

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 študij gradbeništva,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Edo Velkavrh**

**Preliminarna preiskava ustreznosti kompozitov  
iz naravnih vlaken za aplikacijo v gradbenih  
konstrukcijah**

Diplomska naloga št.: 3135

**Mentor:**  
prof. dr. Roko Žarnić

**Somentor:**  
David Antolinc

Ljubljana, 2010

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**



## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **EDO VELKAVRH** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»PRELIMINARNA PREISKAVA USTREZNOSTI S TKANINAMI IZ NARAVNIH  
VLAKEN ARMIRANIH KOMPOZITOV ZA OJAČEVANJE GRADBENIH  
KONSTRUKCIJ«.**

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

Ljubljana, 28. 9. 2010

---



## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.01:691:692(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Edo Velkavrh</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Roko Žarnić, udig.</b>
<b>Somentor:</b>	<b>David Antolinc, udig</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Preliminarna preiskava ustreznosti s tkaninami iz naravnih vlaken armiranih kompozitov za ojačevanje gradbenih konstrukcij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>124 str., 30 pregl., 83 sl., 51 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>ojačevanje, kompoziti, biokompoziti, naravna vlakna, umetna vlakna, polimeri, tkanine iz naravnih vlaken, armirane plastike, lan</b>

### **Izvodček**

Diplomsko delo predstavlja študijo možnosti nadomestitve umetnih vlaken za armiranje polimernih kompozitov pri statičnem ojačevanju gradbenih konstrukcij z okolju prijaznimi naravnimi vlakni. V sklopu naloge je zajet pregled vlaken in njihovih mehanskih lastnosti, primerjava naravnih vlaken z umetnimi ter analiza tržne dostopnosti ustreznih tkanin iz naravnih vlaken. Izboru osnovnih materialov je sledila izdelava 6 kompozitnih laminatov, armiranih z laneno ter stekleno tkanino. Poleg tkanine iz naravnih vlaken se je preizkušala tudi ustreznost dveh specialnih gradbenih epoksi smol, tako da sta bili tkanini obeh vrst prepojeni z eno in drugo matrico. Po pripravi kompozitnih laminatov je bila izvedena serija natezних preiskav za določitev mehanskih karakteristik. Preizkušanci so bili razdeljeni v skupine glede na vrsto tkanine in usmerjenost glavne nosilne osi ter uporabljeno matrico. Skupini preizkušancev, ojačenih s steklenimi vlakni, sta služili za kontrolo rezultatov in vrednotenje vpliva različnih matric. Preiskava je pokazala, da so mehanske lastnosti kompozitov, armiranih z laneno tkanino, nižje od lastnosti kompozitov, ojačenih s stekleno tkanino. Za podrobnejši vpogled v mehanizem porušitev in pravilno interpretacijo rezultatov je bila natančno analizirana struktura lanenih vlaken, preizkušanci pa so bili pregledani tudi pod mikroskopom. Teoretični podlagi in boljšemu razumevanju kompozitnih konstrukcij pa služi tudi na kratko predstavljena klasična teorija laminatov.



## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	<b>624.01:691:692(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Edo Velkavrh</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Prof. Ph.D., Roko Žarnić, CE</b>
<b>Co-Supervisor:</b>	<b>David Antolinc</b>
<b>Title:</b>	<b>Preliminary investigation of the suitability of composite materials reinforced with natural fibre fabrics as reinforcement for building structures</b>
<b>Notes:</b>	<b>124 p., 30 tab., 83 fig., 51 eq.</b>
<b>Key words:</b>	<b>reinforcement, composites, biocomposites, natural fibers, synthetic fibers, polymers, natural fiber fabrics, reinforced plastic, flax</b>

### **Abstract**

Presented work focuses on a study of the possibility of substituting synthetic fibers as a reinforcement of polymer composites in case of static reinforcement of building structures, with environmentally friendly, natural fibers. First section introduces various types of fibers and their mechanical properties, a comparison of natural with man-made fibers and analysis of the commercial availability of appropriate natural fiber fabrics. Selection of basic materials is followed by production of 6 composite laminates, reinforced with flax and glass fabrics. In addition to natural fiber fabrics, a comparison of suitability of two special sanitation epoxy resins has also been made, so that both types of fabrics were impregnated with both matrices. After the preparation of composite laminates, a series of tensile tests for the determination of mechanical properties has been carried out. Test specimens were divided into groups according to fabric type, main load-bearing axle orientation and type of used matrix. Groups of specimens reinforced with glass fibers were also used for valuation of the results and the impact of different matrices. The investigation showed that mechanical properties of composites, reinforced with flax fabric, were lower than those achieved with glass composite. For a more detailed insight into the mechanism of failure and proper interpretation of the results, a close structure analysis of flax fiber has been made in addition to examination of specimens under the microscope. For a better understanding of composite structures and theoretical basis, a brief introduction to classical lamination theory has been made.





## **ZAHVALA**

Za nasvete in usmerjanje pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof. dr. Roku Žarniću in somentorju Davidu Antolincu. Zahvala gre tudi g. Franciju Čeponu in asist. Petri Štukovnik za pomoč in podporo pri izvajanju preiskav.

Posebno se zahvaljujem očetu in mami, ki sta mi omogočila študij brez drugih obveznosti, in dekletu Anji, ki me je vedno vzpodbujala.



## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Referenčni projekti, raziskave in uporaba naravnih kompozitov</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Cilj diplomske naloge</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PREGLED VSEBINE</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>PREGLED LITERATURE</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>PREGLED PRIMERNIH VLAKEN ZA ARMIRANJE KOMPOZITOV</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Uvod</b>	<b>12</b>
<b>4.2</b>	<b>Umetna vlakna</b>	<b>13</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Steklena vlakna</b>	<b>14</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Ogljikova vlakna</b>	<b>16</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Aramidna vlakna</b>	<b>19</b>
<b>4.3</b>	<b>Naravna vlakna</b>	<b>21</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Lanena vlakna</b>	<b>24</b>
<b>4.3.1.1</b>	<b>Proizvodnja lanenih vlaken</b>	<b>25</b>
<b>4.3.1.2</b>	<b>Postopek pridobivanja vlaken</b>	<b>26</b>
<b>4.3.1.3</b>	<b>Struktura lanenih vlaken</b>	<b>28</b>
<b>4.3.1.4</b>	<b>Kemična zgradba lanu</b>	<b>32</b>
<b>4.3.1.5</b>	<b>Primerjava lanenih vlaken z umetnimi vlakni</b>	<b>33</b>
<b>4.3.1.6</b>	<b>Zaključek</b>	<b>34</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Konopljina vlakna</b>	<b>34</b>
<b>4.3.2.1</b>	<b>Proizvodnja konopljinih vlaken</b>	<b>36</b>
<b>4.3.2.2</b>	<b>Postopek pridobivanja vlaken</b>	<b>37</b>
<b>4.3.2.3</b>	<b>Mehanske lastnosti</b>	<b>38</b>
<b>4.3.2.4</b>	<b>Zaključek</b>	<b>39</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Jutina vlakna</b>	<b>40</b>
<b>4.3.3.1</b>	<b>Mehanske lastnosti</b>	<b>40</b>
<b>4.3.3.2</b>	<b>Zaključek</b>	<b>41</b>

