z

vsemi pripadajočimi izrazi za določitev potrebnih materialnih karakteristik kompozitov na osnovi znanih karakteristik posameznih sestavnih materialov (vlakna, matrica). Materialne karakteristike posameznih materialov, ki so bile uporabljene v računski analizi so izbrane povprečne vrednosti, povzete po različni literaturi, te vrednosti pa so podane v tabeli 7.1. V tabeli 7.2 so iz vrednotenih osnovnih izrazi, za določitev materialnih karakteristik kompozitov, ki so navedeni v poglavju mikromehanike. Vrednosti v tabeli 7.2 so izražene za dva različna procenta armiranja ( $V_f=50\%$  in  $V_f=50\%$ ).

**Preglednica 7.1** Osnovne mehanske karakteristike posameznih materialov.

| Karakteristike              | Vlakna             |                                  | Matrica |                       |
|-----------------------------|--------------------|----------------------------------|---------|-----------------------|
|                             | Steklena (S-Glass) | Karbonska (High strength carbon) | Epoxy   | Poliuretan            |
| $E$ [GPa]                   | 85                 | 230                              | 3.5     | 0.01                  |
| $G$ [GPa]                   | 30                 | 90                               | 3.5     | $3.85 \times 10^{-3}$ |
| $\nu$                       | 0.22               | 0.2                              | 0.38    | 0.3                   |
| $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 2.46               | 2                                | 1.2     | 0.0816                |
| $F_{lt}$ [Mpa]              | 4800               | 3530                             | 70      | 50                    |
| $F_{lc}$ [Mpa]              | /                  | /                                | 100     | /                     |

**Preglednica 7.2** Osnovne mehanske karakteristike lamel posameznih kompozitov za različne  
procenete armiranja.

| Karakteristike              | Vrednosti za posamezne lamele  |                     |                                 |                     | Satovje sendviča<br>(Honeycomb) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
|                             | Ojačane s steklenimi<br>vlakni |                     | Ojačane s karbonskimi<br>vlakni |                     |                                 |
|                             | V <sub>f</sub> =50%            | V <sub>f</sub> =60% | V <sub>f</sub> =50%             | V <sub>f</sub> =60% |                                 |
| $E_{11}$ [GPa]              | 44.25                          | 52.4                | 116.75                          | 139.4               | 0.53                            |
| $E_{22}$ [GPa]              | 11.85                          | 15.4                | 13.11                           | 17.61               | $7.03 \times 10^{-4}$           |
| $E_{33}$ [GPa]              | 3.50                           | 3.50                | 3.50                            | 3.50                | 1.26                            |
| $\nu_{12}$                  | 0.30                           | 0.28                | 0.29                            | 0.27                | 0.41                            |
| $G_{12}$ [GPa]              | 8.08                           | 9.82                | 9.52                            | 12.23               | 0.703                           |
| $G_{13}$ [GPa]              | 8.08                           | 9.82                | 9.52                            | 9.52                | 0.329                           |
| $G_{23}$ [GPa]              | 7.57                           | 9.16                | 8.66                            | 8.66                | 0.139                           |
| $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 1.74                           | 1.96                | 1.60                            | 1.68                | 0.05                            |
| $F_{1t}$ [MPa]              | 2500                           | 2700                | 1792                            | 2600                | /                               |
| $F_{1c}$ [MPa]              | 1200                           | 1300                | 1300                            | 1400                | /                               |
| $F_{2t}$ [MPa]              | 2500                           | 2700                | 1792                            | 1900                | /                               |
| $F_{2c}$ [MPa]              | 1200                           | 1300                | 1300                            | 1400                | /                               |
| $F_{12}$ [MPa]              | 700                            | 800                 | 800                             | 900                 | /                               |
| $F_{13}$ [MPa]              | 150                            | 150                 | 150                             | 150                 | 20.55                           |

Podobno, kot preostali materiali, tudi armirane plastike zahtevajo varnostne faktorje, ki so specifični za ta material. Tako smo varnostne faktorje prevzeli po priročniku za projektiranje konstrukcij iz armiranih plastik EUROCOMP, ki predpisuje varnostni faktor za material  $\gamma_m$ . Ta faktor pa je produkt naslednjih štirih parcialnih faktorjev:

$\gamma_{m,1}$  ... način določitve materialnih karakteristik celotnega laminata,

- $\gamma_{m,2}$  ... stopnja nege kompozita,
- $\gamma_{m,3}$  ... vremenski vplivi okolja, trajanje obtežbe (dimenzijska stabilnost, razlika med temperaturo obratovanja in temperaturo pri kateri pride do ukrivljenja),
- $\gamma_{m,4}$  ... opis trdnosti in podajnosti glede na temperaturo obratovanja.

Vrednost varnostnega faktorja torej določimo kot  $\gamma_m = \gamma_{m,1} \times \gamma_{m,2} \times \gamma_{m,3} \times \gamma_{m,4}$ , ki je po izvrednotenju enak  $\gamma_m = 11.5$  za naš primer. Posamezne vrednosti parcialnih faktorjev določimo glede na spodnje tabele, ki so povzete po priročniku EUROCOMP. Tako določimo vrednost faktorja  $\gamma_{m,1} = 2.25$ ,  $\gamma_{m,2} = 1.7$ ,  $\gamma_{m,3} = 3.0$  in  $\gamma_{m,4} = 1.0$  za kratkotrajno obtežbo, oz.  $\gamma_{m,4} = 2.5$  za dolgotrajno obtežbo. Ponavadi so dejanski varnostni faktorji materiala veliko večji kot ti predpisani, saj je praviloma mejno stanje uporabnosti kritični element dimenzioniranja in ne nosilnost materiala. V našem primeru smo torej najprej zadostili pogoju mejnega stanja uporabnosti, nato pa smo dejanske varnostne faktorje primerjali s prej omenjenimi predpisanimi.

**Preglednica 7.3** Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,1}$ , (Tabela 2.4, EUROCOMP, 1996).

| Način določanja karakteristik  | $\gamma_{m,1}$ |
|--|----------------|
| Karakteristike sestavnih materialov (vlaknen, matrice) so dobljene s testiranjem | 2.25           |
| Karakteristike posameznih lamel so dobljene teoretično                           | 2.25           |
| Karakteristike laminatov so dobljene teoretično                                  | 2.25           |
| Karakteristike posamezne lamele so dobljene na osnovi testov                     | 1.5            |
| Karakteristike laminata so dobljene na osnovi testov                             | 1.15           |

**Preglednica 7.4** Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,2}$ , (Tabela 2.5, EUROCOMP, 1996).

| Metoda proizvodnje  | $\gamma_{m,2}$          |                              |
|---|-------------------------|------------------------------|
|   | Dokončna nega na terenu | Brez dokončne nege na terenu |
| Ročni nanos plasti z razpršilcem                          | 2.2                     | 3.2                          |
| Strojni nanos z razpršilcem                               | 1.4                     | 2.0                          |
| Ročni nanos (Hand lay-up)                                 | 1.4                     | 2.0                          |
| Stiskanje matrice v kalup                                 | 1.2                     | 1.7                          |
| Nanos že vnaprej pripravljenih plasti                     | 1.1                     | 1.7                          |
| Strojna izdelava z navijanjem na kolut (filament winding) | 1.1                     | 1.7                          |
| Pultruzija  | 1.1                     | 1.7                          |

**Preglednica 7.5** Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,3}$ , (Tabela 2.6, EUROCOMP, 1996).

| Referenčna projektna temperatura [°C] | Temperatura pri kateri pride do ukrivljenja laminata [°C] | $\gamma_{m,3}$       |                     |
|---------------------------------------|---|----------------------|---------------------|
|                                       |   | Kratkotrajna obtežba | Dolgotrajna obtežba |
| 25-50                                 | 55-80   | 1.2                  | 3.0                 |
|                                       | 80-90   | 1.1                  | 2.8                 |
|                                       | >90   | 1.0                  | 2.5                 |
| 0-25                                  | 55-70   | 1.1                  | 2.7                 |
|                                       | 70-80   | 1.0                  | 2.6                 |
|                                       | >80   | 1.0                  | 2.5                 |

**Preglednica 7.6** *Parcialni varnostni faktor materiala  $\gamma_{m,4}$ , (Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP, 1996).*

| Temperatura obratovanja<br>(°C) na suhem | $\gamma_{m,4}$       |                     |
|--|----------------------|---------------------|
|  | Kratkotrajna obtežba | Dolgotrajna obtežba |
| -20                                      | 1.0                  | 2.5                 |
| 0  | 1.0                  | 2.5                 |
| 20                                       | 1.0                  | 2.5                 |
| 40                                       | 1.0                  | 2.5                 |
| 60                                       | 1.0                  | 2.5                 |
| 80                                       | 1.25                 | 3.13                |

### 7.3 Obtežba

V računu odziva konstrukcije mostu smo upoštevali lastno težo konstrukcije in vseh preostalih delov. Lastno težo kompozitne nosilne konstrukcije smo zajeli s programom SAP2000, preostale dele na krovni plošči pa smo definirali kot ploskovno zvezno obtežbo po celotni površini plošče in je sestavljena iz:

- Leva in desna zaščitna ograja (ocenjeno) ...  $3.0 \text{ kN/m} \Rightarrow \frac{3.0 \text{ kN/m}}{19.8 \text{ m}} = 0.15 \text{ kN/m}^2$
- Levi in desni hodnik ...  $2 \times 29.5 \text{ kN/m} = 59 \text{ kN} \Rightarrow \frac{59 \text{ kN/m}}{19.8 \text{ m}} = 2.98 \text{ kN/m}^2$
- Asfalt ...  $0.08 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 = 1.92 \text{ kN/m}^2$
- Skupna lastna teža preostalih delov na krovni plošči  $g=5.20 \text{ kN/m}^2$

Prometna obtežba, upoštevana pri statični analizi konstrukcije, je določena po standardu DIN-Fachbericht 101. Pravkar omenjeni standard najprej določa število in širino računskih vozniških pasov v skladu s sledečo tabelo, na katere kasneje postavimo prometno obtežbo.



**Preglednica 7.7** Določitev števila in širine računskih vozniških pasov.

| Širina vozišča »W«       | Število namišljenih pasov | Širina enega voznega pasu | Širina preostale površine |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $W < 5.4\text{m}$        | $n_i = 1$                 | 3m                        | $W - 3\text{m}$           |
| $5.4 < W \leq 6\text{m}$ | $n_i = 2$                 | $W/2$                     | 0                         |
| $6\text{m} \leq W$       | $n_i = \text{Int}(W/3)$   | 3m                        | $W - 3 \times n_i$        |

Glede na povprečno širino vozišča  $W = 8.00\text{m}$  sledi, da imamo 2 vozna pasova širine 3m in preostalo površino 2m.

Glavni obtežni sistem sestavljata dva parcialna sistema:

- dvoosni koncentrirani obtežni sistem (tandemski-TS), ki je podan s težo vsake od obeh osi s  $\alpha_Q \times Q_k$ , kjer je  $\alpha_Q$  prilagoditveni faktor in
- enakomerno porazdeljena obtežba  $\alpha_Q \times q_k$ , kjer je  $\alpha_Q$  ponovno prilagoditveni faktor.

Posamezne vrednosti obtežb in prilagoditvenih faktorjev so navedeni v spodnji tabeli 7.8.

**Preglednica 7.8** Prometna obtežba.

| Lokacija           | Tandemski sistem-osna obtežba $Q_{ik}$ (kN) | $\alpha_{Qi}$ | UDL sistem $Q_{ik}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | $\alpha_{qi}$ |
|--------------------|---|---------------|--|---------------|
| Pas št. 1          | 300   | 0.8           | 9.0                                      | 1.0           |
| Pas št. 2          | 200   | 0.8           | 2.5                                      | 1.0           |
| Pas št. 3          | 0   | -             | 2.5                                      | 1.0           |
| Ostali pasovi      | 0   | -             | 2.5                                      | 1.0           |
| Preostala površina | 0   | -             | 2.5                                      | 1.0           |

Na podlagi tega lahko določimo dvoosno koncentrirano obtežbo za:

-prvi vozni pas:

$$\alpha_{Q1} \times Q_{1k} = 0.8 \times 300 = 240\text{kN}$$

-drugi vozni pas:

$$\alpha_{Q2} \times Q_{2k} = 0.8 \times 200 = 160 \text{ kN} .$$

Ta koncentrirana obtežba deluje na površini 40/40cm površine.

Enakomerna porazdeljena obtežba pa je enaka za:

- prvi vozni pas:

$$\alpha_{q1} \times q_{1k} = 1 \times 9 = 9 \text{ kN/m}^2$$

- drugi vozni pas:

$$\alpha_{q2} \times q_{2k} = 1 \times 2.5 = 2.5 \text{ kN/m}^2$$

- preostala vozna površina:

$$\alpha_{qp} \times q_{pk} = 1 \times 2.5 = 2.5 \text{ kN/m}^2 .$$

Na krovni plošči je ob vsaki strani tudi prostor rezerviran za pešce in kolesarje. To obtežbo modeliramo z vrednostjo  $q_{fk} = 5.0 \text{ kN/m}^2$ , ki je določena po standardu. Na osnovi teh obtežb sestavimo kombinacije za kontrolo mejnega stanja nosilnosti (MSN) in mejnega stanja uporabnosti (MSU). Te kombinacije tvorimo v skladu s predpisi kot sledi:

$$- S_{s,k} = \sum_{j=1,\dots,m} \gamma_{G,j} \times G_{k,j} + 1.35 \times \sum_{i=1,\dots,n} Q_{k,i} \quad \dots \quad \text{kombinacija za MSN}$$

$$- S_k = \sum_{j=1,\dots,m} G_{k,j} + 0.90 \times \sum_{i=1,\dots,n} Q_{k,i} \quad \dots \quad \text{kombinacija za MSU}$$

kjer so

$$\gamma_{G,j} = 1.35 \quad \dots \quad \text{varnostni faktor za stalne obtežbe,}$$

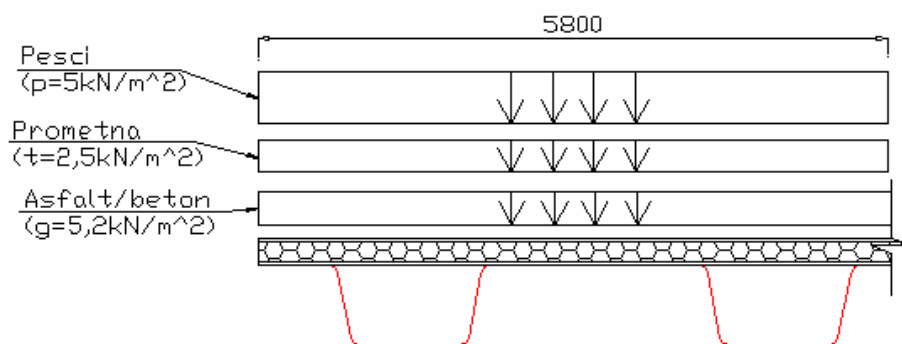
$$G_{k,j} \quad \dots \quad \text{stalna obtežba,}$$

$$Q_{k,i} \quad \dots \quad \text{spremenljiva obtežba.}$$

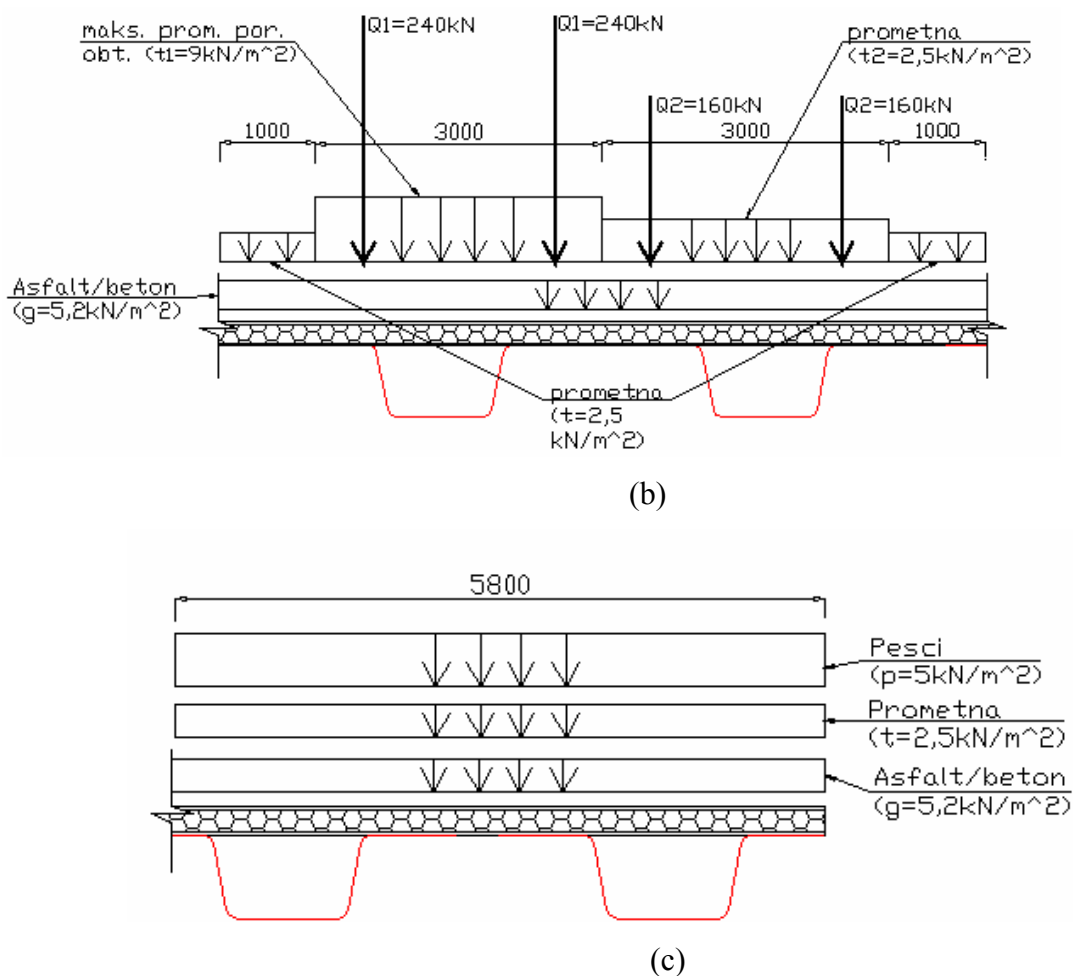
Na sledečih slikah lahko vidimo obtežno shemo, ki prikazuje porazdelitev obtežbe prečno glede na prerez in tudi v tlorisu. Ta shema prikazuje tudi kritično razporeditev obtežbe, kjer je koncentrirana prometna obtežba postavljena na sredino mostne konstrukcije, enakomerno porazdeljena prometna obtežba pa je postavljena na posamezne vozne pasove v skladu s predpisi (prikazano na sledeči sliki). V naslednji tabeli so predstavljeni posamezni obtežni primeri in kombinaciji za MSN in MSU.