<b>4.3.4</b>	<b>Sisalova vlakna</b>	<b>41</b>
<b>4.3.4.1</b>	<b>Mehanske lastnosti</b>	<b>42</b>
<b>4.3.4.2</b>	<b>Zaključek</b>	<b>42</b>
<b>4.4</b>	<b>Primerjava mehanskih lastnosti naravnih in umetnih vlaken</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>PREGLED IN PRIMERJAVA UPORABLJENIH MATERIALOV</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Uvod</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Pridobivanje osnovnih materialov</b>	<b>48</b>
<b>5.3</b>	<b>Primerjava uporabljenih epoksi smol</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>RAČUNSKA ANALIZA KOMPOZITNIH MATERIALOV</b>	<b>54</b>
<b>6.1</b>	<b>Določitev materialnih karakteristik kompozita</b>	<b>54</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Račun mehanskih lastnosti preizkušanih kompozitov</b>	<b>56</b>
<b>6.2</b>	<b>Togost plastovitih kompozitov</b>	<b>58</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Analiza plasti</b>	<b>58</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Analiza laminata</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>OSNOVNE PREISKAVE LAMELNIH KOMPOZITOV</b>	<b>69</b>
<b>7.1</b>	<b>Preizkuševalni okvir</b>	<b>70</b>
<b>7.2</b>	<b>Merilna oprema</b>	<b>71</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Merilni lističi</b>	<b>71</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Merjenje pomika</b>	<b>71</b>
<b>7.3</b>	<b>Preizkušanci</b>	<b>72</b>
<b>7.4</b>	<b>Obdelava rezultatov</b>	<b>75</b>
<b>7.4.1</b>	<b>Račun napetosti</b>	<b>75</b>
<b>7.4.2</b>	<b>Račun deformacij</b>	<b>75</b>
<b>7.4.3</b>	<b>Modul elastičnosti</b>	<b>76</b>
<b>7.4.4</b>	<b>Poissonov količnik</b>	<b>76</b>
<b>7.4.5</b>	<b>Statistični parametri</b>	<b>77</b>
<b>7.5</b>	<b>Natezna preiskava</b>	<b>77</b>
<b>7.5.1</b>	<b>Priprava preizkušancev</b>	<b>77</b>
<b>7.5.1.1</b>	<b>Priprava kompozitnega laminata</b>	<b>78</b>

<b>7.5.1.2</b>	<b>Geometrija preizkušancev</b>	<b>80</b>
<b>7.5.1.3</b>	<b>Merska mesta</b>	<b>83</b>
<b>7.5.2</b>	<b>Postopek preiskave</b>	<b>85</b>
<b>7.5.2.1</b>	<b>Testna atmosfera</b>	<b>85</b>
<b>7.5.2.2</b>	<b>Dimenzije preizkušancev</b>	<b>85</b>
<b>7.5.2.3</b>	<b>Namestitev merilnih lističev</b>	<b>86</b>
<b>7.5.2.4</b>	<b>Vpenjanje</b>	<b>87</b>
<b>7.5.2.5</b>	<b>Hitrost preiskave</b>	<b>88</b>
<b>7.5.3</b>	<b>Rezultati natezne preiskave</b>	<b>88</b>
<b>7.5.3.1</b>	<b>Skupina LA-v</b>	<b>89</b>
<b>7.5.3.2</b>	<b>Skupina LA-p</b>	<b>91</b>
<b>7.5.3.3</b>	<b>Skupina LB-v</b>	<b>94</b>
<b>7.5.3.4</b>	<b>Skupina LB-p</b>	<b>96</b>
<b>7.5.3.5</b>	<b>Skupina SA</b>	<b>99</b>
<b>7.5.3.6</b>	<b>Skupina SB</b>	<b>101</b>
<b>7.5.4</b>	<b>Vrednotenje rezultatov in ugotovitve osnovnih preiskav</b>	<b>104</b>
<b>7.5.5</b>	<b>Analiza porušitev</b>	<b>110</b>
<b>8</b>	<b>PRIPRAVA LESENIH NOSILCEV ZA PREISKAVO OJAČITEV Z NARAVNIMI KOMPOZITI</b>	<b>113</b>
<b>8.1</b>	<b>Pridobivanje ustreznih lesenih nosilcev</b>	<b>113</b>
<b>8.2</b>	<b>Priprava in obdelava lesenih preizkušancev</b>	<b>114</b>
<b>8.3</b>	<b>Izvedba ojačitvene sanacije</b>	<b>117</b>
<b>8.4</b>	<b>Preiskava ojačenih lesenih nosilcev</b>	<b>117</b>
<b>9</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>118</b>
<b>9.1</b>	<b>Predlog nadaljnjih preiskav</b>	<b>119</b>
	<b>VIRI</b>	<b>121</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 4.1: Preglednica mehanskih lastnosti umetnih vlaken (povzeto po različnih virih)	20
Preglednica 4.2: Kemična sestava stebelnih vlaken lanu, jute in konoplje.....	32
Preglednica 4.3: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih in lanenih vlaken. ....	33
Preglednica 4.4: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih in konopljinih vlaken.....	39
Preglednica 4.5: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih in jutinih vlaken.....	41
Preglednica 4.6: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih vlaken in vlaken sisala.....	42
Preglednica 4.7: Preglednica mehanskih lastnosti naravnih in umetnih vlaken .....	45
Preglednica 5.1: Primerjava uporabljenih tkanin.....	52
Preglednica 5.2: Primerjava mehanskih lastnosti uporabljenih tkanin .....	52
Preglednica 5.3: Mehanske lastnosti uporabljenih smol.....	53
Preglednica 6.1: Mehanske lastnosti osnovnih materialov .....	56
Preglednica 6.2: Teoretično določene mehanske lastnosti preiskovanih kompozitov.....	57
Preglednica 6.3: Teoretično določene specifične mehanske lastnosti preiskovanih kompozitov	57
Preglednica 7.1: Prikaz različnih vrst kompozitov glede na uporabljeno polimerno matrico in ojačitveno tkanino .....	69
Preglednica 7.2: Osnovne mehanske lastnosti matric po navedbi proizvajalcev.....	72
Preglednica 7.3: Osnovne mehanske lastnosti tkanin po navedbi proizvajalcev .....	72
Preglednica 7.4: Preglednica kompozitov za osnovne preiskave .....	74
Preglednica 7.5: Utežni delež tkanine v kompozitu.....	74
Preglednica 7.6: Razlaga v standardu definiranih oznak in priporočene dimenzije za preizkušane tipa 3.....	82
Preglednica 7.7: Pregled števila merilnih lističev po skupinah preizkušancev.....	83
Preglednica 7.8: Pregled povprečnih dimenzij preizkušancev določenih skladno s standardom	86
Preglednica 7.9: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih .....	89
Preglednica 7.10: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih .....	92
Preglednica 7.11: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih .....	94
Preglednica 7.12: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih .....	97

Preglednica 7.13: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih .....	99
Preglednica 7.14: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih .....	102
Preglednica 7.15: Primerjava povprečnih rezultatov natezne preiskave posameznih skupin preizkušancev. Prikazane so specifične vrednosti nateznih trdnosti in elastičnih modulov. .	107
Preglednica 8.1: Geometrijske karakteristike nosilcev in ocena kakovosti (1 - najbolj primeren, 2 - primeren, 3 - manj primeren).....	115
Preglednica 8.2: Pregled izbranih nosilcev za preiskavo in njihove geometrijske karakteristike po pripravi površine.....	116



**KAZALO DIAGRAMOV**

Diagram 7.1: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LA-v .....	90
Diagram 7.2: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LA-v .....	90
Diagram 7.3: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LA-v .....	91
Diagram 7.4: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LA-p .....	92
Diagram 7.5: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LA-p .....	93
Diagram 7.6: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LA-p .....	93
Diagram 7.7: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LB-v .....	95
Diagram 7.8: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LB-v .....	95
Diagram 7.9: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LB-v .....	96
Diagram 7.10: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LB-p .....	97
Diagram 7.11: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LB-p .....	98
Diagram 7.12: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LB-p .....	98
Diagram 7.13: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini SA.....	100
Diagram 7.14: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini SA.....	100
Diagram 7.15: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini SA.....	101
Diagram 7.16: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini SB.....	102
Diagram 7.17: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini SB.....	103
Diagram 7.18: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini SB.....	103
Diagram 7.19: Primerjava prirastka specifičnih napetosti in vzdolžnih deformacij posameznih skupin preizkušancev .....	108
Diagram 7.20: Primerjava prirastka specifičnih napetosti posameznih skupin preizkušancev glede na pomik vpenjalnih čeljusti.....	108
Diagram 7.21: Primerjava prirastka specifičnih napetosti in prečnih deformacij posameznih skupin preizkušancev .....	109

## KAZALO SLIK

Slika 1.1: Lotus Eco Elise – z uporabo naravnih kompozitov je bila zmanjšana teža že tako izredno lahkega modela Elise S za še dodatnih 32 kg .....	1
Slika 1.2 in 1.3: Levo: več kot 50 sestavnih komponent v avtomobilih znamke Mercedes je narejenih iz različnih naravnih vlaken. Desno: primer cevi, narejene na podlagi preprega iz lanenih vlaken.....	3
Slika 1.4 in 1.5: Levo: deski za jadranje na deski, narejeni s kombinacijo lanenih in karbonskih tkanin. Desno: primer izvedbe trupa jadrnice z uporabo lanene tkanine.....	4
Slika 1.6: Tlačna porušitev zgornje pasnice I-nosilca pri upogibni obremenitvi kot posledica ojačitve spodnje pasnice s tkanino iz naravnih vlaken (Chui H. Y, et al. 2008).....	5
Slika 1.7: Ostrešje lovskega dvorca gradu Kieselstein iz 19. stoletja .....	6
Slika 4.1: Klasifikacija umetnih vlaken.....	14
Slika 4.2 in 4.3: Levo: steklena vlakna, desno: tkanina iz steklenih vlaken. ....	15
Slika 4.4 in 4.5: Levo: ogljikova vlakna, desno: tkanina iz ogljikovih vlaken .....	16
Slika 4.6: Kristalna struktura grafita.....	16
Slika 4.7: Struktura ogljikovega vlakna .....	17
Slika 4.8 in 4.9: Levo: aramidna vlakna. Desno: tkanina iz aramidnih vlaken (Kevlar – DuPont).....	19
Slika 4.10: Osnovni gradnik aramidnih vlaken .....	19
Slika 4.11 in 4.12: Levo: ploskovna razporeditev aramidnih molekul s šibkimi vodikovimi in močnimi kovalentnimi vezmi. Desno: Tri-dimenzionalna struktura aramidnega vlakna z radialno nagubanimi ploskvami. ....	20
Slika 4.13: Klasifikacija naravnih vlaken glede na izvor .....	21
Slika 4.14: Klasifikacija rastlinskih vlaken .....	22
Slika 4.15: Tkanine iz naravnih vlaken (od leve proti desni): lan, konoplja, ramija in juta.....	23
Slika 4.16 in 4.17: Lan ( <i>Linum Usitatissimum</i> ).....	25
Slika 4.18: Godenje lanu v rosi .....	26
Slika 4.19: Shematični prikaz sestave lanenega vlakna od stebela do mikrofibrile.....	28
Slika 4.20: Lanena rastlina .....	29
Slika 4.21: Shematski prikaz prečnega prereza lanenega stebela. ....	29
Slika 4.22 in 4.23: Tehnično vlakno: levo vzdolžni pogled, desno prečni prerez.....	30

Slika 4.24: Shematski prikaz slojev celuloze v elementarnem vlaknu .....	31
Slika 4.25: Laneno vlakno pod različnimi povečavami. Na sliki s 1250-kratno povečavo se dobro vidi prečni pregib, ki je posledica mehanske obdelave in predstavlja šibki člen lanenega vlakna .....	32
Slika 4.26 in 4.27: Industrijska konoplja ( <i>Cannabis sativa</i> ) .....	35
Slika 4.28: Žetev konoplje .....	37
Slika 4.29: Konopljino vlakno pod 300, 600, 1250, 2500 in 5000-kratno povečavo .....	38
Slika 4.30: Jutino vlakno pod 300, 600, 1250, 2500 in 5000-kratno povečavo .....	40
Slika 4.31: Sisalovo vlakno pod 300, 600, 1250, 2500 in 5000-kratno povečavo .....	42
Slika 4.32 in 4.33: Levo: Razprostrta nit steklenih vlaken (50-kratna povečava). Desno: Nit lanene tkanine, vidijo se odcepljajoča se lanena vlakna (50-kratna povečava) .....	43
Slika 4.34 in 4.35: Levo: Vlakno steklene tkanine pri 400-kratni povečavi. Desno: Vlakno lanene tkanine pri 400-kratni povečavi .....	44
Slika 4.36: Primerjava specifičnih tež [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] .....	46
Slika 4.37: Primerjava specifičnih nateznih trdnosti [ $\text{MPa}/\text{g}/\text{cm}^3$ ] .....	46
Slika 4.38: Primerjava specifičnih elastičnih modulov [ $\text{GPa}/\text{g}/\text{cm}^3$ ] .....	47
Slika 4.39: Primerjava porušnih deformacij [%] .....	47
Slika 5.1: Definicija osnovne niti in votka .....	49
Slika 5.2: Osnovni načini tkanja .....	50
Slika 5.3: Pridobljeni vzorci tkanin iz naravnih vlaken .....	51
Slika 6.1: Prikaz določitve globalnega in lokalnega koordinatnega sistema glede na usmerjenost vlaken .....	61
Slika 6.2: Geometrija laminata s k-timi plastmi .....	65
Slika 6.3: Pozitivne smeri osnih sil v laminatu .....	65
Slika 6.4: Pozitivne smeri momentov v laminatu .....	66
Slika 7.1: Preizkuševalni okvir Roell Amsler laboratorija Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani .....	70
Slika 7.2: Merilni listič Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., tip BFLA-5-5 .....	71
Slika 7.3: Impregnacija steklene tkanine z epoksi smolo za sanacije lesenih konstrukcij – 3 . plast .....	78
Slika 7.4: Stekljeni laminat, pripravljen za izrez preizkušancev – epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij .....	79