Preglednica 7.9 Obtežni primeri in njihove kombinacije.

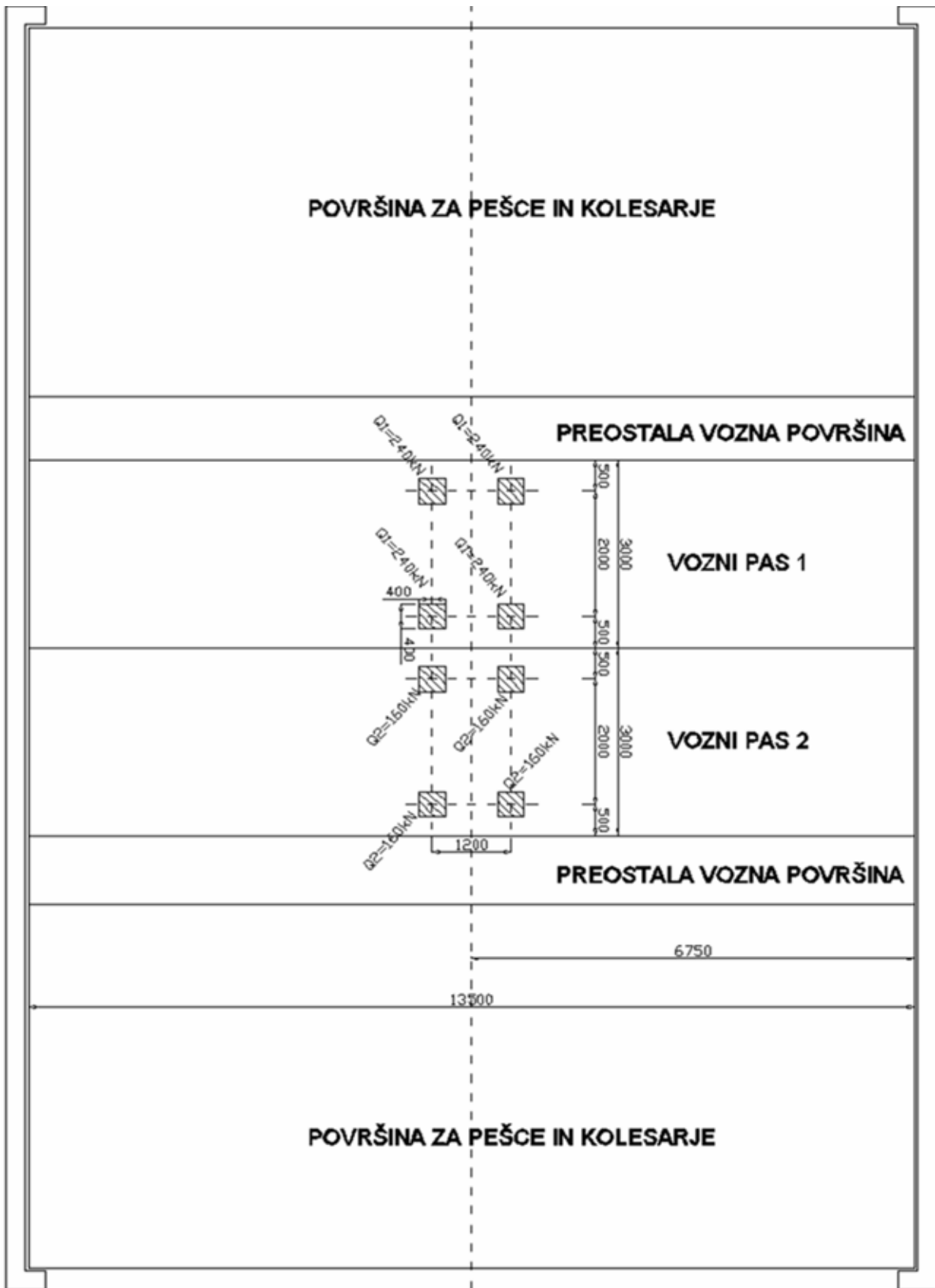
|                |  | Obtežna kombinacija |     |
|----------------|--|---------------------|-----|
|                |  | MSN                 | MSU |
| Obtežni primer | Lastna (nosilna konstrukcija)                | 1.35                | 1   |
|                | Lastna (preostali del)                       | 1.35                | 1   |
|                | Prometna (enakomerno porazdeljena-najmanjša) | 1.35                | 0.9 |
|                | Prometna (enakomerno porazdeljena-največja)  | 1.35                | 0.9 |
|                | Prometna (točkovna-najmanjša)                | 1.35                | 0.9 |
|                | Prometna (točkovna-največja)                 | 1.35                | 0.9 |



(a)



**Slika 7.9** Na slikah (a), (b) in (c) je prikazana obtežba po prečnem prerezu mostu, ki je zaradi preglednosti razdeljena na tri dele; od levega hodnika za pešce in kolesarje do desnega.



Slika 7.10 Tloris obtežne sheme.

## 7.4 Analiza in izbira prečnega prereza

Kot že omenjeno v prejšnjih poglavjih smo najprej izvedli optimizacijo izbire prečnega prereza za tri različne tipe prerezov (na slikah 7.5, 7.6, 7.7). Mostno konstrukcijo za te tri različne tipe prerezov smo dimenzionirali tako, da smo preverili nivo maksimalnih napetosti, maksimalne pomike konstrukcije na sredini razpona in dinamične karakteristike (lasten nihajni čas  $T$ , lastne frekvence  $f$ ).

V nadaljevanju so podrobneje predstavljeni posamezni modeli in njihova analiza. Na osnovi primerjave rezultatov in stroškovnega kriterija je na koncu izbran najugodnejši prerez, ki je kasneje še nadalje optimiziran.

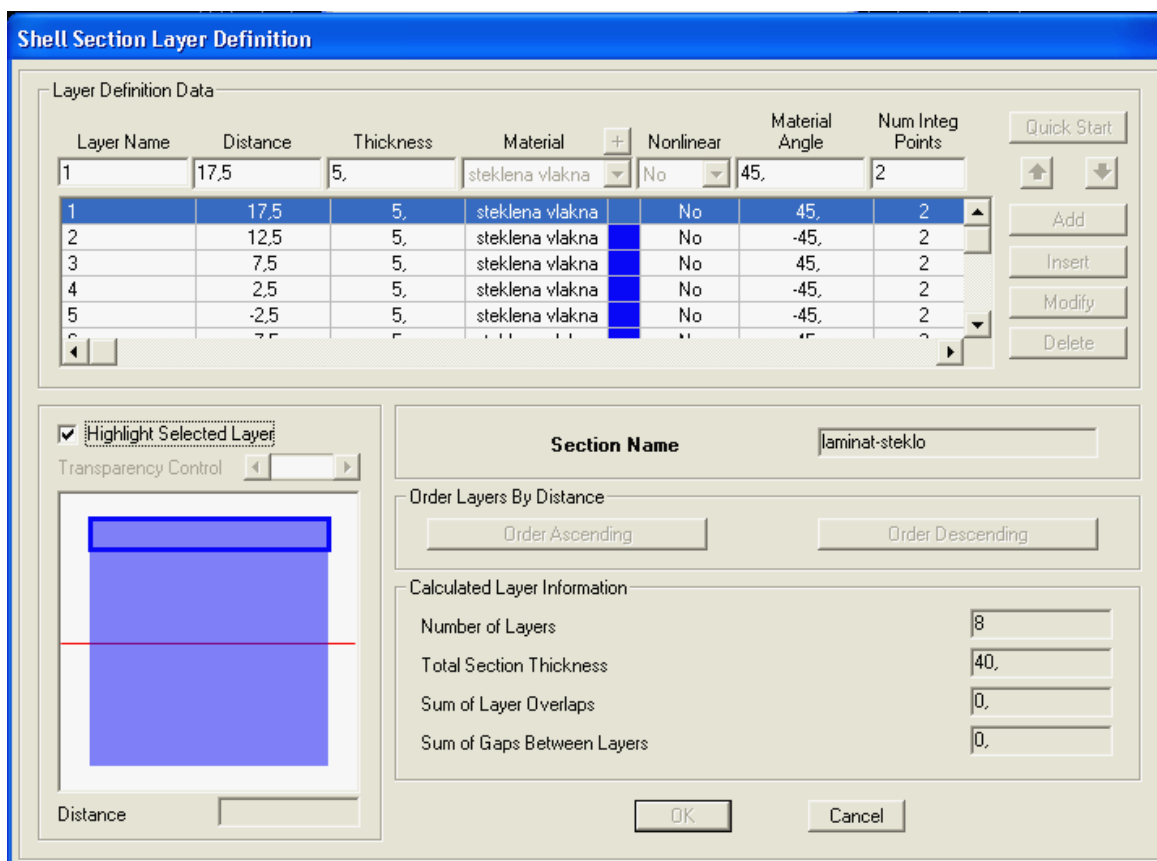
### 7.4.1 Analiza prereza 1

Stene tankostenskega zaprtega laminatnega profila smo modelirali s ploskovnimi »Shell-layered« končnimi elementi, katerim smo predpisali lastnosti posameznih plasti laminata. Materialne karakteristike lamel smo obravnavali kot homogene ortotropne, spodaj pa je tudi prikazano okno iz SAP2000, kjer smo definirali kompozit, ojačan s karbonskimi vlakni z deležem armiranja  $V_f=50\%$ .

|  |  |                              |
|--|--|------------------------------|
| Material Name<br>karbonska vlakna  | Material Type<br>Tendon  | Symmetry Type<br>Orthotropic |
| Modulus of Elasticity<br>E1 116,75<br>E2 13,11<br>E3 3,5                   | Weight and Mass<br>Weight per Unit Volume 1,600E-08<br>Mass per Unit Volume 1,600E-12  | Units<br>KN, mm, C           |
| Poisson's Ratio<br>U12 0,3<br>U13 0,3<br>U23 0,3                           | Other Properties for Tendon Materials<br>Minimum Yield Stress, Fy 1,5<br>Minimum Tensile Stress, Fu 1,5  |                              |
| Coeff of Thermal Expansion<br>A1 1,170E-05<br>A2 1,170E-05<br>A3 1,170E-05 | Advanced Material Property Data<br>Nonlinear Material Data...<br>Material Damping Properties...<br>Time Dependent Properties...<br>Thermal Properties... |                              |
| Shear Modulus<br>G12 9,52<br>G13 9,52<br>G23 8,66                          |  |                              |

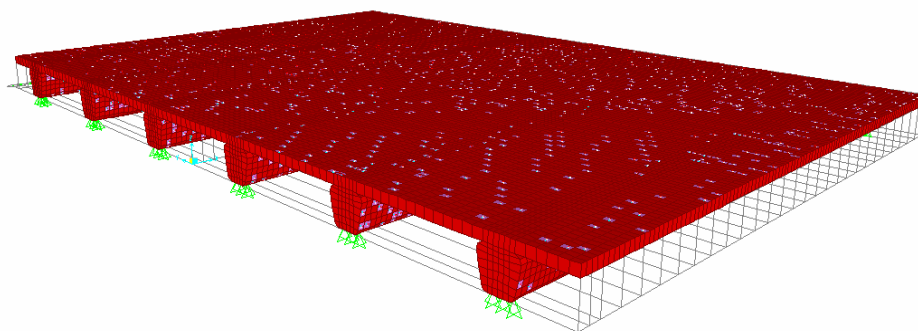
Slika 7.11 Materialne karakteristike s karbonskimi vlakni ojačanega kompozita.

Laminat spodnje pasnice ima antisimetričen balansiran sestav z orientacijo lamel  $[0_3, -10, 0, 0, 10, 0_3]$ , kar smo določili z zaporednim iteriranjem analize za različne sestave laminatov. Debelina posamezne plasti je  $t=5\text{mm}$  in so ojačane s karbonskimi vlakni. Stojini sta simetrična in balansirana laminata s sestavom  $[45, -45, 45, -45, -45, 45, -45, 45]$  in debelino posameznih lamel  $t=5\text{mm}$ , ojačanih s steklenimi vlakni. Skorja sendvič plošče je antisimetričen nebalansiran laminat, s sestavom  $[90, 0, 45, -45, 0, 90]$  in debelino lamele  $t=4\text{mm}$ , ojačane s steklenimi vlakni. Procent armiranja za vse kompozite tega prereza znaša  $V_f=50\%$ . Jedro sendviča je modelirano s 3D končnimi elementi, katerim predpišemo ortotropne materialne karakteristike satovja (»Honeycomb«). Podobno smo s 3D končnimi elementi modelirali tudi poliuretansko polnilo nosilca.



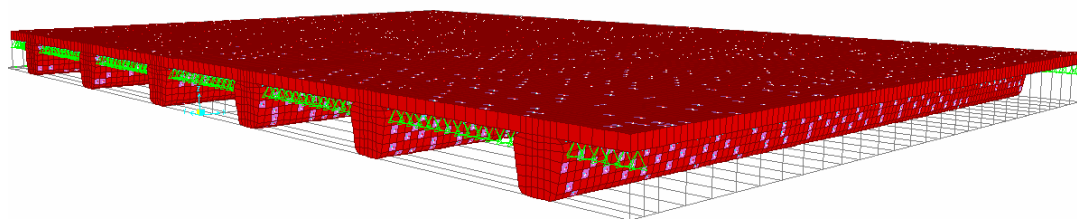
Slika 7.12 Primer podajanja sestava laminata s steklenimi vlakni.

Pri dimenzioniranju se kot kritičen parameter izkaže maksimalni povos na sredini nosilca. Dovoljeni pomik nam narekuje standard in v našem primeru (prosto ležeči nosilec) znaša  $\frac{l}{350} = \frac{13500mm}{350} \approx 38.6mm$ . Na spodnjih dveh slikah sta prikazana 3D modela za obe varianti podpiranja.