Slika 7.5: Laneni laminat, pripravljen za izrez preizkušancev – epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij.....	79
Slika 7.6: Laneni laminat, pripravljen za izrez preizkušancev – epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij.....	80
Slika 7.7: Izrezani preizkušanci in vpenjalne ploščice pripravljeni za lepljenje.....	81
Slika 7.8: Skica preizkušanca tipa 3 za natezno preiskavo, skladno s standardom ISO 527-4	82
Slika 7.9: Lepljenje vpenjalnih ploščic na preizkušance.....	82
Slika 7.10: Prva skupina preizkušancev s po dvema merilnima lističema v smeri delovanja obtežbe – čelna stran: od leve proti desni: LB1-p, LB1-v, LA1-p, LA1-v, SB1, SA1 .....	84
Slika 7.11: Prva skupina preizkušancev z enim merilnim lističem prečno na smer delovanja obtežbe – hrbtna stran: od leve proti desni: LB1-p, LB1-v, LA1-p, LA1-v, SB1, SA1.....	84
Slika 7.12: Kontrolni vzorec za sprotno korigiranje ambientalnih deformacij .....	85
Slika 7.13: Prikaz nameščenih merilnih lističev na preizkušancih iz skupine LA-v.....	87
Slika 7.14: Prikaz preizkušanca, natančno vpetega v vpenjalne čeljusti.....	87
Slika 7.15: Preizkuševalni okvir s preizkušancem ter računalniške enote za vodenje in spremljanje preiskave .....	88
Slika 7.16: Porušitev lanenega preizkušanca.....	104
Slika 7.17: Detajl porušitve lanenega preizkušanca pri 50-kratni povečavi .....	105
Slika 7.18 in 7.19: Primerjava porušitve preizkušanca, ojačenega z lanenimi vlakni (levo), in preizkušanca, ojačenega s steklenimi vlakni (desno).....	110
Slika 7.20 in 7.21: Prečni pogled porušitve vzorca lanenega kompozita s prikazom plasti vlaknen in matrice. Levo: 50-kratna povečava, desno: 100-kratna povečava.....	111
Slika 7.22: Detajl lanene niti pri 200-kratni povečavi, kjer se vidi oblitost tehničnih vlaken s polimerno matrico .....	111
Slika 7.23: Pogled na porušitev steklenega kompozita: 50-kratna povečava.....	112
Slika 8.1 in 8.2: Lovski dvorec gradu Kieselstein. Stanje pred sanacijo (levo), odstranjevanje strešne konstrukcije (desno). .....	113
Slika 8.3 in 8.4: Ostrežje pred odstranitvijo. Severozahodna stran (levo), jugovzhodna stran (desno). .....	114
Slika 8.5: Prenos nosilcev s strehe .....	114
Slika 8.6: Pregled in označevanje nosilcev .....	114
Slika 8.7: Nosilci po pripravi površine.....	116



## 1 UVOD

Obseg uporabe polimernih kompozitov, armiranih z umetnim vlakni, se v gradbeništvu zadnja leta močno stopnjuje. Zaradi svojih izredno visokih mehanskih karakteristik so epoksidne matrice, ojačene s steklenimi in ogljikovimi vlakni, nepogrešljiv gradbeni material tako pri izvedbi sanacij kot tudi za potrebe izgradnje modernih lahkih in togih konstrukcij, ki so sposobne premoščati velike razpetine.

V zadnjem desetletju se s pospešenim razvojem naravnih kompozitov na področju industrije armiranih plastik odpirajo nove možnosti njihove uporabe, med drugimi tudi za ojačevanje gradbenih konstrukcij. Najnovejše tehnologije pridobivanja in obdelave naravnih vlaken ter pravilna izbira postopka izdelave kompozitnega materiala omogočajo, da z ojačitvijo polimerne matrice z naravnimi vlakni dosežemo mehanske lastnosti, ki so primerljive z lastnostmi kompozitov ojačenih z umetnimi vlakni. Glavne prednosti naravnih vlaken za ojačevanje polimernih matric so:

- visoke specifične mehanske lastnosti,
- cenovna ugodnost,
- niso škodljiva zdravju,
- možnost recikliranja.



Slika 1.1: Lotus Eco Elise – z uporabo naravnih kompozitov je bila zmanjšana teža že tako izredno lahkega modela Elise S za še dodatnih 32 kg.

Naravna vlakna imajo zaradi osnovnega gradnika, celuloze, relativno nizko specifično težo in so sorazmerno trdna in toga. Zato so njihove specifične mehanske lastnosti (lastnosti, normirane glede na specifično težo) dokaj visoke in primerljive s specifičnimi lastnostmi steklenih vlaken. Ta značilnost se je že izkazala kot velika prednost v avtomobilski industriji, kjer je vsak privarčevani gram teže izrednega pomena. Proizvodnja in pridobivanje naravnih vlaken sta veliko cenejša in zdravju prijaznejša od proizvodnje umetnih vlaken, saj majhni delci steklenih vlaken potencialno povzročajo celo pljučnega raka. Čeprav je za zgodnji proces pridobivanja lanenih vlaken značilna velika količina prahu, je ta v sodobnih proizvodnih procesih praktično popolnoma izoliran in tako ne povzroča zdravstvenih ali tehničnih težav. Podobno kot kompoziti z umetnimi vlakni so tudi polimeri, armirani z naravnimi vlakni, procesirani do sekundarne obdelave, vendar jih lahko recikliramo termično – sežigamo, brez večje količine škodljivih stranskih produktov (žlindra ...).

Na podlagi trenutnega stanja raziskav lahko sklepamo, da se podobno kot je v preteklosti tehnologija v gradbeništvu sledila razvoju ojačitev polimernih matric s steklenimi in ogljikovimi vlakni, v bližnji prihodnosti obeta tudi prodor naravnih kompozitov na področje gradbenih konstrukcij. Ob uspešnem razvoju biološko razgradljivih polimernih matric bodo objekti, zgrajeni iz naravnih kompozitov, predstavljali ekološko neoporečne proizvode visokih mehanskih lastnosti in neomejenih možnosti oblikovanja. Predvidimo lahko tudi razvoj novih tehnologij statičnega ojačevanja, predvsem lesenih konstrukcij, kjer ojačitev s kompozitnim materialom naravnega izvora tvori popoln sonaravni nosilni element, ki kljub sanaciji ne okrne vizualne vrednosti masivnega lesa. Za ojačitve s tkaninami naravnega izvora je namreč značilno, da je videz tkanine odvisen od vrste rastline in področja, v katerem je bila le-ta vzgojena, tako da lahko z izbiro ustrezne tkanine dosežemo popolno ujemanje statične ojačitve z videzom primarnega lesa. Pri tem pa velja izpostaviti, da ojačitev iz naravnih vlaken deluje prav tako toplo in naravno kot sam lesen element.

### **1.1 Referenčni projekti, raziskave in uporaba naravnih kompozitov**

V zadnjih letih se razvoj naravnih kompozitov odvija pospešeno tako v akademskih krogih kot tudi v različnih industrijskih panogah. Glavno gonilo razvoja na področju evropske unije predstavljata projekta Biocomp, ki je potekal med letoma 2005 in 2008, ter Natex kot

nadaljevanje Biocomp-a, s pričetkom leta 2008. Projekt Natex (Natural Aligned Fibres and Textiles for Use in Structural Composites Applications) ima do leta 2012 v načrtu razširiti spekter uporabe biokompozitov s pomočjo razvojnega proračuna v vrednosti 5 milijonov evrov, s katerim financira razvoj in interdisciplinarno povezuje različne industrije ter strokovne inštitucije.

Komercialni razvoj z naravnimi vlakni ojačenih polimerov se je najprej pričel na področju avtomobilske industrije zaradi že omenjene prednosti nizke specifične teže vlaken. Danes večina avtomobilov vsebuje najrazličnejše dele, proizvedene iz polimernih matric, ojačenih predvsem z lanenimi, konopljinimi in jutinimi vlakni. Običajno se uporabljajo netkana naravna vlakna, obdana s polipropilenskimi matricami, za izvedbo notranjih mask vrat, armaturnih plošč, kalupov sedežev, strehe in drugih nenosilnih elementov. Korak naprej je naredilo podjetje Lotus z različico svojega modela Elise, imenovano Eco Elise (slika 1.1), kjer so na vseh delih avtomobila, kjer je to mogoče, uporabili naravne materiale ter s tem zmanjšali težo že tako lahkega avtomobila za še dodatnih 32 kg. S tem so potrdili dejstvo, da se je pri izdelavi okolju prijaznega vozila poleg neoporečnih pogonskih sredstev potrebno osredotočiti tudi na izbor osnovnih surovin, kjer z naravnimi materiali privarčujemo na teži in že s tem zmanjšamo porabo pogonske energije, poleg tega pa je tako vozilo tudi manj obremenjujoče za okolje po preteku življenjske dobe.



Slika 1.2 in 1.3: Levo: več kot 50 sestavnih komponent v avtomobilih znamke Mercedes je narejenih iz različnih naravnih vlaken. Desno: primer cevi, narejene na podlagi preprega iz lanenih vlaken.