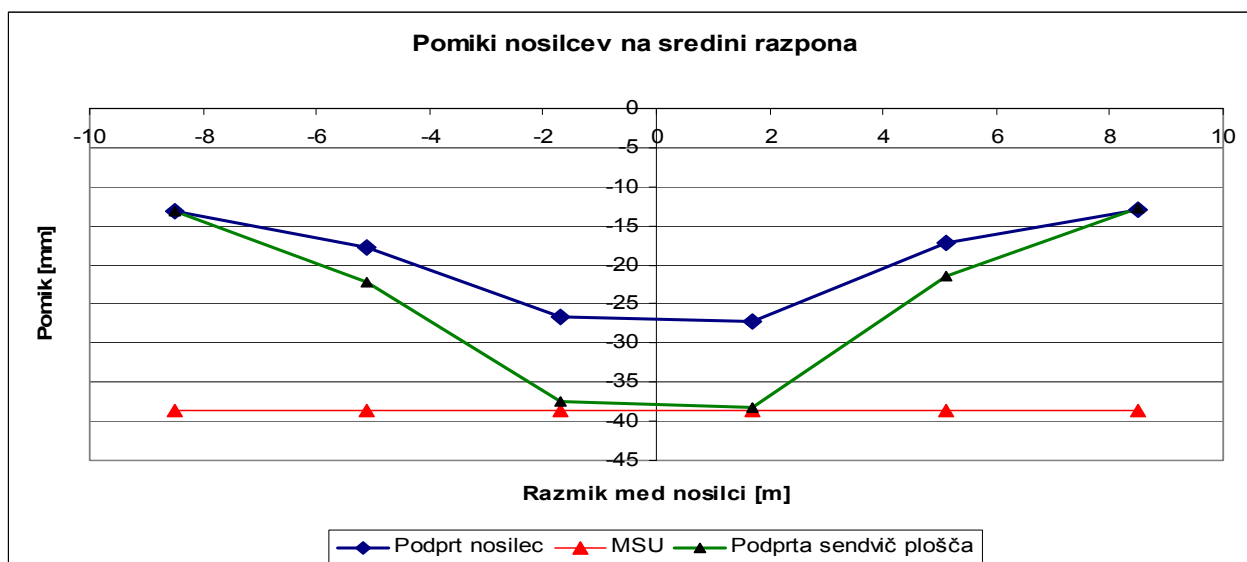
Slika 7.13 Prikaz 3D modela s podpiranjem na dnu nosilcev.





Slika 7.14 Prikaz 3D modela s podpiranjem na sendvič plošči.

Na diagramu spodaj so prikazani maksimalni pomiki na dnu posameznih nosilcev za oba režima podpiranja. Opazimo lahko, da na začetku omenjeni sestav laminatov zadošča mejnemu stanju uporabnosti (MSU) celotne konstrukcije. Nekoliko manjši so pomiki pri podpiranju nosilca, zaradi tega smo ta način podpiranja obdržali tudi za nadaljnjo analizo pri preostalih dveh prerezih.



Slika 7.15 Primerjava maksimalnih pomikov nosilcev za različne načine podpiranja (podprtje nosilca, krovne plošče) in predpisane mejne vrednosti pomikov MSU.

Mejno stanje nosilnosti (MSN) smo preverili na najbolj obremenjenih delih prereza nosilca (normalne napetosti na sredini razpona, strižne napetosti na robovih) in odpornost na medplastne strižne napetosti na stiku med jedrom in zgornjo skorjo sendviča. Najbolj obremenjen nosilec je tretji po vrsti od leve proti desni, ki se nahaja tik pod maksimalno prometno točkovno obtežbo. Kontrole napetosti po posameznih lamelah tankostenskega nosilca in sendvič plošče za skupno prometno obtežbo so izvedene v tabelah v nadaljevanju.

Najprej smo preverili maksimalne napetosti spodnje pasnice. Očitno je, da so varnostni faktorji sorazmeroma veliki glede na predpisanega, ki znaša  $\gamma_m = 11.5$ . Vrednosti dejanskih varnostnih faktorjev so prikazane v tabeli v pripadajočem stolpcu poleg napetosti.

**Preglednica 7.10** Kontrola napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  in  $\sigma_{12}$  v spodnji karbonski pasnici po posameznih plasteh, z dejanskimi pripadajočimi varnostnimi faktorji v najbolj obremenjeni točki pasnice.

| Položaj laminata          | Lamela | Kontrola napetosti                     |                           |  |                           |  |                           |
|---------------------------|--------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
|                           |        | $\sigma_{11}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Dejanski varnostni faktor | $\sigma_{22}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Dejanski varnostni faktor | $\sigma_{12}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Dejanski varnostni faktor |
| Spodnja karbonska pasnica | 1      | 0,1705                                 | 12,90                     | -0,0025                                | 472,44                    | -0,0010                                | 731,45                    |
|                           | 1      | 0,1691                                 | 13,01                     | -0,0035                                | 342,56                    | -0,0010                                | 729,93                    |
|                           | 2      | 0,1729                                 | 12,72                     | 0,0125                                 | 200,43                    | -0,0009                                | 755,94                    |
|                           | 2      | 0,1715                                 | 12,83                     | 0,0115                                 | 217,20                    | -0,0009                                | 754,31                    |
|                           | 3      | 0,1753                                 | 12,55                     | -0,0009                                | 1376,15                   | -0,0010                                | 734,52                    |
|                           | 3      | 0,1739                                 | 12,65                     | -0,0018                                | 653,95                    | -0,0010                                | 732,98                    |
|                           | 4      | 0,1143                                 | 19,25                     | 0,0008                                 | 3140,70                   | -0,0010                                | 736,84                    |
|                           | 4      | 0,1124                                 | 19,57                     | -0,0002                                | 7185,63                   | -0,0010                                | 735,29                    |
|                           | 5      | 0,1801                                 | 12,21                     | -0,0167                                | 71,77                     | 0,0026                                 | 267,48                    |
|                           | 5      | 0,1787                                 | 12,31                     | -0,0179                                | 67,00                     | 0,0026                                 | 266,06                    |
|                           | 6      | 0,1825                                 | 12,05                     | 0,0041                                 | 604,89                    | -0,0009                                | 742,31                    |
|                           | 6      | 0,1811                                 | 12,15                     | 0,0032                                 | 788,89                    | -0,0009                                | 740,74                    |
|                           | 7      | 0,1243                                 | 17,70                     | 0,0058                                 | 430,96                    | -0,0009                                | 744,68                    |
|                           | 7      | 0,1224                                 | 17,97                     | 0,0048                                 | 516,74                    | -0,0009                                | 743,10                    |
|                           | 8      | 0,1873                                 | 11,74                     | -0,0105                                | 114,74                    | -0,0043                                | 162,38                    |
|                           | 8      | 0,1860                                 | 11,83                     | -0,0117                                | 103,00                    | -0,0043                                | 161,70                    |
|                           | 9      | 0,1898                                 | 11,59                     | 0,0091                                 | 273,61                    | -0,0009                                | 750,27                    |
|                           | 9      | 0,1884                                 | 11,68                     | 0,0082                                 | 305,85                    | -0,0009                                | 748,66                    |
|                           | 10     | 0,1911                                 | 11,51                     | 0,0108                                 | 231,37                    | -0,0009                                | 752,69                    |
|                           | 10     | 0,1908                                 | 11,53                     | 0,0098                                 | 254,01                    | -0,0009                                | 751,07                    |

**Preglednica 7.11** Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v  
levi in desni stojini najbolj obremenjenega nosilca.

| Napetost [MPa] |     | Leva stojina | Lokacija        | Desna stojina | Lokacija         | Nosilnost [MPa] | Dejanski varnostni faktor leve stojine | Dejanski varnostni faktor desne stojine |
|----------------|-----|--------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|--|---|
| $\sigma_{11}$  | min | -31,78       | 8. plast spodaj | -32,69        | 8. plast spodaj  | 1200,00         | 37,76                                  | 36,71                                   |
|                | max | 44,72        | 1.plast na vrhu | 38,28         | 1.plast na vrhu  | 2500,00         | 55,91                                  | 65,31                                   |
| $\sigma_{22}$  | min | -34,56       | 1.plast na vrhu | -30,87        | 8. plast spodaj  | 1200,00         | 34,72                                  | 38,88                                   |
|                | max | 24,69        | 8. plast spodaj | 27,51         | 1.plast na vrhu  | 2500,00         | 101,24                                 | 90,87                                   |
| $\sigma_{12}$  | min | -15,36       | 1.plast na vrhu | -17,60        | 1.plast na vrhu  | 700,00          | 45,58                                  | 39,78                                   |
|                | max | 12,34        | 8. plast spodaj | 21,01         | 1.plast na vrhu  | 700,00          | 56,71                                  | 33,31                                   |
| $\sigma_{13}$  | max | -2,85        | 1.plast na vrhu | -2,45         | 2. plast na vrhu | 150,00          | 52,59                                  | 61,30                                   |
|                | min | 2,04         | 7. plast spodaj | 2,22          | 7. plast spodaj  | 150,00          | 73,42                                  | 67,45                                   |
| $\sigma_{23}$  | max | -1,07        | 1.plast na vrhu | -3,98         | 8. plast spodaj  | 150,00          | 139,93                                 | 37,73                                   |
|                | min | 5,17         | 8. plast spodaj | 0,81          | 1.plast na vrhu  | 150,00          | 29,03                                  | 185,87                                  |

**Preglednica 7.12** Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v zgornji skorji sendvič plošče.

| Napetost [Mpa] |     | Napetost v zgornji skorji sendviča | Lokacija         | Dejanski varnostni faktor |
|----------------|-----|------------------------------------|------------------|---------------------------|
| $\sigma_{11}$  | min | -89,38                             | 1.plast spodaj   | 13,43                     |
|                | max | 5,12                               | 1.plast spodaj   | 488,19                    |
| $\sigma_{22}$  | min | -58,54                             | 1.plast spodaj   | 20,5                      |
|                | max | 18,42                              | 1.plast spodaj   | 135,74                    |
| $\sigma_{12}$  | min | -10,43                             | 3. plast spodaj  | 67,11                     |
|                | max | 11,37                              | 3. plast spodaj  | 61,59                     |
| $\sigma_{13}$  | max | -0,82                              | 2. plast spodaj  | 182,26                    |
|                | min | 0,82                               | 5. plast na vrhu | 182,26                    |
| $\sigma_{23}$  | max | -1,09                              | 1.plast spodaj   | 137,49                    |
|                | min | 0,87                               | 6. plast spodaj  | 173,01                    |

Maksimalna strižna medplastna napetost znaša  $\sigma_{13} = 1,38MPa$ , kar pa je manj kot znaša medplastna strižna nosilnost  $\tau_{13} = 20.55MPa$ .

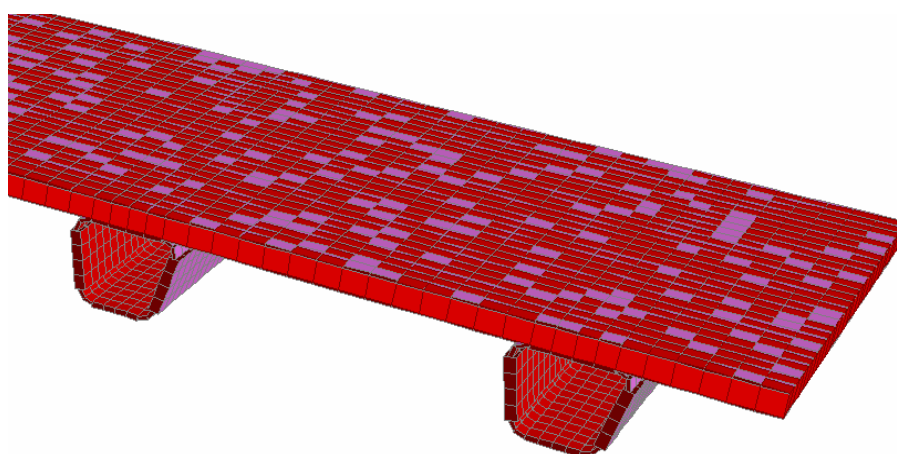
Lastni nihajni časi in frekvence za prvih nekaj nihajnih oblik so podane v tabeli spodaj. Frekvenčno območje delovanja dinamične obtežbe prometa je med 2Hz in 5Hz, kar pa je precej nižje kot pri naši nosilni konstrukciji mostu. V splošnem lahko sklepamo, da imajo konstrukcije iz armirane plastike zelo dobre dinamične lastnosti zaradi njihove majhne mase in velikega razmerja med togostjo in maso.

**Preglednica 7.13** Osnovne dinamične karakteristike za prvih nekaj nihajnih oblik.

| Nihajna oblika | Nihajni čas [s] | Lastna frekvenca nihanja [Hz] |
|----------------|-----------------|-------------------------------|
| 1              | 0,083           | 12,12                         |
| 2              | 0,080           | 12,46                         |
| 3              | 0,071           | 14,08                         |
| 4              | 0,056           | 17,76                         |
| 5              | 0,042           | 23,82                         |
| 6              | 0,032           | 31,44                         |

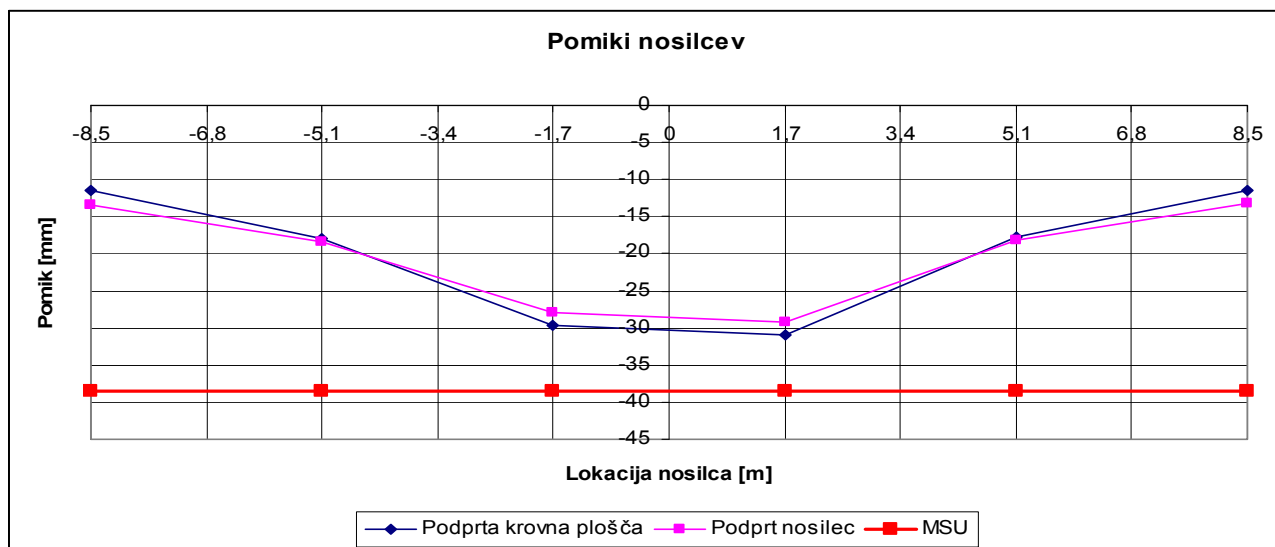
### 7.4.2 Analiza prereza 2

V tem primeru imajo stojini sendvič strukturo, podobno modelirani s »Shell-layered« končnimi elementi, kot v prejšnjem primeru. Sestav in orientacijo plasti tega laminata opišemo s  $[45, -45, 45, -45, 0, 0, -45, 45, -45, 45]$ , kjer sta skorji narejeni iz kompozita, ojačanega s steklenimi vlakni, osrednja plast pa je iz poliuretanske pene (osrednja plast ima orientacijo  $0^\circ$ ). Debelina posamezne stekleno ojačane lamele je  $t_s = 5\text{mm}$ , debelina poliuretanskega jedra pa je  $t_j = 25\text{mm}$ . S to obliko strukture stojine je zagotovljena večja odpornost proti lokalnemu izbočenju.



**Slika 7.16** Prikaz prereza 3D modela skozi nosilec in del krovne sendvič plošče.

Spodnja pasnica je v karbonski izvedbi z zaporedjem in orientacijo vlaken  $[0_3, -10, 0, 0, 10, 0_3]$ , debelina posamezne lamele pa je  $t = 5\text{mm}$ . Zgornja pasnica in spodnja skorja krovne plošče sta modelirani kot en končni element, ki ima sestav  $[45, -45, 45, -45, -45, 45, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 0, 90]$ , lamele pa so ojačane s steklenimi vlakni, ki so debeline  $t = 5\text{mm}$ . Pri vseh kompozitih znaša procent armiranja  $V_f = 50\%$ , razen pri kompozitu spodnje pasnice, kjer delež karbonskih vlaken znaša  $V_f = 60\%$  za zagotovitev ustrezne nosilnosti. Sendvič struktura krovne plošče ima enak sestav in lastnosti kot v primeru prvega prereza. Tudi za pomike velja ista omejitev kot v prvem primeru, zadoščanje tega kriterija pa je razvidno z naslednjega diagrama.