Poleg uporabe naravnih kompozitov v avtomobilski industriji se je razvoj odvijal tudi v drugih panogah. Eno najbolj potencialnih področij je nadomestitev steklenih vlaken z naravnimi pri izdelavi elis rotorja vetrnice vetrnih elektrarn, kjer je ponovno glavna prednost nižja specifična teža celuloznih vlaken. Nadalje se naravna vlakna kot ojačitev umetne mase uporabljajo tudi pri izdelavi cevi, cistern, kovčkov, talnih oblog ter najrazličnejših drugih polimernih proizvodov, kjer lahko nadomestijo ojačitve s steklenimi vlakni (kalupi jadronic, deske za jadrnanje na deski, tenis loparji ...).



Slika 1.4 in 1.5: Levo: deski za jadrnanje na deski, narejeni s kombinacijo lanenih in karbonskih tkanin. Desno: primer izvedbe trupa jadrnice z uporabo lanene tkanine.

Ideja uporabe kompozitov, armiranih s tkaninami iz naravnih vlaken, za ojačevanje gradbenih konstrukcij pa ni popolnoma nova. Preučevanje tovrstne aplikacije naravnih vlaken je možno zaslediti v več znanstvenih člankih, ki preiskujejo vpliv takih ojačitev predvsem na lesenih lameliranih nosilcih in montažnih lesenih I-nosilcih. Najpomembnejše delo na tem področju so naredili na japonskem inštitutu Hokkaido Forest Research Institute, kjer je skupina profesorjev, združenih s kanadskih in japonskih univerz, preučevala vpliv ojačitve lesenih nosilcev s polimernimi kompoziti, armiranimi s konopljinimi in jutinimi tkaninami. Preiskave so bile izvedene na lesenih I-nosilcih, ki so najbolj uporabljen konstrukcijski element v lesenih hišah v Kanadi in imajo določene mehanske pomanjkljivosti za uporabo v več etažnih objektih.



Slika 1.6: Tlačna porušitev zgornje pasnice I-nosilca pri upogibni obremenitvi kot posledica ojačitve spodnje pasnice s tkanino iz naravnih vlaken (Chui H. Y, et al. 2008)

## 1.2 Cilj diplomske naloge

Ojačevanje lesenih konstrukcij s kompozitnimi materiali pride najbolj do izraza pri objektih z veliko zgodovinsko vrednostjo, kjer je večina konstrukcijskih elementov z vidika ohranjanja kulturne dediščine izrednega pomena, vendar ob prenovi teh objektov (npr. menjava strešne kritine, prestrukturiranje namembnosti prostorov in s tem povečanje koristne obtežbe ...) lahko pride do nezadostne nosilnosti osnovnih konstrukcijskih elementov. V takih primerih je uveljavljena praksa menjava šibkih elementov z novimi, pri čemer se stari popolnoma odstranijo in zavržejo kljub njihovi zgodovinski vrednosti, ki se kaže tako v obdelavi in videzu lesa kot izvedbi stikov, štukatur ipd., in ni nič manjša od vrednosti fasade objekta, ki je običajno predmet restavriranja. Pri varovanju kulturne dediščine je pomembno, da stremimo k ohranitvi originalne konstrukcije ter čim manjšemu poseganju vanjo s čimer ohranimo pristnost samega objekta. Sedanja praksa menjave lesene konstrukcije pa tega seveda ne omogoča. Predmetno diplomsko delo preučuje možnost ojačevanja lesenih elementov s kompoziti iz naravnih vlaken kot ekonomsko sprejemljivo alternativo rušenju konstrukcije.



Slika 1.7: Ostrešje lovskega dvorca gradu Kieselstein iz 19. stoletja

Cilj preiskav je preučiti možnost uporabe kompozitov, armiranih z naravnimi vlakni, za ojačevanje gradbenih konstrukcij na terenu. Na podlagi obstoječe literature, dosedanjih raziskav in razpoložljivosti vlaken je najprej potrebno izbrati ustrezno vrsto naravnih vlaken, nato pa določiti način njihove uporabe oziroma postopek praktične izvedbe kompozita, ki bo primeren za izvajanje na terenu. Po izboru ustreznih materialov in postopkov se izdelajo preizkušanci za osnovne preiskave mehanskih lastnosti nastalega kompozita. Na podlagi pridobljenih rezultatov se nato izvede ojačitev lesenih nosilcev, ki simulira dejansko uporabo materiala. Kvaliteta ojačitve se vrednoti v laboratoriju z upogibnimi in strižnimi preizkusi. Laboratorijske preiskave so podprte z računsko analizo po metodi končnih elementov, razvije pa se tudi ustrezen računski model za kasnejše projektiranje takih ojačitev.

Ker je zgoraj opisani postopek izredno obsežen zaradi množice neznanck s področja ojačevanja gradbenih konstrukcij z naravnimi vlakni, se to diplomsko delo orientira le na prvi del preiskav, to je na razvoj in izbor materialov za izvedbo kompozita, armiranega s tkaninami iz naravnih vlaken. Zaradi boljše predstavitve o zastavljeni problematiki in srečnega spleta okoliščin pa sem v tej prvi fazi preiskav že uspel pridobiti idealne vzorce tudi za končno preiskavo lesenih nosilcev. Podjetje Saning International d.o.o. mi je namreč ponudilo

možnost odvzema lesenih elementov ostrešja objekta lovski dvorec, ki spada v kompleks gradu Kieselstein, kjer so prav v času nastajanja te naloge izvajali protipotresno sanacijo. Poleg statičnih protipotresnih ojačitev se je v sklopu obnove lovskega dvorca zamenjalo tudi celotno ostrešje in strešna kritina. Prav takšno ostrešje, ki datira v drugo polovico 19. stoletja, pa bi bilo z vidika ohranjanja kulturne dediščine bolj primerno sanirati kot pa odstraniti, vendar trenutno ni uveljavljenega postopka, ki bi bil ekonomsko in estetsko sprejemljiv ter bi zagotavljal kvalitetno sanacijo. Zaradi edinstvene priložnosti sem ob pomoči podjetja Saning nosilce prenesel v njihove razvojne prostore ter jih obdelal do take stopnje, da so pripravljene na ojačevanje s kompozitnimi materiali.

## 2 PREGLED VSEBINE

V uvodnem delu naloge je predstavljen kratek pregled literature s področja kompozitov, ojačenih z naravnimi vlakni, s poudarkom na dosedanjih raziskavah uporabe v gradbenih konstrukcijah.

Sledi pregled ter primerjava naravnih in umetnih vlaken za ojačevanje polimernih matric. V sklopu tega poglavja so kratko predstavljena in opisana že uveljavljena umetna vlakna ter podrobneje analizirana nekatera naravna vlakna. Izmed množice naravnih vlaken so izbrana tista, ki so ustrezna za ojačevanje epoksidnih matric, s poglobljeno študijo zgradbe lanenih vlaken, ki se izmed vseh izkažejo za najbolj primerna. Mehanske lastnosti vseh predstavljenih naravnih vlaken so primerjane z mehanskimi lastnostmi steklenih vlaken, kar omogoča dobro predstavo o njihovi kvaliteti. Na koncu poglavja je prikazana tudi primerjalna tabela mehanskih lastnosti vseh obravnavanih vlaken.

Sledi pregled uporabljenih materialov in primerjava uveljavljenih umetnih tkanin za ojačevanje epoksi matric v gradbeništvu z naravnimi, ter izpostavitve problematike aplikacije slednjih. V sklopu preiskav sta bili uporabljeni dve različni epoksidni matrici. Mehanske lastnosti ter prednosti in slabosti vsake izmed njih so opisane in prikazane v preglednih tabelah.

Za boljše razumevanje mehanike obnašanja kompozitov je prikazan tudi račun mehanskih lastnosti ter analiza togostnih karakteristik kompozitnega laminata po klasični teoriji laminatov.

Sledijo osnovne preiskave lamelnih kompozitov z opisom izvedbe nateznega preizkusa, primerjavo posameznih skupin preizkušancev in interpretacijo rezultatov. Poglavje predstavi s standardom predpisan postopek natezne preiskave kompozitov in določitev osnovnih mehanskih karakteristik kompozitnega materiala. Opisan je tudi postopek izdelave posameznih laminatov, ki so bili izdelani za potrebe preiskav. V končni primerjavi je

natančneje opisan porušni mehanizem, prikazane pa so tudi vrednosti specifičnih mehanskih lastnosti preiskovanih materialov.

Za boljšo interpretacijo porušitev preiskovanih kompozitov in interakcije matrice ter vlaken so bili vzorci pregledani z elektronsko mikroskopsko kamero.

Na kratko je prikazan tudi postopek priprave lesenih elementov pred ojačevanjem s kompoziti, armiranimi s tkaninami iz naravnih vlaken, kot predlog nadaljnjih preiskav.

### 3 PREGLED LITERATURE

Naravna vlakna kot alternativa umetnim vlaknom za ojačevanje polimernih matric so že nekaj časa predmet raziskav in testiranj, vendar je bila njihova uporaba v praksi do nedavnega zanemarjena, saj so se šele z novimi trendi okoljevarstvenega projektiranja in življenja nasploh, začele preiskave dejanske uporabnosti teh vlaken. Raziskovalci po vsem svetu so vedno naleteli na enake težave, ki se nanašajo na nezadostno prepojitve vlaken naravnega materiala s polimerno matrico, veliko afiniteto vlaken do vpijanja vlage iz okolja in slabo kemijsko povezanost notranjih skupin vlakenc. Preiskovali so najrazličnejša naravna vlakna in vsi prišli do zaključkov, da so za armiranje polimerov najprimernejša rastlinska vlakna konoplje in lanu.

Najdemo lahko kar nekaj preiskav in literature s področja polimerov, armiranih z naravnimi vlakni, za uporabo kot nosilni element, npr. lupina jahte, ogrodje kolesa, ogrodje teniškega loparja itd., zelo malo pa je raziskav s področja gradbeništva. Pomanjkanje zanimanja za ojačevanje z naravnimi vlakni v gradbeništvu je pripisati njihovim slabšim mehanskim lastnostim v primerjavi s klasičnimi materiali, vendar je primerljivost teh lastnosti v zadnjih letih dokazana z izkušnjami in primeri s področja armiranih plastik v ostalih panogah industrije. Tako gre večji del zaslug za trenutno slabo razširjenost teh materialov na področju gradbeništva pripisati nepravilnim, nepopolnim in neustrezno usmerjenim preiskavam. V nadaljevanju je kratko opisanih nekaj sicer redkih prispevkov, ki problematiko obravnavajo v neposredni povezavi z gradbeništvom.

Doktorska disertacija g. Alanna Andréja s Tehniške univerze Lulea na Švedskem, ki je leta 2006 objavil obsežno raziskavo vlaken za ojačevanje lesenih konstrukcij, je eno pomembnejših del. V svoji raziskavi je primerjal umetna in naravna vlakna, zbral podatke o mehanskih lastnostih na podlagi različnih virov in ocenjeval primernost posamezne vrste naravnih vlaken za ojačevanje lesenih elementov. V sklopu naravnih vlaken je vrednotil uporabnost vlaken bambusa, lanu, konoplje, jute, kenafa, ramije, kokosa, bombaža, sisala,

abake ter viskozna<sup>1</sup> vlakna. Mehanske karakteristike vsake vrste je nato primerjal s karakteristikami steklenih vlaken in ugotovil, da imajo najbolj primerljive lastnosti lanena in konopljina vlakna. Dotaknil se je tudi principov ojačevanja lesenih konstrukcij in klasične teorije laminatov.

Že omenjena preiskava ojačevanja lesenih I-nosilcev pod vodstvom profesorja Ying H. Chuija v japonskem inštitutu Hokkaido Forest Products Research Institute ni prinesla želenih rezultatov. Raziskovalna skupina je najprej preučevala vpliv predhodne obdelave za dve vrsti vlaken in sicer za jutina vlakna in vlakna manilske konoplje. Kljub boljšim rezultatom, doseženim s konopljinim kompozitom, pa so se za nadaljnje preiskave na I-nosilcih odločili za slabša, jutina vlakna, ki so dostopnejša na japonskem trgu. Kljub uporabi slabše tkanine pa so dosegli obetavne rezultate, zahvaljujoč predhodni obdelavi vlaken in uporabi predizdelanega kompozita v obliki lamel.

Skupina združenih znanstvenikov s fakultet za kemijo in gradbeništvo iz Delawarea v Združenih državah Amerike, je objavila delo, v katerem so razvijali popolnoma naravne kompozitne sendvič nosilce. Za matrico so uporabili naravne smole na bazi sojinega olja, s katerimi so armirali naravna in steklena vlakna. Za kvalitetno prepojitev vlaken so uporabili vakuumski in tlačni postopek injiciranja smole (VARTM), ki je eden najboljših postopkov izdelave kompozitov. Izvedli so pet različnih tipov nosilcev, ki so vsi prinesli dobre rezultate v primerjavi s kontrolnimi nosilci iz steklenih vlaken.

Poleg navedene je dosegljive še mnogo literature, ki obravnava biokompozite, naravna vlakna in pripravo naravnih vlaken za ojačevanje polimernih matric, ojačevanje lesenih konstrukcij z umetnimi vlakni, razvoj bioloških smol in številne druge posredno povezane tematike, ki pa je na tem mestu ne bom posebej omenjal.

---

<sup>1</sup> Viskozna vlakna so regenerirana celulozna vlakna iz čiste celulozne mase, ki se običajno pridobiva iz lesa bukve, bora in smreke. Uvrščamo jih med kemijska celulozna vlakna.



## 4 PREGLED PRIMERNIH VLAKEN ZA ARMIRANJE KOMPOZITOV

### 4.1 Uvod

V splošnem so kompoziti materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent. Večina materialov, ki jih najdemo v naravi, je v bistvu kompozitov, prav tako pa je veliko inženirskih materialov, ki jih imamo za homogene, dejansko sestavljenih iz več komponent. Kompozite, ki jih najdemo v naravi, običajno imenujemo naravni kompoziti, kot na primer celulozna vlakna, ki so v bistvu kompozit nosilnih celuloznih celic, obdanih z matrico iz lignina, ter kost, ki je kompozit mineralne matrice (apatita) in mehkih kolagenskih vlaken. Materialov, kot so jekla, kovinske zlitine in nekateri polimeri, ne obravnavamo kot kompozite, ker se njihove komponente tvorijo neposredno iz homogenega materiala. Podobno so praktično vsi materiali, uporabljeni v gradbeništvu, kompoziti, saj so več ali manj mešanica različnih osnovnih materialov (cement, beton, armirani beton, asfalt, les ...). Kompozitni materiali v ožjem pomenu besede pa so tisti, pri katerih se komponente jasno razločijo ves čas njihovega obstoja (v fazah nastanka, obdelave in uporabe). Ti moderni kompoziti so se pričeli razvijati v šestdesetih letih 20. stoletja za potrebe vojaške, vesoljske in letalske industrije, ki je zahtevala toge, močne in čim lažje materiale. V ta namen so razvili več različnih materialov, ki jih uvrščamo med umetne kompozite, saj gre za polimerne matrice, ojačene z umetno proizvedenimi vlakni.