**Slika 7.17** Primerjava maksimalnih pomikov nosilcev za različne načine podpiranja (podprtje nosilca, krovne plošče) in predpisane mejne vrednosti pomikov MSU.

Podobno kot pri prvi varianti prereza, smo tudi tukaj preverili najbolj kritična mesta napetosti v mostni konstrukciji. Kontrole so izvedene v spodnjih tabelah, kjer so izraženi dejanski varnostni faktorji nosilnosti konstrukcije.

**Preglednica 7.14** Kontrola napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  in  $\sigma_{12}$  v spodnji karbonski pasnici po posameznih plasteh z dejanskimi pripadajočimi varnostnimi faktorji v najbolj obremenjeni točki pasnice (na sredini razspona mostne konstrukcije).

| Položaj laminata          | Lamela | Kontrola napetosti                     |                                 |  |                                 |  |          |
|---------------------------|--------|--|---------------------------------|--|---------------------------------|--|----------|
|                           |        | $\sigma_{11}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Dejanski<br>varnostni<br>faktor | $\sigma_{22}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Dejanski<br>varnostni<br>faktor | $\sigma_{12}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Kontrola |
| Spodnja karbonska pasnica | 1      | 0,1705                                 | 12,90                           | -0,0025                                | 472,44                          | -0,0010                                | 731,45   |
|                           | 1      | 0,1691                                 | 13,01                           | -0,0035                                | 342,56                          | -0,0010                                | 729,93   |
|                           | 2      | 0,1729                                 | 12,72                           | 0,0125                                 | 200,43                          | -0,0009                                | 755,94   |
|                           | 2      | 0,1715                                 | 12,83                           | 0,0115                                 | 217,20                          | -0,0009                                | 754,31   |
|                           | 3      | 0,1753                                 | 12,55                           | -0,0009                                | 1376,15                         | -0,0010                                | 734,52   |
|                           | 3      | 0,1739                                 | 12,65                           | -0,0018                                | 653,95                          | -0,0010                                | 732,98   |
|                           | 4      | 0,1143                                 | 19,25                           | 0,0008                                 | 3140,70                         | -0,0010                                | 736,84   |
|                           | 4      | 0,1124                                 | 19,57                           | -0,0002                                | 7185,63                         | -0,0010                                | 735,29   |
|                           | 5      | 0,1801                                 | 12,21                           | -0,0167                                | 71,77                           | 0,0026                                 | 267,48   |
|                           | 5      | 0,1787                                 | 12,31                           | -0,0179                                | 67,00                           | 0,0026                                 | 266,06   |
|                           | 6      | 0,1825                                 | 12,05                           | 0,0041                                 | 604,89                          | -0,0009                                | 742,31   |
|                           | 6      | 0,1811                                 | 12,15                           | 0,0032                                 | 788,89                          | -0,0009                                | 740,74   |
|                           | 7      | 0,1243                                 | 17,70                           | 0,0058                                 | 430,96                          | -0,0009                                | 744,68   |
|                           | 7      | 0,1224                                 | 17,97                           | 0,0048                                 | 516,74                          | -0,0009                                | 743,10   |
|                           | 8      | 0,1873                                 | 11,74                           | -0,0105                                | 114,74                          | -0,0043                                | 162,38   |
|                           | 8      | 0,1860                                 | 11,83                           | -0,0117                                | 103,00                          | -0,0043                                | 161,70   |
|                           | 9      | 0,1898                                 | 11,59                           | 0,0091                                 | 273,61                          | -0,0009                                | 750,27   |
|                           | 9      | 0,1884                                 | 11,68                           | 0,0082                                 | 305,85                          | -0,0009                                | 748,66   |
|                           | 10     | 0,1911                                 | 11,51                           | 0,0108                                 | 231,37                          | -0,0009                                | 752,69   |
|                           | 10     | 0,1908                                 | 11,53                           | 0,0098                                 | 254,01                          | -0,0009                                | 751,07   |

**Preglednica 7.15** Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v levi in desni stojini najbolj obremenjenega nosilca.

| Napetost [Mpa] |     | Leva stojina | Lokacija        | Desna stojina | Lokacija         | Nosilnost | Dejanski varnostni faktor leve stojine | Dejanski varnostni faktor desne stojine |
|----------------|-----|--------------|-----------------|---------------|------------------|-----------|--|---|
| $\sigma_{11}$  | min | -38,833      | 1.plast na vrhu | -50,40        | 1.plast na vrhu  | 1200,00   | 30,90                                  | 23,81                                   |
|                | max | 45,836       | 6. plast spodaj | 50,25         | 1.plast na vrhu  | 2500,00   | 54,54                                  | 49,76                                   |
| $\sigma_{22}$  | min | -47,419      | 1.plast na vrhu | -72,81        | 1.plast na vrhu  | 1200,00   | 25,31                                  | 16,48                                   |
|                | max | 36,304       | 6. plast spodaj | 56,80         | 6. plast spodaj  | 2500,00   | 68,86                                  | 44,01                                   |
| $\sigma_{12}$  | min | -20,263      | 1.plast na vrhu | -18,88        | 1.plast na vrhu  | 700,00    | 34,55                                  | 37,07                                   |
|                | max | 24,305       | 1.plast na vrhu | 15,34         | 1.plast na vrhu  | 700,00    | 28,80                                  | 45,65                                   |
| $\sigma_{13}$  | max | -3,111       | 1.plast na vrhu | -3,24         | 2. plast na vrhu | 150,00    | 48,22                                  | 46,34                                   |
|                | min | 2,448        | 6. plast spodaj | 2,34          | 6. plast spodaj  | 150,00    | 61,27                                  | 64,08                                   |
| $\sigma_{23}$  | max | -5,635       | 2.plast na vrhu | -1,46         | 2. plast na vrhu | 150,00    | 26,62                                  | 102,74                                  |
|                | min | 0,929        | 6. plast spodaj | 7,38          | 5. plast spodaj  | 150,00    | 161,46                                 | 20,33                                   |



**Preglednica 7.16** Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  v zgornji skorji sendvič plošče.

| Napetost [Mpa] |     | Napetost v zgornji skorji sendviča | Lokacija        | Dejanski varnostni faktor |
|----------------|-----|------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| $\sigma_{11}$  | min | -88,89                             | 1.plast spodaj  | 13,50                     |
|                | max | 5,26                               | 1.plast spodaj  | 488,19                    |
| $\sigma_{22}$  | min | -56,86                             | 1.plast spodaj  | 21,10                     |
|                | max | 16,72                              | 1.plast spodaj  | 135,74                    |
| $\sigma_{12}$  | min | -11,81                             | 3. plast spodaj | 59,26                     |
|                | max | 12,96                              | 3. plast spodaj | 61,59                     |
| $\sigma_{13}$  | max | -0,77                              | 2. plast zgoraj | 194,30                    |
|                | min | 0,77                               | 5. plast spodaj | 194,30                    |
| $\sigma_{23}$  | max | -1,00                              | 1.plast zgoraj  | 150,00                    |
|                | min | 0,82                               | 6. plast spodaj | 182,93                    |

Maksimalna strižna medplastna napetost znaša  $\sigma_{13} = 3.10MPa$ , kar pa je manj kot znaša medplastna strižna nosilnost  $\tau_{13} = 20.55MPa$ .

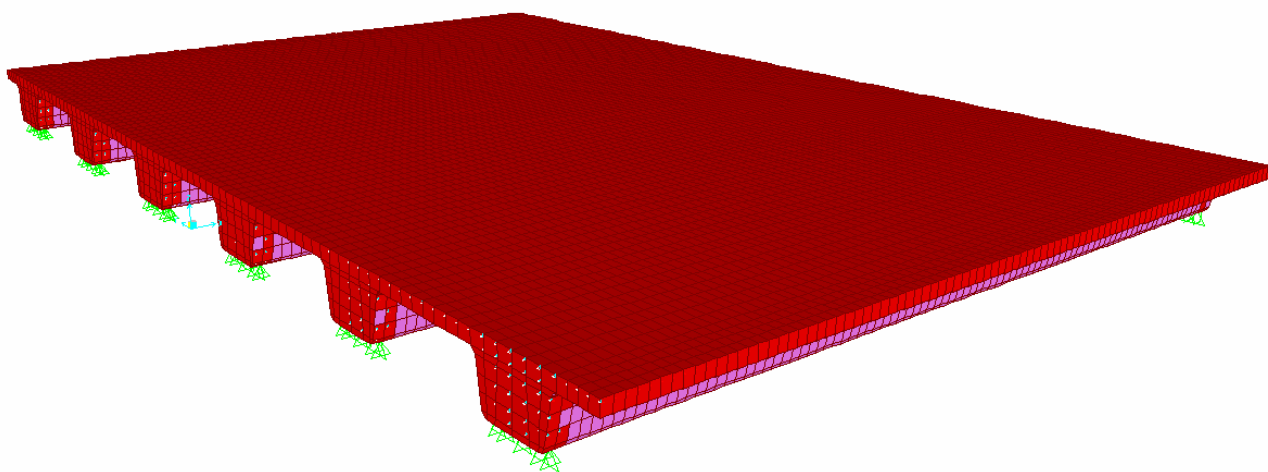
Lastni nihajni časi in frekvence za prvih nekaj nihajnih oblik so podane v tabeli spodaj, iz katere je razvidno, da je konstrukcija izven frekvenčnega območja prometne dinamične obtežbe.

**Preglednica 7.17** Osnovne dinamične karakteristike za prvih nekaj nihajnih oblik.

| Nihajna oblika | Nihajni čas [s] | Lastna frekvenca nihanja [Hz] |
|----------------|-----------------|-------------------------------|
| 1              | 0,071           | 14,14                         |
| 2              | 0,062           | 16,16                         |
| 3              | 0,052           | 19,34                         |
| 4              | 0,042           | 23,82                         |
| 5              | 0,04            | 25                            |
| 6              | 0,032           | 31,44                         |

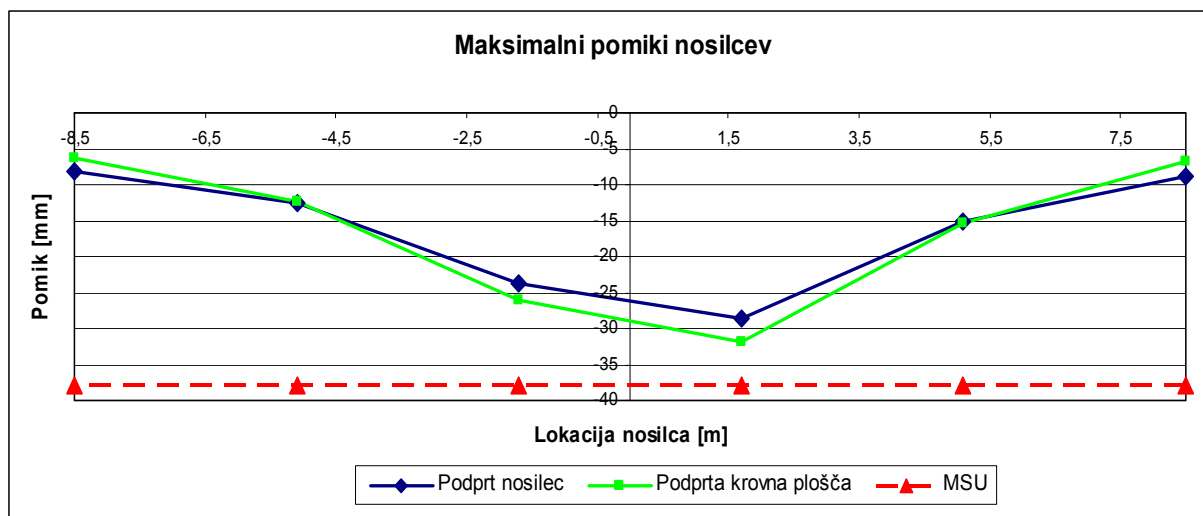
### 7.4.3 Analiza prereza 3

V prejšnjem poglavju je že bilo omenjeno, da gre pri tem prečnem prerezu za odprti škatlasti tankostenski profil. Spodnja pasnica je modelirana s ploskovnimi »Shell-layered« končnimi elementi, ki imajo antisimetričen balansiran sestav  $[0_3, -10, 0, 0, 10, 0_3]$  in debelino posamezne lamele  $t=5\text{mm}$ . Sestav stojine je simetričen balansiran laminat z orientacijo plasti  $[45, -45, 45, -45, -45, 45, -45, 45]$  in debelino posamezne plasti  $t=5\text{mm}$ , kompozit pa je ojačan s steklenimi vlakni. Zgornja pasnica je modelirana skupaj s spodnjo skorjo šendvičaste krovne plošče in ima naslednji sestav  $[45, -45, 45, -45, -45, 45, -45, 45, 90, 0, -45, 45, 0, 90]$ . Sestav stene sendviča je antisimetričen nebalansiran laminat z debelino posamezne lamele  $t=4\text{mm}$ . Vsi kompoziti (karbon, steklo) imajo delež armiranja  $V_f=50\%$ . Pravkar omenjeni sestav laminatov smo določili za zagotovitev mejnega stanja uporabnosti. To nam dokazuje tudi spodnji diagram. Jedro sendviča je modelirano s 3D končnimi elementi, katerim predpišemo ortotropne materialne karakteristike satovja (»Honeycomb«).



Slika 7.18 Skica 3D modela za tretji prerez.

Tudi za ta prerez velja ista omejitev pomikov  $\left( \frac{l}{350} = \frac{13500\text{mm}}{350} \approx 38.6\text{mm} \right)$  in napetosti kot v prvem primeru.

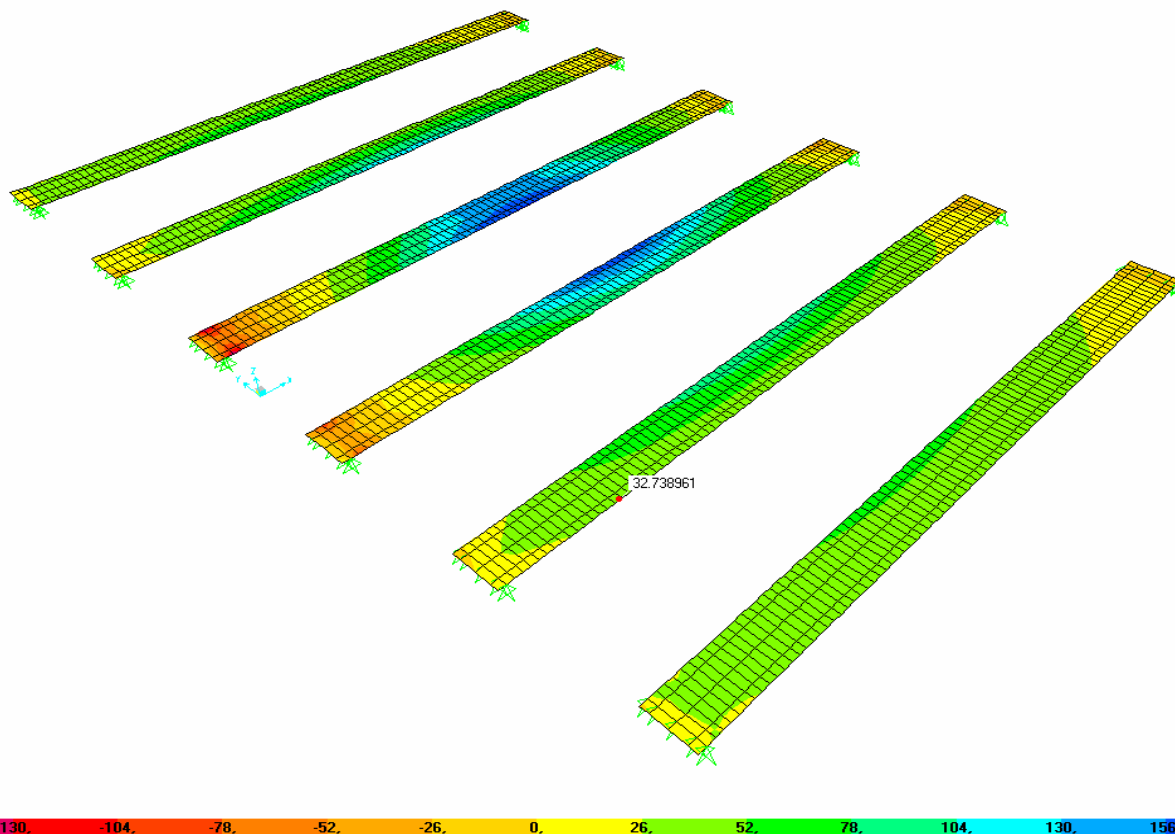


**Slika 7.19** Primerjava maksimalnih pomikov nosilcev za različne načine podpiranja (podprtje nosilca, krovne plošče) in predpisane mejne vrednosti pomikov MSU.

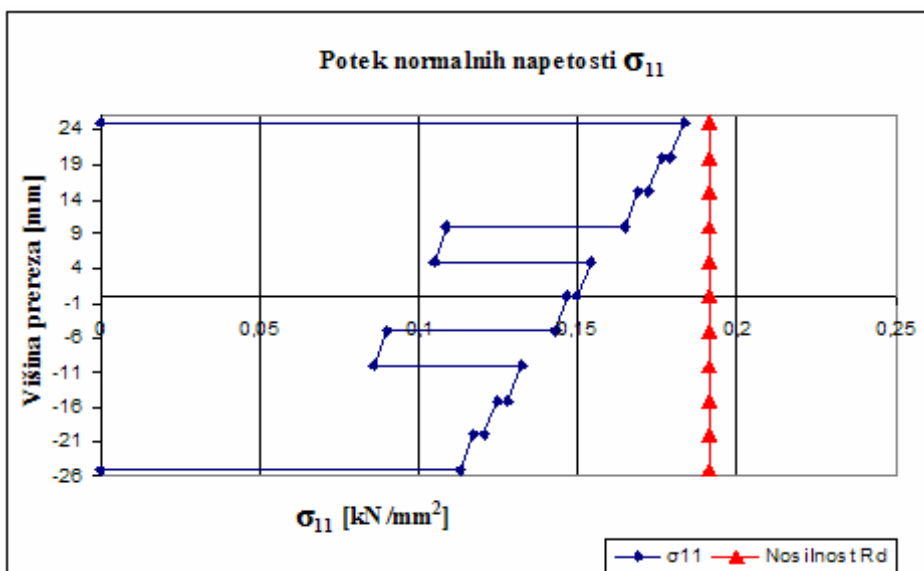
Kontrola napetosti je podobno kot v prejšnjih primerih izvedena po posameznih plasteh za vse laminate. Vrednosti največjih oz. najmanjših napetosti pa so v tem primeru poleg tabelaričnega prikaza navedene, za boljšo preglednost, še v obliki diagramov napetosti. V tabelah so tudi iz vrednoteni dejanski varnostni faktorji, na podlagi česar lahko sklepamo o ustreznosti izbranih prereзов laminatov.

**Preglednica 7.18** Kontrola napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  in  $\sigma_{12}$  v spodnji karbonski pasnici po posameznih plasteh z dejanskimi pripadajočimi varnostnimi faktorji v najbolj obremenjeni točki pasnice.

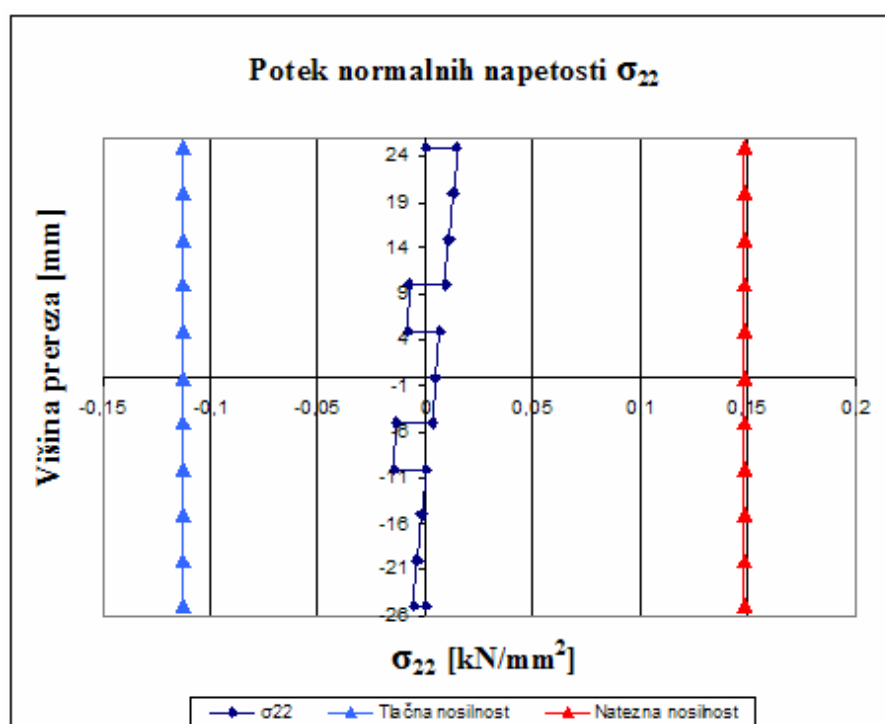
| Položaj laminata          | Lamela | Kontrola napetosti                     |                                 |  |                                 |  |          |
|---------------------------|--------|--|---------------------------------|--|---------------------------------|--|----------|
|                           |        | $\sigma_{11}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Dejanski<br>varnostni<br>faktor | $\sigma_{22}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Dejanski<br>varnostni<br>faktor | $\sigma_{12}$<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Kontrola |
| Spodnja karbonska pasnica | 1,00   | 0,1132                                 | 19,43                           | -0,0054                                | 242,45                          | -0,0029                                | 609,32   |
|                           | 1,00   | 0,1175                                 | 18,73                           | -0,0042                                | 312,27                          | -0,0029                                | 608,28   |
|                           | 2,00   | 0,1206                                 | 18,25                           | 0,0133                                 | 127,81                          | -0,0030                                | 593,77   |
|                           | 2,00   | 0,1248                                 | 17,63                           | 0,0145                                 | 117,26                          | -0,0030                                | 592,79   |
|                           | 3,00   | 0,1279                                 | 17,20                           | -0,0033                                | 395,62                          | -0,0030                                | 607,46   |
|                           | 3,00   | 0,1322                                 | 16,65                           | -0,0021                                | 622,61                          | -0,0030                                | 606,43   |
|                           | 4,00   | 0,0859                                 | 25,62                           | -0,0012                                | 1073,49                         | -0,0030                                | 605,81   |
|                           | 4,00   | 0,0899                                 | 24,48                           | 0,0000                                 | /                               | -0,0030                                | 604,79   |
|                           | 5,00   | 0,1426                                 | 15,43                           | -0,0147                                | 88,62                           | 0,0000                                 | 44800,00 |
|                           | 5,00   | 0,1468                                 | 14,98                           | -0,0135                                | 96,65                           | 0,0001                                 | 32581,82 |
|                           | 6,00   | 0,1499                                 | 14,67                           | 0,0029                                 | 578,91                          | -0,0030                                | 602,15   |
|                           | 6,00   | 0,1542                                 | 14,27                           | 0,0041                                 | 411,31                          | -0,0030                                | 601,14   |
|                           | 7,00   | 0,1050                                 | 20,96                           | 0,0050                                 | 339,38                          | -0,0030                                | 600,54   |
|                           | 7,00   | 0,1089                                 | 20,19                           | 0,0062                                 | 273,94                          | -0,0030                                | 599,53   |
|                           | 8,00   | 0,1646                                 | 13,36                           | -0,0084                                | 154,60                          | -0,0058                                | 310,57   |
|                           | 8,00   | 0,1689                                 | 13,03                           | -0,0072                                | 180,83                          | -0,0058                                | 309,23   |
|                           | 9,00   | 0,1720                                 | 12,79                           | 0,0092                                 | 185,69                          | -0,0030                                | 597,13   |
|                           | 9,00   | 0,1762                                 | 12,49                           | 0,0104                                 | 164,22                          | -0,0030                                | 596,14   |
|                           | 10,00  | 0,1793                                 | 12,27                           | 0,0112                                 | 151,41                          | -0,0030                                | 595,35   |
|                           | 10,00  | 0,1835                                 | 11,99                           | 0,0124                                 | 136,82                          | -0,0030                                | 594,36   |



Slika 7.20 Razporeditev normalnih napetosti  $\sigma_{11}$  [kN/mm<sup>2</sup>] po vseh spodnjih karbonskih pasnicah mostne konstrukcije. Najbolj obremenjena je tretja pasnica z leve proti desni .



Slika 7.21 Potek normalnih napetosti  $\sigma_{11}$  [kN/mm<sup>2</sup>] v spodnji karbonski pasnici na najbolj obremenjenem delu.

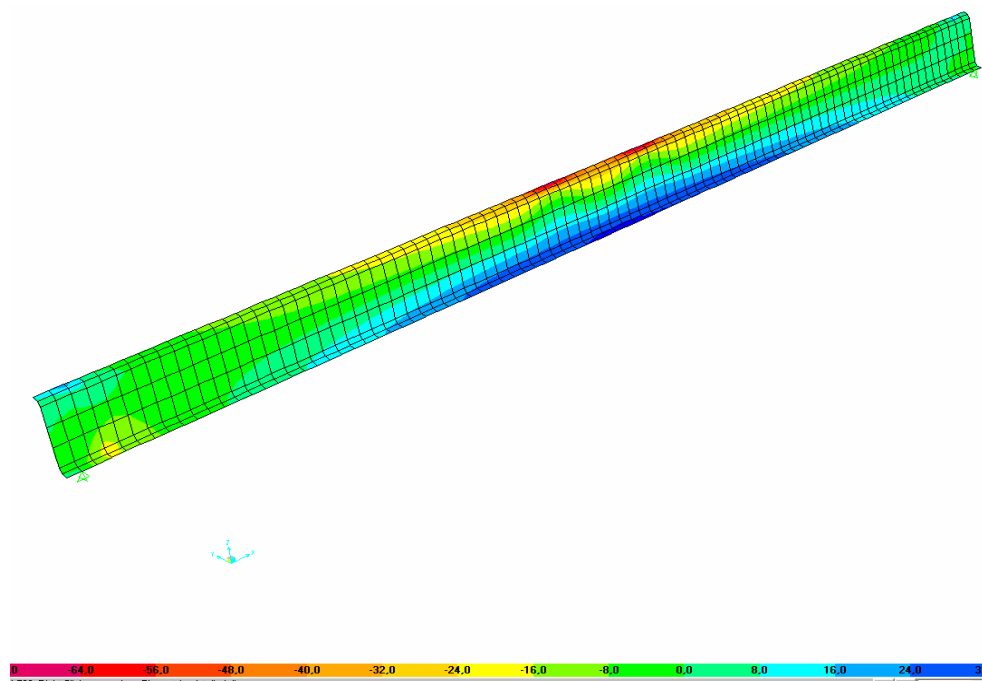


**Slika 7.22** Potek normalnih napetosti  $\sigma_{22}$  [ $\text{kN/mm}^2$ ] v spodnji karbonski pasnici na najbolj obremenjenem delu.

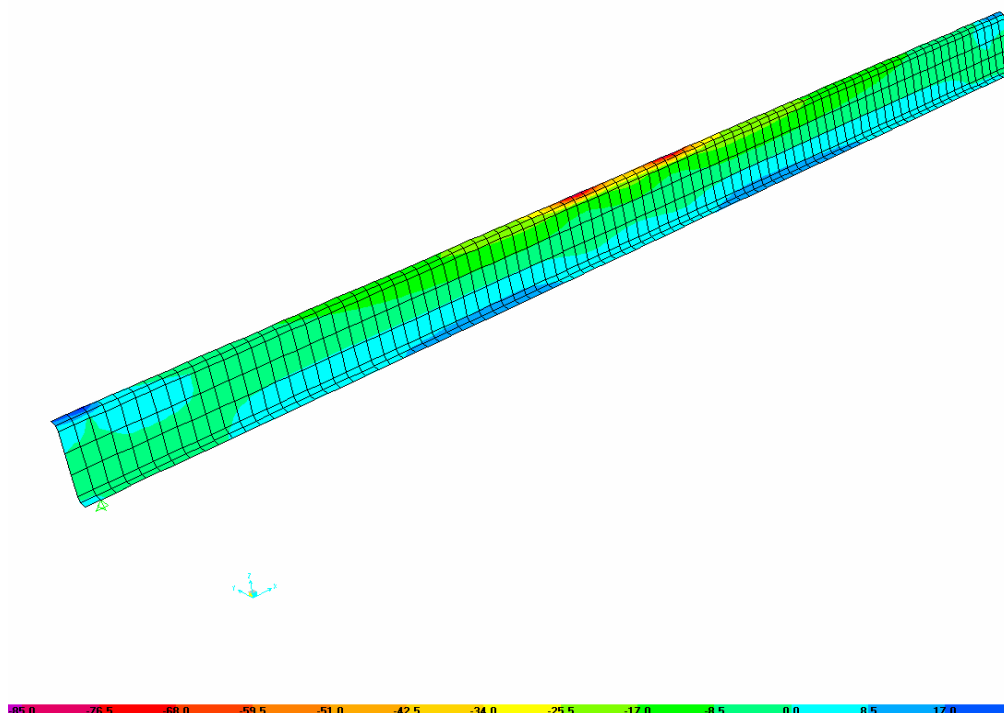
**Preglednica 7.19** Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$  in  $\sigma_{23}$   
v levi in desni stojini najbolj obremenjenega nosilca.

| Smer napetosti |     | Napetosti-leva stojina [MPa] | Lokacija        | Napetosti-desna stojina [MPa] | Lokacija        | Nosilnost | Dejanski varnostni faktor leve stojine | Dejanski varnostni faktor desne stojine |
|----------------|-----|------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-----------|--|---|
| $\sigma_{11}$  | min | -75,338                      | 1.plast na vrhu | -40,466                       | 8. plast spodaj | 1200      | 15,93                                  | 29,65                                   |
|                | max | 34,789                       | 1.plast na vrhu | 43,574                        | 8. plast spodaj | 2500      | 71,86                                  | 57,37                                   |
| $\sigma_{22}$  | min | -88,623                      | 1.plast na vrhu | -39,925                       | 8. plast spodaj | 1200      | 13,54                                  | 30,06                                   |
|                | max | 67,766                       | 8. plast spodaj | 31,495                        | 1.plast na vrhu | 2500      | 36,89                                  | 79,38                                   |
| $\sigma_{12}$  | min | -24,402                      | 1.plast na vrhu | -20,242                       | 8. plast spodaj | 700       | 28,69                                  | 34,58                                   |
|                | max | 17,769                       | 8. plast spodaj | 29,304                        | 1.plast na vrhu | 700       | 39,39                                  | 23,89                                   |
| $\sigma_{13}$  | max | 0,003                        | 8. plast spodaj | 0,003                         | 8. plast spodaj | 150       | 45,40                                  | 46,89                                   |
|                | min | -0,003                       | 2.plast na vrhu | -0,003                        | 1.plast na vrhu | 150       | 57,87                                  | 58,41                                   |
| $\sigma_{23}$  | max | 0,012                        | 7. plast spodaj | 0,003                         | 8. plast spodaj | 150       | 12,12                                  | 44,22                                   |
|                | min | -0,003                       | 1.plast na vrhu | -0,008                        | 1.plast na vrhu | 150       | 59,59                                  | 19,01                                   |

Na diagramih spodaj so prikazani poteki obravnavanih napetosti ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$ ) v plasteh stojni z najnižjim varnostnim faktorjem.

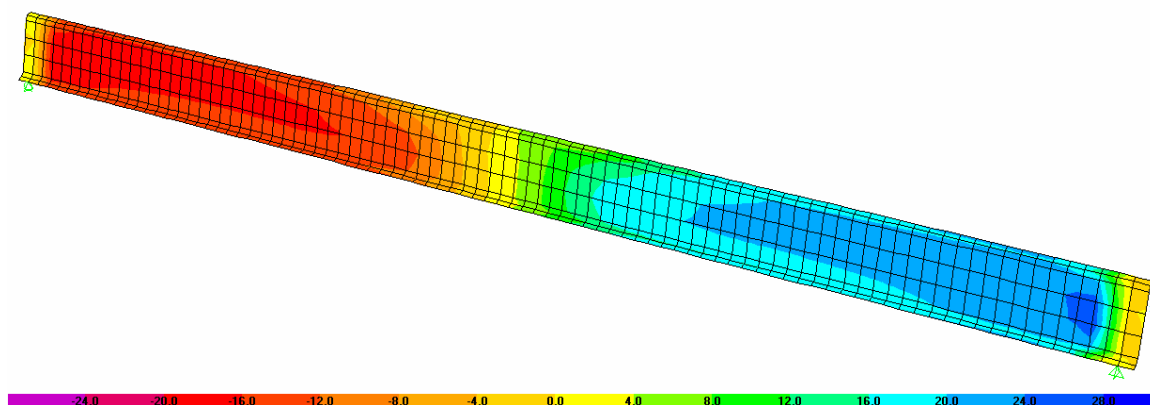


Slika 7.23 Diagram napetosti  $\sigma_{11}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na vrhu prve plasti v levi stojini.