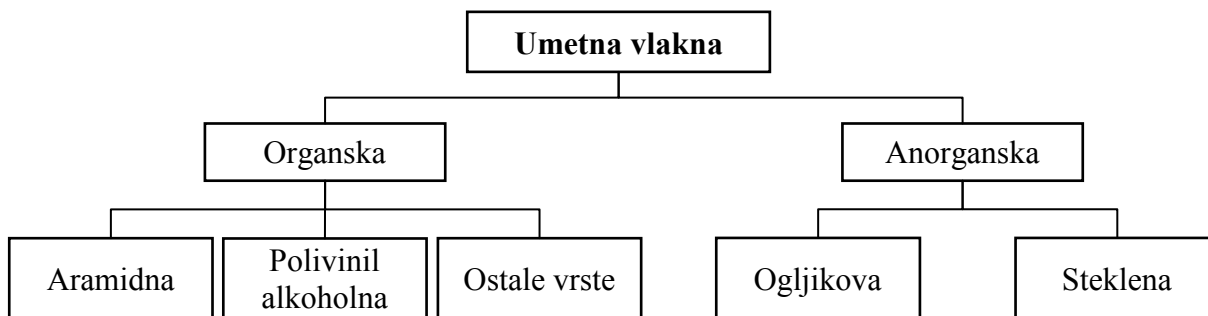
V predmetnem diplomskem delu obravnavamo kompozite v ožjem pomenu besede, torej kot matrice, armirane z vlakni, kjer vlakna zagotavljajo natezno trdnost in togost, matrica pa z oblivanjem vlaken vzdržuje obliko materiala, ščiti vlakna pred zunanjimi vplivi, prenaša tlačne obremenitve in prerazporeja obremenitev med vlakni preko strižnega mehanizma med matrico in vlakni. Ključnega pomena za dobre mehanske lastnosti kompozita je sprijemna trdnost stika med vlakni in matrico, ki mora biti višja od trdnosti same matrice. Nadalje se v pričujočem delu orientiramo le na vlaknaste ojačitve v obliki tkanin, saj so te najprimernejše za izvajanje kompozitov na terenu. Pod pojmom naravna vlakna pa razumemo predvsem vlakna rastlinskega izvora, ki so med biološko neoporečnimi vlakni najkonkurenčnejša umetnim oziroma sintetičnim vlaknom.

Na kakovost kompozitnega materiala poleg lastnosti matrice neposredno vplivajo tudi vrsta, dolžina in premer vlaken, njihova orientacija, količina, mehanske lastnosti ter način vezave vlaken. Vlakna so lahko kratka, dolga ali celo neprekinjena. Njihove dimenzije podajamo z razmerjem med dolžino in premerom. Natezna trdnost kompozita se izboljša, kadar je to razmerje čim večje, saj se z manjšanjem radija zmanjšuje verjetnost napak v vlaknu, večja dolžina vlaken pa omogoča manj prehodov napetosti med matrico in vlakni. Trdnost in togost kompozita zagotavljajo armatura vlakna, posledično večja količina vlaken v matrici izboljša mehanske lastnosti kompozita. Kljub vsemu pa naj prostorninski delež vlaken praviloma ne presega 80 % prostornine kompozita, saj mora biti zagotovljeno, da matrica obda vsa vlakna.

Orientacija vlaken v matrici je lahko različna. Kratka vlakna so običajno naključno razporejena po celotni matrici brez glavne smeri orientacije. Razmerje med dolžino in premerom je pri kratkih vlaknih majhno, zaradi njihove naključne razporejenosti pa imajo taki kompoziti kvazi-izotropne lastnosti. Dolga vlakna so praviloma usmerjena vzdolž glavne smeri obtežbe in ustvarjajo anizotropno obnašanje kompozita. Kompoziti z vlakni, usmerjenimi v eno smer, imajo izrazito dobre lastnosti v smeri vlaken, prečno na njih pa precej slabše. Vlakna so lahko usmerjena tudi v dveh smereh, pletena v dvoosne tkanine ali pa celo v večosne tkanine, kjer so s sekundarno nitjo povezane plasti različno usmerjenih vlaken.

## **4.2 Umetna vlakna**

Čeprav so umetna vlakna narejena pod kontroliranimi proizvodnimi procesi, v literaturi lahko zasledimo zelo različne podatke za mehanske lastnosti teh vlaken, še posebej za natezno trdnost in togost. Kakovost vlaken je močno odvisna od kvalitete postopka izdelave, ki se odraža na mikrostrukturi materiala, ter morebitnih poškodb, nastalih pri transportu in skladiščenju. Poleg napak na samih vlaknih pa je variacija rezultatov nateznih trdnosti tudi posledica meritev na različnih vzorcih, saj večja premer in dolžina vlakna pomenita večjo verjetnost poškodbe vzorca, ki se odraža na slabših rezultatih preiskave.



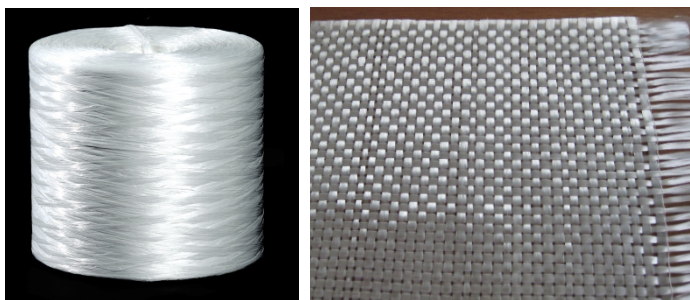
Slika 4.1: Klasifikacija umetnih vlaken

Večina umetnih vlaken je krhkih, saj pred poružitvijo izkazujejo le elastične deformacije. Izjema so aramidna vlakna, v katerih pred poružitvijo pride do precejšnjih plastičnih deformacij.

Za ojačevanje polimernih matric se v industriji kompozitnih plastik uporabljajo predvsem steklena, ogljikova in aramidna vlakna, manj pa polietilenska, borova in bazaltna vlakna. Med najbolj pogoste matrice, ki povezujejo vlakna v kompozit, spadajo epoksidne, poliestrske, vinilestrske in fenolne smole. V gradbeništvo so se zaradi specifičnih zahtev po visoki nosilnosti in čim nižji ceni uveljavili kompoziti, večinoma ojačeni s steklenimi in ogljikovimi ter nekoliko manj z aramidnimi vlakni. Zaradi pozitivnih lastnosti visokih sprejemnih napetosti med vlakni in najrazličnejšimi osnovnimi površinami (beton, keramika, les) pa se je kot matrica uveljavila predvsem epoksidna smola. V nadaljevanju so kratko predstavljena umetna vlakna, ki se najpogosteje uporabljajo v gradbeništvo.

#### 4.2.1 Steklena vlakna

Steklena vlakna so najbolj razširjena vlakna za ojačevanje polimernih matric. Uporabljajo se za ojačevanje trupov jadrnic, gliserjev, letal in mnogih športnih rekvizitov. V gradbeni industriji se uporabljajo za nosilne (cisterne, silosi) in nenosilne elemente (cevi, okenski okvirji) ter stavbno opremo (kopalne kadi, umivalniki ...).