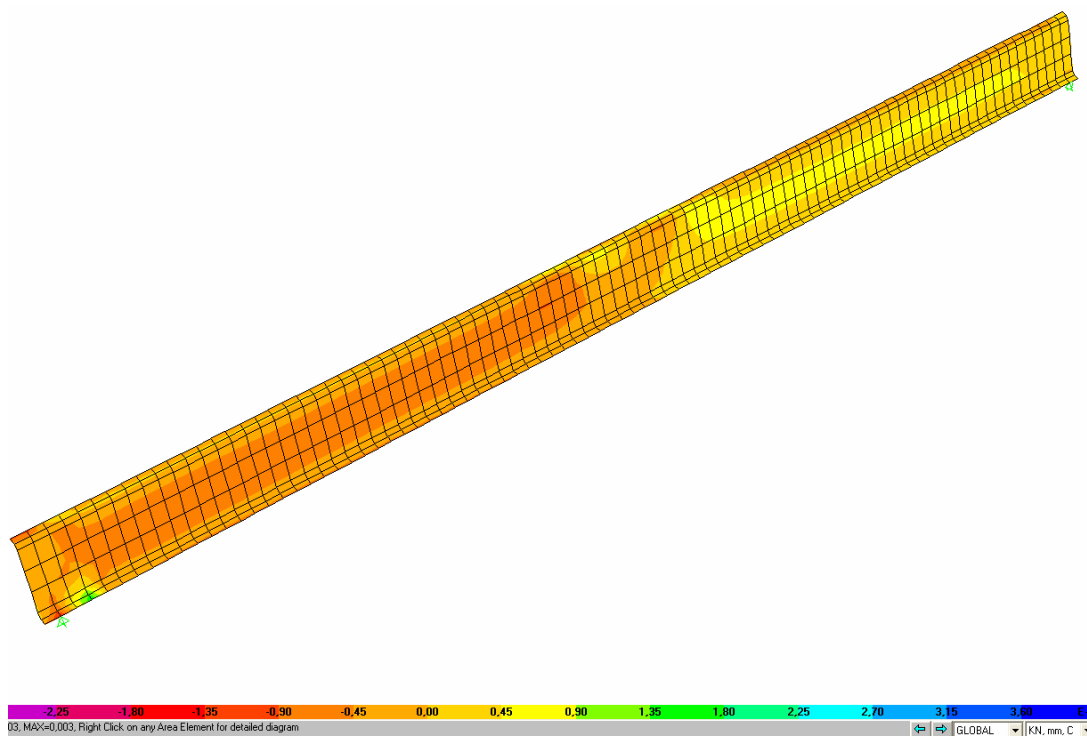


Slika 7.24 Diagram napetosti  $\sigma_{22}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na vrhu prve plasti v levi stojini.

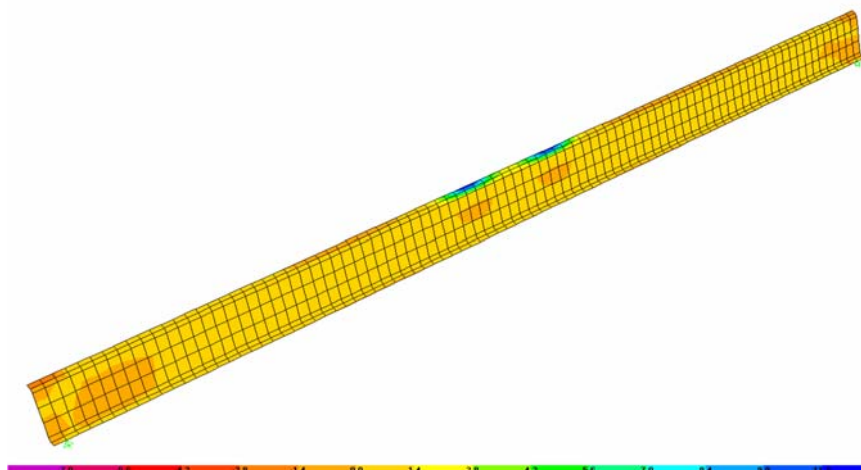




Slika 7.25 Diagram napetosti  $\sigma_{12}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na vrhu prve plasti v desni stojini.



Slika 7.26 Diagram napetosti  $\sigma_{13}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na spodnji strani osme plasti v levi stojini.



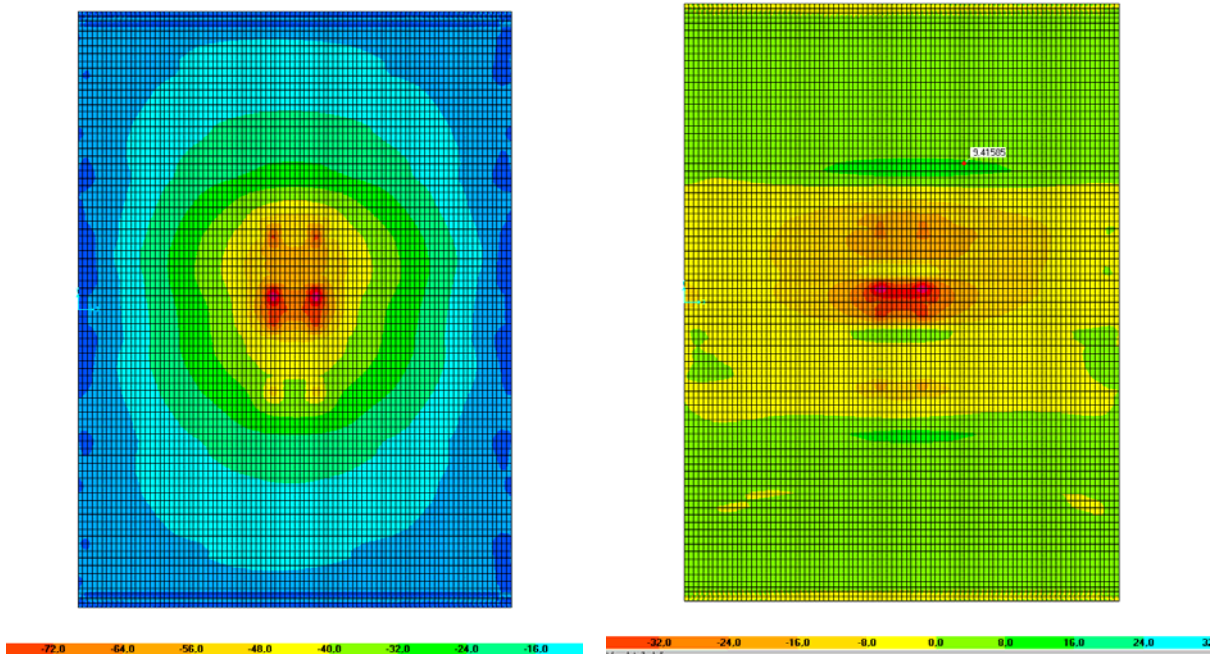
**Slika 7.27** Diagram napetosti  $\sigma_{23}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na spodnji strani sedme plasti v levi stojini.

V spodnji tabeli so zbrane posamezne maksimalne napetosti za zgornjo skorjo sendvič krovne plošče. Poleg kontrole nosilnosti se v tabeli nahaja tudi lokacija maksimalne oz. minimalne napetosti v laminatu.

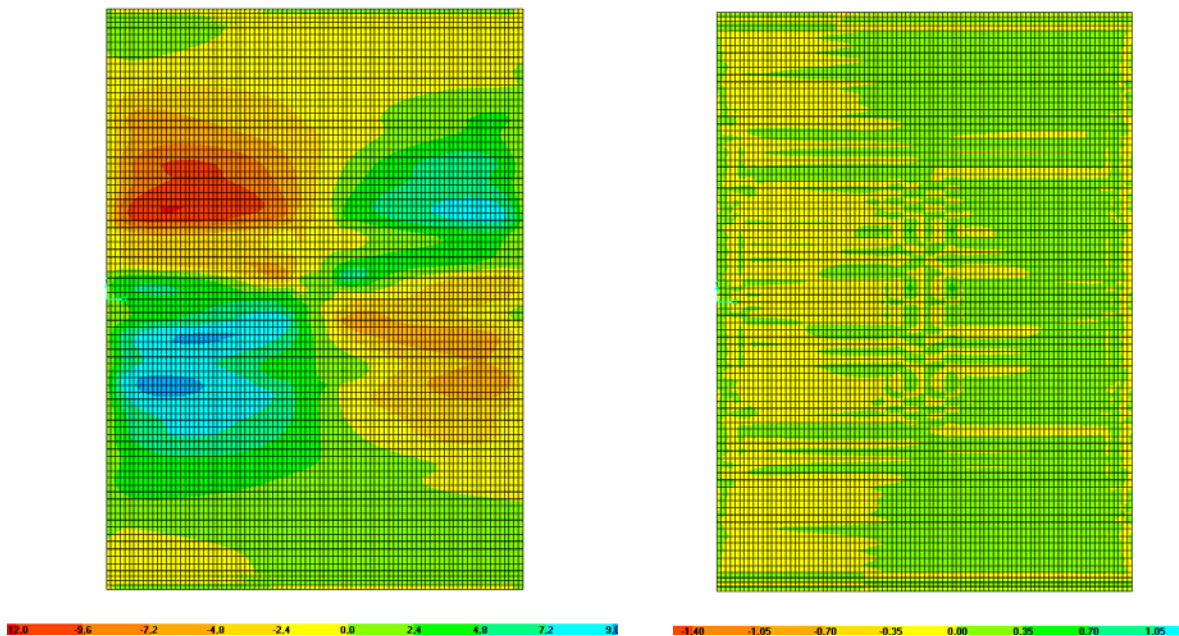
**Preglednica 7.20** Kontrola maksimalnih in minimalnih napetosti  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$  in  $\sigma_{23}$  v zgornji skorji sendvič plošče.

| Napetost [MPa] |     | Napetost v zgornji skorji sendviča | Lokacija         | Dejanski varnostni faktor |
|----------------|-----|------------------------------------|------------------|---------------------------|
| S11            | min | -100,736                           | 1.plast na vrhu  | 11,91                     |
|                | max | 6,151                              | 1.plast na vrhu  | 406,44                    |
| S22            | min | -58,164                            | 1.plast na vrhu  | 20,63                     |
|                | max | 7,302                              | 1.plast na vrhu  | 342,37                    |
| S12            | min | -12,212                            | 3. plast na vrhu | 57,32                     |
|                | max | 9,505                              | 3. plast na vrhu | 73,65                     |
| S13            | max | -0,726                             | 2. plast na vrhu | 82,64                     |
|                | min | 0,726                              | 5. plast spodaj  | 82,64                     |
| S23            | max | -1,022                             | 1.plast na vrhu  | 58,71                     |
|                | min | 0,75                               | 6. plast spodaj  | 80                        |

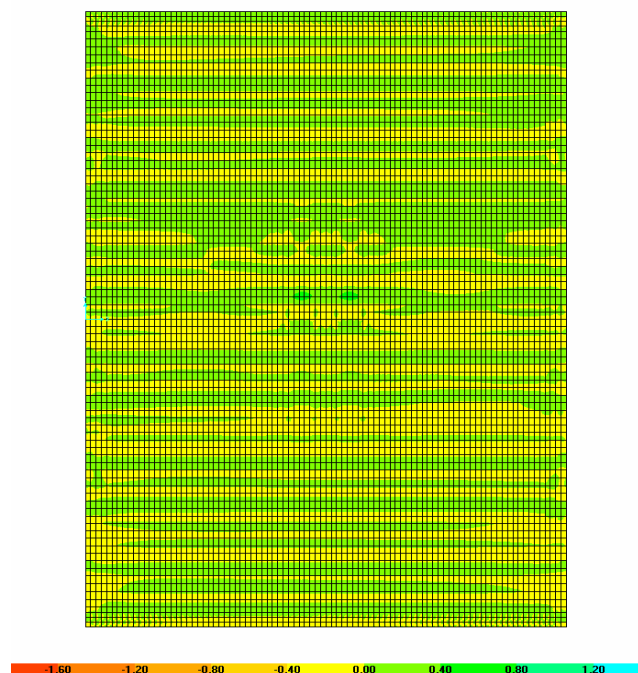
Na slikah spodaj so prikazani diagrami napetosti zgornje skorje sendvič plošče v najbolj obremenjenih plasteh, ki imajo najmanjši dejanski varnostni faktor.



**Slika 7.28** Na levi sliki je diagram napetosti  $\sigma_{11}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na desni pa  $\sigma_{22}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na zgornji strani prve plasti.

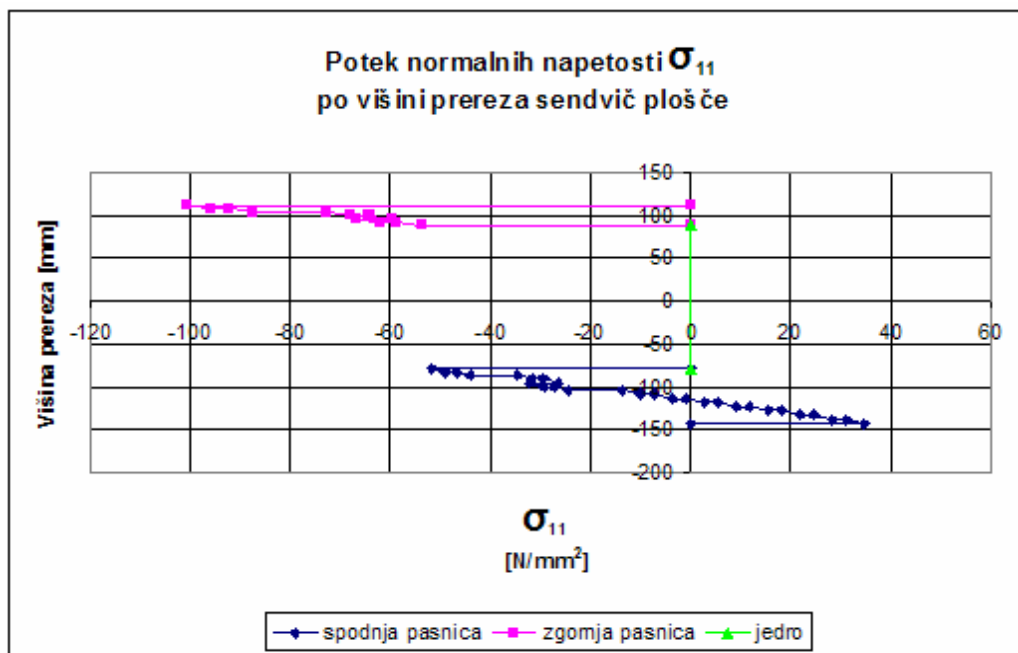


**Slika 7.29** Na desni strani je diagram napetosti  $\sigma_{12}$  [kN/mm<sup>2</sup>] v drugi plasti na vrhu, na desni pa imamo prikazan potek napetosti  $\sigma_{13}$  [kN/mm<sup>2</sup>] v peti plasti na vrhu.

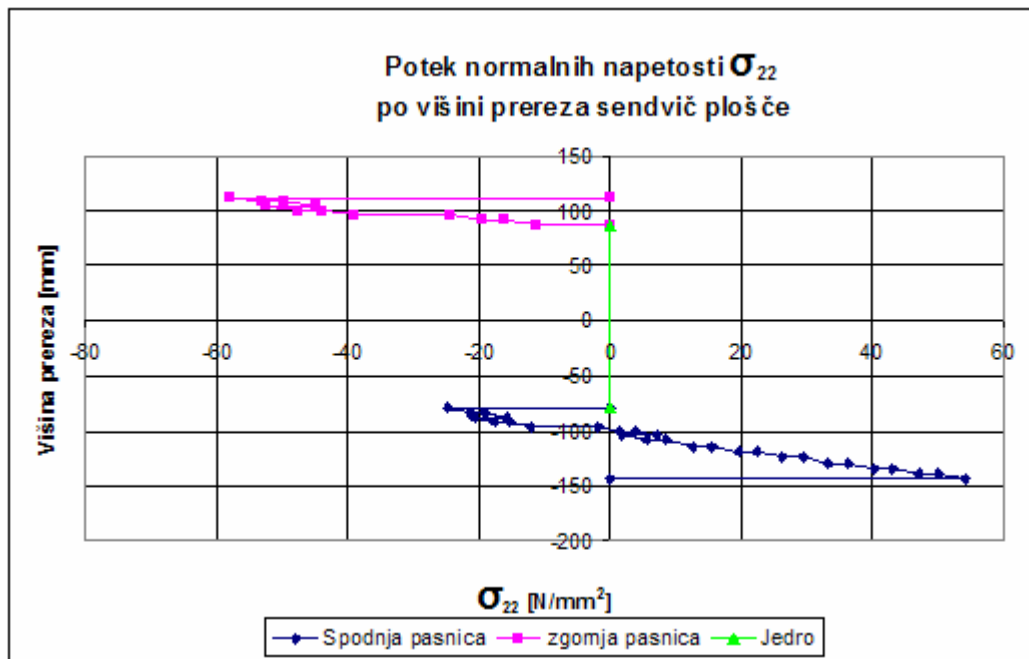


Slika 7.30 Diagram napetosti  $\sigma_{23}$  [kN/mm<sup>2</sup>] na zgornji strani prve plasti.

Na sledečih dveh diagramih sta prikazana poteka normalnih napetosti  $\sigma_{11}$  [kN/mm<sup>2</sup>] in  $\sigma_{22}$  [kN/mm<sup>2</sup>] za celotno sendvič ploščo na mestu največjih obremenitev zgornje skorje sendviča.



Slika 7.31 Potek normalnih napetosti  $\sigma_{11}$  [kN/mm<sup>2</sup>] po celotnem prerezu sendvič plošče.



Slika 7.32 Potek normalnih napetosti  $\sigma_{22}$  [kN/mm<sup>2</sup>] po celotnem prerezu sendvič plošče.

Z zadnjih dveh diagramov je razvidno, da je zgornja skorja sendvič plošče v celoti obremenjena tlačno v najbolj obremenjenih delih. Tudi spodnja skorja je tlačno obremenjena, nategi pa se pojavijo v zgornji pasnici nosilca spojenega s sendvič ploščo. Opazimo lahko tudi zelo majhne napetosti v jedru, ki je posledica majhnega modula elastičnosti.

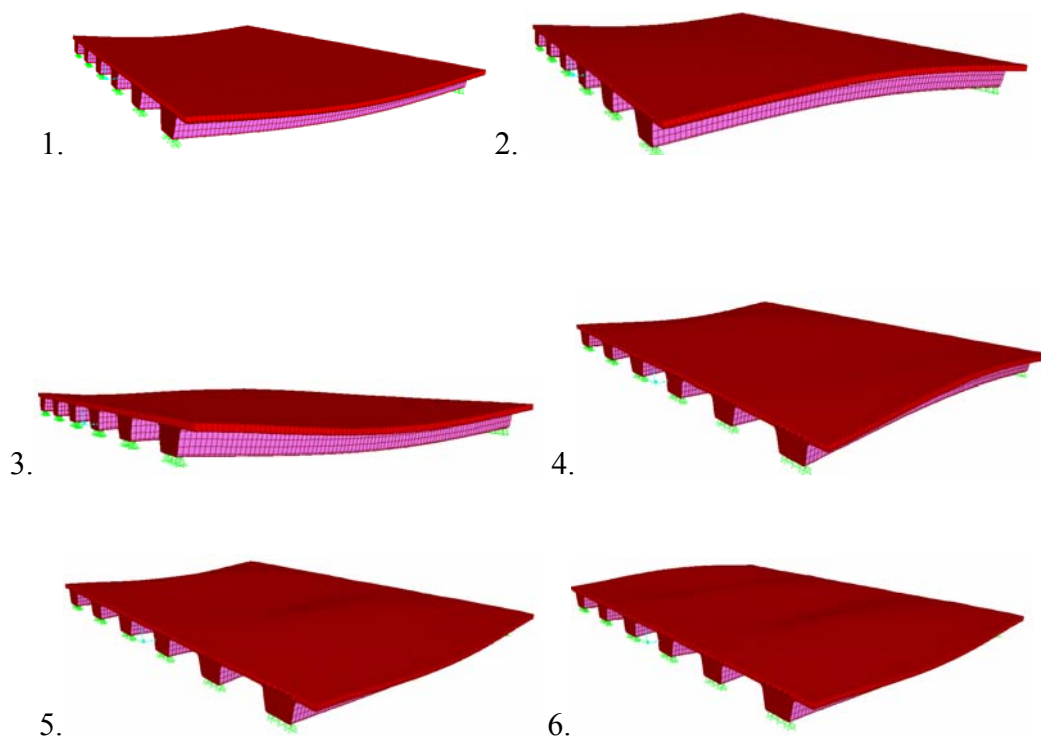
Kontrola medplastnih strižnih napetosti je izvedena podobno kot pri prejšnjih dveh primerih. Maksimalna dejanska strižna napetost znaša  $\sigma_{13} = 0.26\text{MPa}$ , ki pa je manjša od nosilnosti  $\tau_{13} = 20.55\text{MPa}$ .

Dinamične karakteristike konstrukcije so sledeče:

Preglednica 7.21 Osnovne dinamične karakteristike za prvih nekaj nihajnih oblik.

| Nihajna oblika | Nihajni čas [s] | Lastna frekvenca nihanja [Hz] |
|----------------|-----------------|-------------------------------|
| 1              | 0,063           | 15,90                         |
| 2              | 0,058           | 17,35                         |
| 3              | 0,048           | 20,69                         |
| 4              | 0,039           | 25,76                         |
| 5              | 0,031           | 32,52                         |
| 6              | 0,025           | 40,65                         |

Na slikah spodaj je prikazanih nekaj prvih nihajnih oblik konstrukcije.



**Slika 7.33** Prvih šest nihajnih oblik.

Glede na vrednosti, ki so v tabeli, konstrukcija ustreza dinamičnim kriterijem, saj se frekvenčno območje lastnega nihanja konstrukcije nahaja visoko nad vzbujajočo dinamično (prometno) obtežbo.

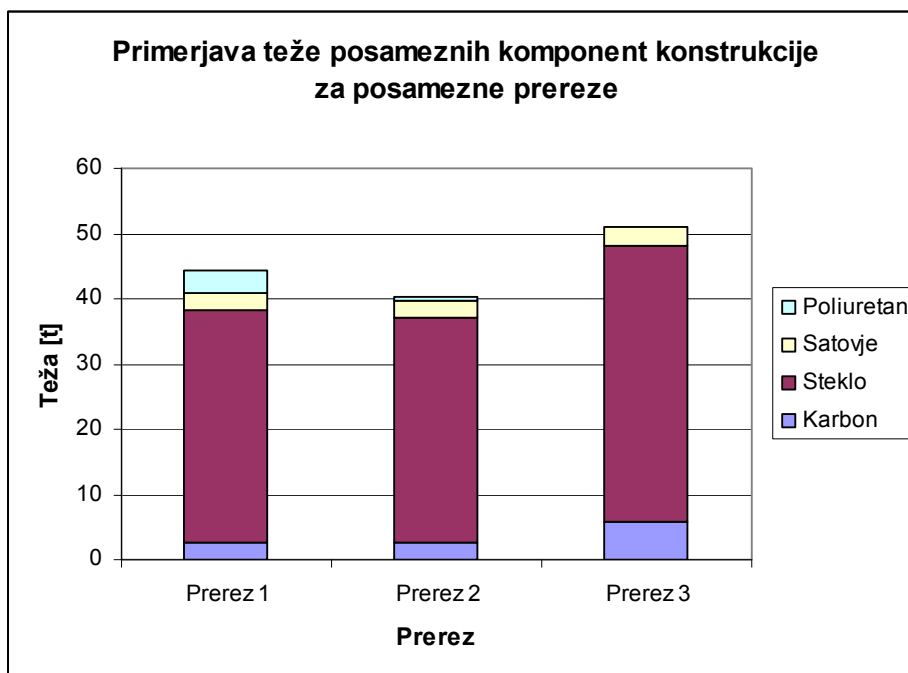
V splošnem lahko iz zgornjih tabel sklepamo, da so varnostni faktorji nosilnosti v večini primerov veliko večji kot pa je predpisani varnostni faktor  $\gamma_m = 11.5$ . To nas pripelje do ugotovitve, da je za dimenzioniranje kompozitnih konstrukcij merodajen kriterij mejnega stanja uporabnosti.

#### **7.4.4 Primerjava analiz posameznih nosilcev**

Iz analize obravnavanih prereзов je moč ugotoviti, da imajo različni tipi prereзов med sabo dokaj podobne dinamične karakteristike in nivoje napetosti s tem, ko enkrat zadostimo pogoju

mejnega stanja uporabnosti. Za vse prereze je skupno, da je mejno stanje uporabnosti oz. pomiki kritičen parameter za dimenzioniranje obravnavane konstrukcije. To pa se sklada tudi s teorijo kompozitnih laminatov, kjer je dokazano, da zaradi sorazmeroma majhnega strižnega modula ( $G \approx \frac{E}{10}$ ) strižne napetosti veliko doprinesejo h končnemu pomiku konstrukcije. Kot dodaten faktor večjih pomikov v primerjavi s konvencionalnimi gradivi (beton, jeklo), pa je modul elastičnosti  $E$  sam, saj je veliko nižji pri kompozitnih materialih.

Izbira prečnega prereza zavisi predvsem od končne cene konstrukcije, ki pa je odvisna od teže porabljenega materiala in stroškov proizvodnje. Na diagramu spodaj je prikazana poraba različnih vrst kompozitov za posamezne prereze. To nam predstavlja delno osnovo za izbiro prereza. V izbiri prereza smo upoštevali tudi zahtevnost in s tem posledično čas izdelave.



**Slika 7.34** Primerjava količine porabe posameznega kompozita za vse tri tipe prerezov.

V sledečem diagramu smo upoštevali povprečne cene materiala, ki smo jih dobili od različnih proizvajalcev. Cene za posamezno vrsto materiala so podane v naslednji tabeli.



**Preglednica 7.22** *Cenik povzet po različnih virih.*

| Material                  | Cena [€/kg] |
|---------------------------|-------------|
| Steklena vlakna           | 0,44        |
| Karbonska vlakna          | 5,1         |
| Epoksidna matrica         | 5,1         |
| Poliuretanska pena        | 14          |
| Satovje iz kevlar papirja | 415         |



**Slika 7.35** *Primerjava stroškov za porabljeni material vseh treh tipov prerezov.*

Iz zgornjih dveh diagramov lahko sklepamo, da imamo največjo porabo materiala pri tretjem tipu prereza. Povečanje mase gre predvsem na račun nekoliko širše spodnje karbonske pasnice pri tretjem prerezu. Posledično je tudi končna cena porabljenega materiala takšnega prereza nekoliko višja. Opazimo lahko tudi, da je prispevek poliuretanskega jedra h končni ceni pri prvem prerezu sorazmeroma velik, zaradi česar smo ga izločili iz nadaljne obravnave. Za vse prereze je skupno, da imajo največjo porabo s steklenimi vlakni ojačanega kompozita. To kaže predvsem na ekonomično porabo ojačitvenih vlaken, saj so karbonska veliko dražja od steklenih. Na zadnjem diagramu v kalkulaciji cene ni vštet strošek dela in porabljenega časa, kar predstavlja zelo velik delež stroška celotne konstrukcije. Izdelava prereza 2 je zelo



zahtevna in časovno potratna, zaradi ročne izdelave stojin in ravno to je izločitveni kriterij za ta prerez. Kot najugodnejši prerez smo kljub nekoliko višjim stroškom materiala torej izbrali tretji prerez, predvsem zaradi enostavnosti montaže in izdelave samih komponent. Ta prerez smo v nadaljevanju optimizirali še glede na višino.

### **7.5 Optimizacija izbranega prereza**

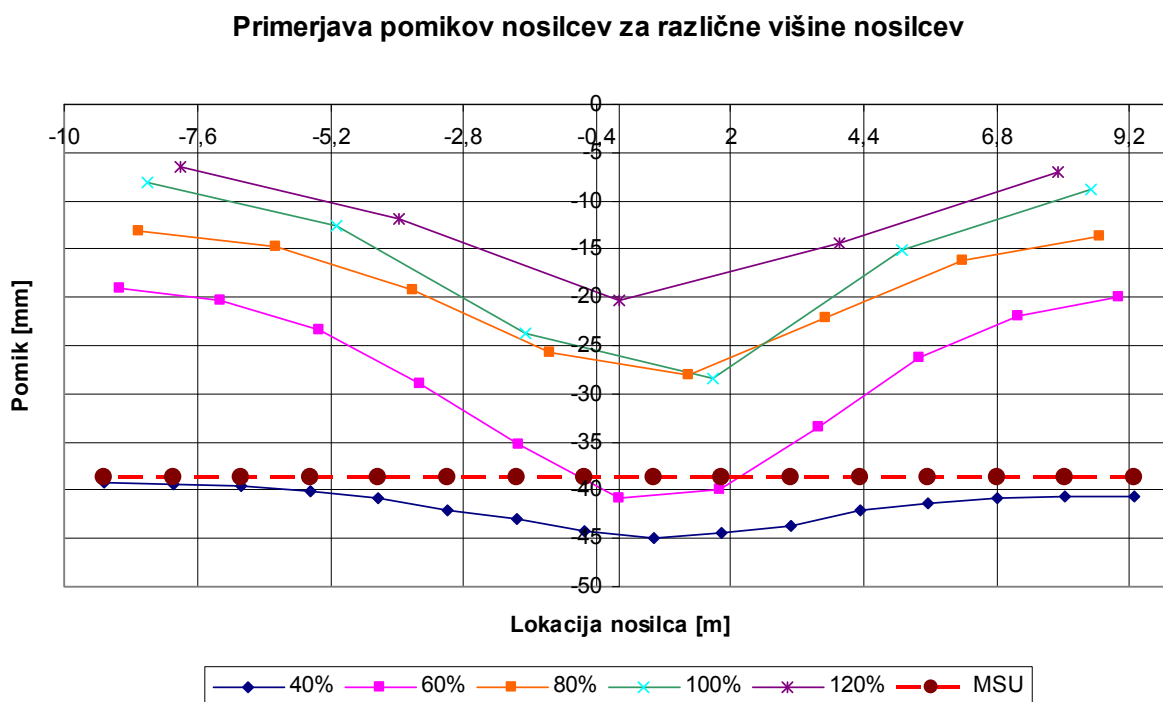
Zaradi pogojev v prejšnem zaključku, smo prerez 3 izbrali za nadaljno obravnavo. Za parameter optimizacije smo si izbrali spreminjanje višine prereza, vse ostale dimenzije, orientacije in debeline laminatov pa smo zadržali. Model, ki smo ga že obravnavali v prejšnem poglavju predstavlja izhodiščno varianto. To pomeni da 750mm visok nosilec in 200mm debela krovna sendvič plošča predstavljata 100% višino prereza, glede na ostale variante. Pri ostalih variantah smo dimenzije krovne plošče zadržali, spreminjali pa smo le dimenzije nosilca in sicer v razmerju 40%, 60%, 80% in 120% osnovne dimenzije prereza. S spreminjanjem dimenzij nosilca se je spremenilo tudi število le teh. Tako smo dobili npr. pri 40% nosilcu več nosilcev kot pa pri osnovni 100% varianti.

V tabeli spodaj so zbrane kontrolirane veličine glede na višino nosilca. V tabeli primerjamo višino in število nosilcev, pomik na sredini razpona najbolj obremenjenega nosilca, maso in ceno porabljenega materiala ter dinamične karakteristike. Mase v tabeli so podane za vsako vrsto kompozita posebej. Podana je še celotna masa konstrukcije. Skupna cena konstrukcije je doblejena na osnovi, v prejšnem poglavju prikazanega, povprečnega cenika posameznih komponent. Dinamične karakteristike so prikazane za prvo nihajno obliko.

**Preglednica 7.23** Primerjava kontroliranih karakteristik (pomik, masa, cena, dinamika) za različne višine prereza.

| Višina nosilca |      | Število nosilcev | Razmak med nosilci [mm] | Pomik [mm] | Masa [t] |        |               |              |                         | Dinamične karakteristike |        |
|----------------|------|------------------|-------------------------|------------|----------|--------|---------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| % višine       | [mm] |                  |                         |            | Steklo   | Karbon | Nomex satovje | Celotna masa | Skupna cena [*1.2mio €] | T [s]                    | f [Hz] |
| 40             | 300  | 16               | 1237,5                  | -44,99     | 42,08    | 6,29   | 2,67          | 51,04        | 1,0483                  | 0,113                    | 8,82   |
| 60             | 450  | 11               | 1800                    | -40,78     | 40,56    | 6,49   | 2,67          | 49,72        | 1,0456                  | 0,090                    | 11,07  |
| 80             | 600  | 8                | 2475                    | -28,1      | 42,08    | 6,29   | 2,67          | 51,04        | 1,0483                  | 0,080                    | 12,57  |
| 100            | 750  | 6                | 3400                    | -28,5      | 42,32    | 5,90   | 2,67          | 50,89        | 1,0472                  | 0,063                    | 15,90  |
| 120            | 900  | 5                | 3960                    | -20,37     | 42,01    | 5,90   | 2,67          | 50,58        | 1,0464                  | 0,053                    | 18,89  |

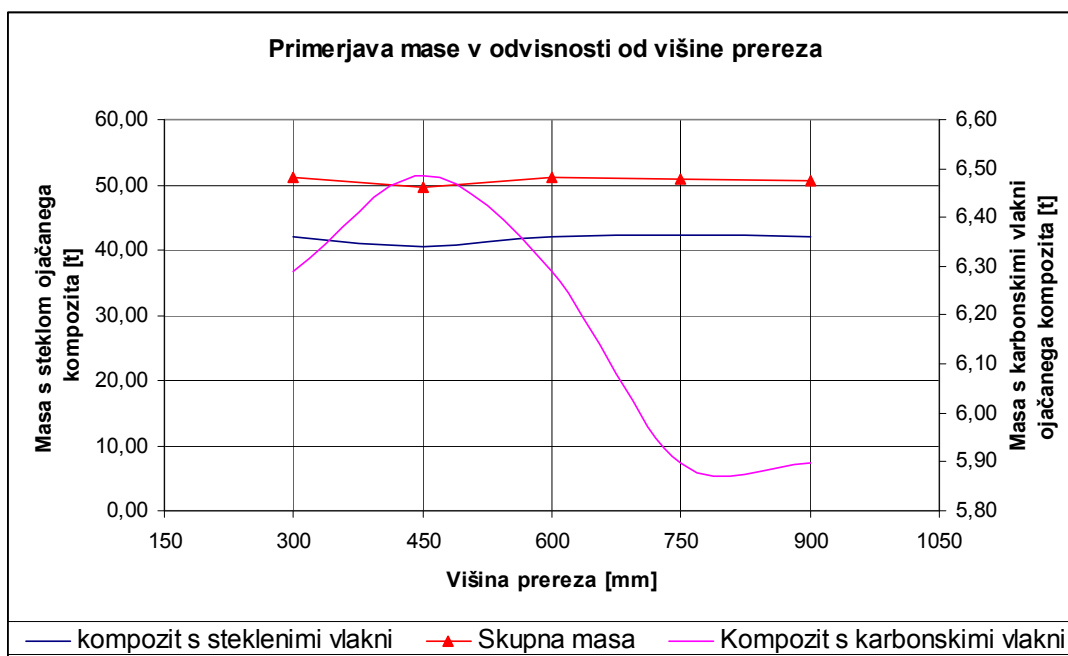
Na osnovi te tabele smo tvorili spodnje grafe, ki prikazujejo odnose med kontroliranimi količinami. Najprej je prikazan graf pomikov na sredini razspona po prečnem prerezu celotne mostne konstrukcije za zgoraj omenjene variacije višine prereza.



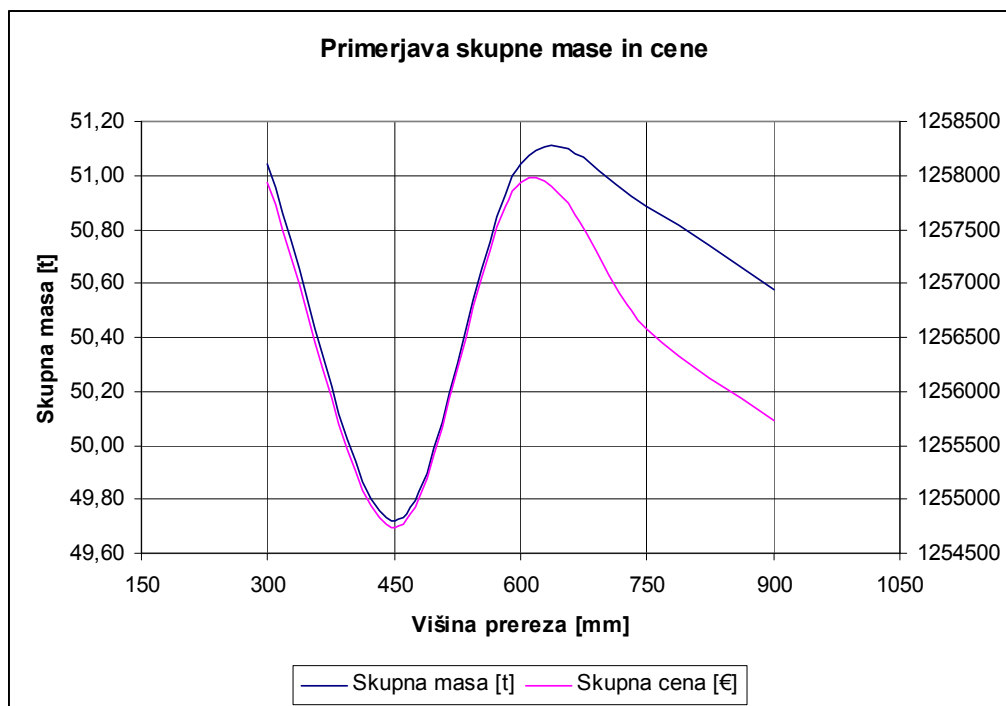
**Slika 7.36** Primerjava pomikov prečnega prereza za različne višine prerezov.

Z zgornjega diagrama lahko opazimo, da prereza višine 450mm in 300mm ne zadoščata kriteriju MSU in jih je zato potrebno korigirati s spremembami debeline in sestava laminatov. Ostale višine prerezov zadoščajo MSU in lahko med njimi tudi izbiramo prerez za končno uporabo.

Sledeči diagram prikazuje variranje mase posameznih kompozitov celotne konstrukcije in celotne mase konstrukcije za predpostavljene višine prerezov. S te primerjave je razvidno, da se z višino prereza zmanjšuje potreba po kompozitu s karbonskimi ojačitvami. Potreba po s steklenimi vlakni ojačanem kompozitu zelo malo varira glede na spremembo višine prereza, saj velik delež tega kompozita predstavljajo skorji sendvič krovne plošče, ki se ne spreminjajo. Poraba stekleno ojačanega kompozita je najmanjša pri višini prereza 450mm. V nadaljevanju je prikazana še primerjava celotne mase in cene porabljenega materiala. Opazimo lahko, da je prerez višine prereza 450mm z obeh vidikov (stroškovni, poraba materiala) najugodnejši, vendar pa ne ustreza mejnemu stanju uporabnosti. Za zagotovitev MSU je potrebno spremeniti sestav laminatov ali orientacijo vlaken, povečati debelino posameznih plasti, povečati procent armiranja ali pa izbrati boljši material. Pravkar naštetih ukrepi povečajo končno ceno in pridemo na podoben nivo cene kot pri višjih nosilcih.



**Slika 7.37** Primerjava mase za posamezne kompozite pri različnih višinah mostne konstrukcije.



**Slika 7.38** Primerjava skupne mase in cene nosilne konstrukcije.

S slednjega diagrama lahko tudi sklepamo, da je ob upoštevanju omejitve pomikov za podani sestav laminatov najugodnejša višina prereza 900mm. Pri tej višini pa se izpostavi problem lokalnega izbočenja relativno visoke stojine. Lokalnega izbočenja nismo upoštevali nikjer v tem delu, saj presega okvirje diplomske naloge, kjer smo se omejili na preliminarno dimenzioniranje in optimizacijo kompozitnih laminatnih konstrukcij.

## 8 ZAKLJUČEK

V bližnji prihodnosti je pričakovati širšo uporabo armiranih plastik v gradbenih konstrukcijah. Njihova prednost se kaže predvsem v majhni masi, korozijski odpornosti, preprostejši in hitrejši gradnji ter dobri odpornosti na utrujanje. Po svetu je moč opaziti že dokaj zajetno število mostov iz tovrstnega materiala, ki kažejo dobre rezultate tudi na daljši rok uporabe.

Glede na visoko razmerje med togostjo in maso armiranih plastik se zdi samoumevno, da se bodo dobro obnašali pri konstrukcijah večjega razpona, kakršne mostovi tudi so.

Na začetku diplome je obravnavan detajlnejši pregled in opis sestavnih komponent (vlakna, matrice) in njihovih produktov (kompozitov). Iz navedenih mehanskih karakteristik armiranih plastik je razvidno, da imajo relativno visoko nosilnost glede na konvencionalne matriale, nekoliko nižji pa so moduli elastičnosti. Na večjo podajnost konstrukcij iz tovrstnega materiala vpliva predvsem nizek strižni modul laminatnih armiranih plastik. Kot že omenjeno, je po svetu postavljeno sorazmerno veliko tovrstnih mostov, zato smo naredili tudi kratek pregled in analizo nekaj teh mostov. V vseh primerih se izkaže, da gre predvsem za krajše mostove, razpona do 20m. Običajna tehnologija teh mostov so pultrudirani glavni vzdolžni nosilci, na katere so pritrjene sendvič plošče ali pa manjši pultrudirani nosilci, postavljeni v prečni smeri glede na potek glavnih nosilcev. Zasedili smo tudi nekaj projektov v izdelavi, kot je npr. most za pešce čez reko Temzo v Londonu, katerega predvidena dolžina je 300m. Predviden potek izdelave je v treh segmentih, ki se bodo nato spajali na mestu samem. V vseh primerih, ki smo jih zaledili pa se mostovi iz tovrstnih materialov izkažejo za zelo učinkovite in trajne.

V primeru naše mostne nosilne konstrukcije, ki je zanosovana kot tankostenski nosilec, na katerega je pritrjena sendvič plošča, se v primeru prereza skozi takšno konstrukcijo izkaže, da imamo opravka z laminatnimi strukturami. Za razumevanje takšnih konstrukcij so na kratko predstavljene teoretične osnove obnašanja tankostenskih laminatnih kompozitnih konstrukcij. V nadaljevanju je izvedena računska analiza obnašanja nosilne mostne konstrukcije s programom SAP2000, ki nam omogoča tudi analizo napetosti po posameznih plasteh. Konstrukcijo smo v večih iteracijah preliminarno dimenzionirali za tri različne tipe prerezov. Kontrolo nosilnosti smo izvedli po principu nosilnosti posameznih plasti («First ply failure»)

za vse laminate konstrukcije. Izkazuje se, da so nivoji napetosti precej manjši kot pa je nosilnost posameznih lamel, kar je izraženo z velikostjo varnostnih faktorjev. Varnostni faktorji zadoščajo tudi predpisanemu v priročniku za dimenzioniranje konstrukcij iz armiranih plastik. Kot kritični faktor se je torej izkazalo mejno stanje uporabnosti, kar se tudi sklada s teorijo tankostenskih laminatnih konstrukcij. Na osnovi te analize smo se kasneje tudi odločili za najugodnejši tip prereza. Kriterij izbire je bila porabljena masa posameznih komponent in njihova cena ter cena končnega izdelka.

Na osnovi izbranega prereza smo izvedli še optimizacijo le tega glede na njegovo višino. Kontrolirali smo spremembo mase, pomikov, dinamičnih karakteristik in končne cene celotne konstrukcije za pet različnih višin prerezov nosilcev ( $h=300\text{mm}$ ,  $450\text{mm}$ ,  $600\text{mm}$ ,  $750\text{mm}$ ,  $900\text{mm}$ ), pri čemer so dimenzije sendvič krovne plošče konstantno enake. Ugotovili smo, da so stroški materiala pri  $900\text{mm}$  visokem nosilcu najmanjši ob pogoju, da je mejno stanje uporabnosti še vedno zadoščeno.

Splošno lahko sklepamo na ekstremno zmanjšanje mase konstrukcije, narejene iz armiranih plastik, glede na konstrukcije iz običajnih materialov. Za primerjavo lahko vidimo, da bi nosilna konstrukcija iz armiranega betona za isto konstrukcijo znašala približno  $420\text{t}$ , medtem pa po naših izračunih konstrukcija iz armiranih plastik znaša približno  $50\text{t}$ . Torej so tovrstne konstrukcije zelo primerne za slabo nosilna tla in za primere, kjer je potrebno hitro posredovanje brez težke gradbene mehanizacije (nesreče, izjemne razmere, začasne konstrukcije,...). Za širšo uporabo bo potrebno še večje število raziskav, ki bodo omogočile določeno stopnjo standardizacije in razvoj pripomočkov, modelov za napoved in dimenzioniranje tovrstnih konstrukcij.

## 9 VIRI

Ayman S. M., Composites in construction. Fullerton, California, Division of Engineering, California State University.

Barbero, E. J., 1999. Introduction to composite materials design. Philadelphia, Taylor & Francis.

BRE and Trend 2000 Ltd, Polymer Composites as Construction Materials, Application Summary Sheet 4,  
[www.polymercomposites.co.uk](http://www.polymercomposites.co.uk)

Camamta G., Benson Shing P., 2004. Evaluation of GFRP deck panel for the O'Fallon park bridge. Boulder, University of Colorado, Department of Civil, Environmental & Architectural Engineering.

Canning L., Hodgson J., Jarman A., Karuna R., Luke S., The Analysis, Design and Optimisation of an Advanced Composite Bridge Deck, Surrey, Mouchel Consulting Limited.

Chawla, K., 1998. COMPOSITE MATERIALS, Science and Engineering. Birmingham, The University of Alabama at Birmingham.

Clark, J.,L., 1996. Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook. London, Sir William Halcrow and Partners Ltd.

Davalos, Julio F., Barbero, J., Pizhong Q., 2002. Step-by-Step Engineering Design Equations for Fiber-reinforced Plastic Beams for Transportation Structures. Final report. West Virginia, West Virginia University.

FiReCo AS, Bascule FRP Composite Footbridge, Norway.  
<http://www.fireco.no/references/Gangbru%20Vesterelven.pdf>

Kendall D., Fibre reinforced polymer (FRP) composite bridges, Southampton, White Young Green Consulting Ltd.

Lawrence C. Bank, 2006. Composites for CONSTRUCTION, Structural Design with FRP Materials. Wisconsin–Madison, John Wiley & Sons.

Pinho, Silvestre T., Davila, Carlos G., Camanho, Pedro P., Iannucci, Lorenzo, Robinson, Paul, 2005. Failure Models and Criteria for FRP Under In-Plane or Three-Dimensional Stress States Including Shear Non-Linearity. Hampton, NASA Langley Research Center.  
<http://ntrs.nasa.gov>.

Pejovnik, S., Študijska skripta kemije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

PIPEX Structural composites, St. Austell Footbridge.

[http://www.netcomposites.com/downloads/Pipex\\_StAustellFootbridge.pdf](http://www.netcomposites.com/downloads/Pipex_StAustellFootbridge.pdf)

Poljanšek, M., 2005. Eksperimentalno podprta analiza odziva okvirne konstrukcije s sendvičastimi ploščami na vodoravno in navpično obtežbo. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Poljanšek, M., Eksperimentalno podprta analiza obnašanja sandwich plošč. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Springolo, M., New fibre-reinforced polymer box beam: investigation of static behaviour. A dissertation submitted for the award of doctor of philosophy. Southern Queensland, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying.



Stongwell, Bridge components brochure.

<http://www.strongwell.com/PDFfiles/Bridge%20Components/Bridge%20Components%20Brochure.pdf>

Technica snc.

<http://www.technica.net/NF/NF2/efibreinorganiche.htm> (11.09.2000)

Thorning, H., 2003. The Fiberline Design Manual,. Kolding, Denmark, Fiberline Composites A/S

Yang, Y.-B., Lin, C., W., Yau, J., D., 2003. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. Taiwan, National Taiwan University, Department of Civil Engineering.

ASCE, Structural Plastics Design Manual, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practise 63. Reston, American Society of Civil Engineers.

CEN, Reinforced Plastic Composites: Specifications for Pultruded Profiles, Parts 1-3, EN 13706. Brussels, Comite Europeen de Normalisation. Belgium. 2002.