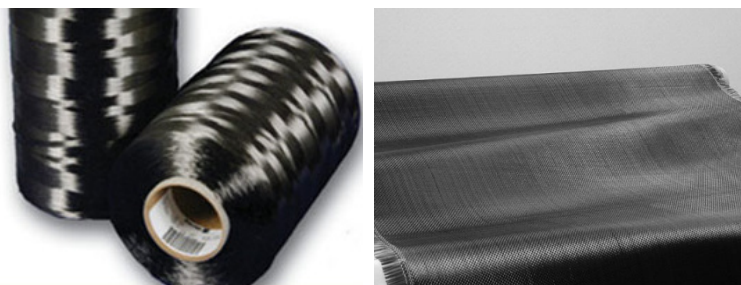
Slika 4.2 in 4.3: Levo: steklena vlakna, desno: tkanina iz steklenih vlaken.

Steklena vlakna so narejena iz taline zmesi kremenčevega peska, kaolina, apnenca in kolemanita, ki se pri temperaturi 1600 °C preoblikuje v tekoče steklo. Ta tekočina se nato vleče skozi odprtine premera od 5 do 24 mikronov ter simultano ohlaja. V odvisnosti od razmerij posamezne komponente dobimo različne variacije steklenih vlaken. Najbolj pogosto je E-steklo, oziroma električno steklo. Gradi ga tri-atomski sistem  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  z nekaj zamenjavami  $\text{SiO}_2$  z  $\text{B}_2\text{O}_3$  in  $\text{CaO}$  z  $\text{MgO}$ . Dodatek  $\text{B}_2\text{O}_3$  namreč znatno zmanjša temperaturo taline, s čimer se podaljša čas obdelave in s tem olajša postopek vlečenja vlaken. Vlakna se nato lahko nasekajo na 2,5–5,0 cm dolge kose, navijajo v vrvice ali pa predejo v niti, ki se tkejo v tkanine.

Ločimo več tipov steklenih vlaken, ki se med seboj razlikujejo po mehanskih in kemijskih lastnostnih. Silikatno S-steklo (oziroma R-steklo) je sestavljeno iz  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  in ima višjo trdnost in togost kot sicer najbolj razširjeno električno ali E-steklo. Poleg tega pa je tudi odporno na višje temperature. Ker pa je proizvodnja S-stekla zapletena, so vlakna dražja in uporabljana le za bolj posebne namene. E-steklo ima dovolj dobre mehanske lastnosti za široko uporabo, vendar začne propadati v alkalnih in kislih okoljih. Za odpravo te pomanjkljivosti so razvili bolj obstojno C-steklo (kemijsko steklo), E-CR-steklo (elektrokorozijsko obstojno steklo) in AR steklo (alkalno obstojno steklo). V gradbeništvu se najpogosteje uporabljajo E-stekla, redkeje pa tudi alkalno odporna AR-stekla.

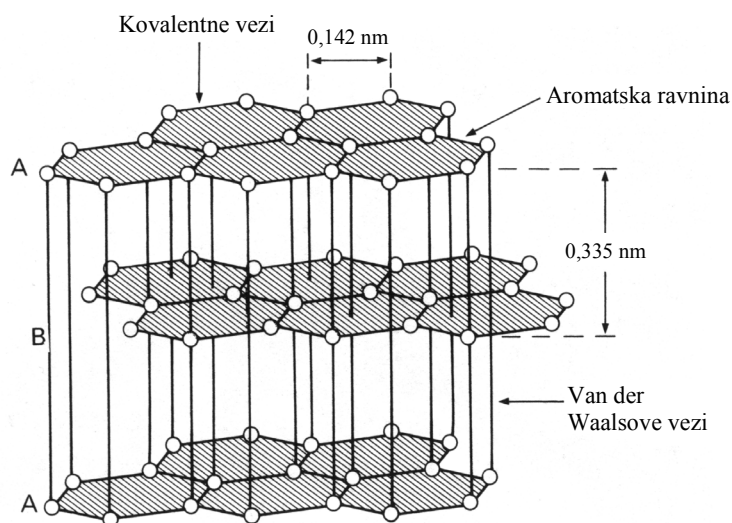
Steklena vlakna so široko uporabljena predvsem zaradi svoje cenovne ugodnosti v primerjavi z ostalimi sintetičnimi vlakni, vendar imajo nizko razmerje med modulom elastičnosti in težo, zaradi česar niso primerna za najzahtevnejša področja uporabe. Pogosto pa tudi izgubijo tekmo z ogljikovimi vlakni, katerih višjo ceno odtehtajo znatno boljše mehanske lastnosti.

#### 4.2.2 Ogljikova vlakna



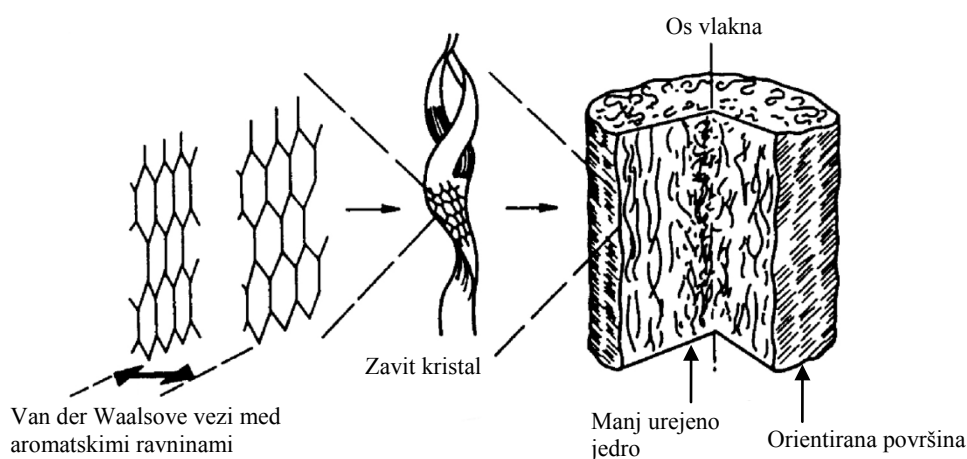
Slika 4.4 in 4.5: Levo: ogljikova vlakna, desno: tkanina iz ogljikovih vlaken

Ogljik se v naravi pojavlja v dveh značilnih oblikah, kubični (diamant) in plastoviti (grafit), najdemo pa ga tudi v delno kristalni in steklasti obliki. Za izdelavo vlaken je najpomembnejša grafitna oblika, kjer so ogljikovi atomi razporejeni v šesterokotnih plasteh in so med seboj povezani z močnimi kovalentnimi vezmi ( $\approx 525$  kJ/mol). Plasti ogljikovih atomov (aromske ravnine) so zložene v zaporedju ABAB (slika 4.6), med seboj pa so povezane s šibkimi Van der Waalsovimi vezmi ( $< 10$  kJ/mol). Posledica izrazito plastovite zgradbe in razlike v moči med-plastnih in znotraj-plastnih povezav so izrazito anizotropične lastnosti materiala. Elastični modul, ki je odvisen od kemijskih vezi, je visok ( $\approx 1000$  GPa) v ravnini plasti, kjer so močne kovalentne vezi, v smeri pravokotno na vzporedne ravnine plasti pa je kot posledica šibkih Van der Waalsovih vezi zelo nizek ( $\approx 35$  GPa).



Slika 4.6: Kristalna struktura grafita

Ogljikova vlakna z visokim modulom elastičnosti dobimo s karbonatizacijo predhodnih vlaken. Predhodna vlakna so posebna tekstilna polimerna vlakna, ki jih je mogoče karbonatizirati, ne da bi se stalila. V začetku razvoja ogljikovih vlaken so se kot predhodna vlakna uporabljala vlakna umetne svile – rajon in celulozna vlakna. Danes je najpogosteje uporabljeno predhodno vlakno poliakrilonitril (PAN), s katerim se doseže 50 % izkoristek začetnega materiala v končnem vlaknu. Komercialna imena teh vlaken so Dolan, Dralon in Courtelle. Ogljikova vlakna je mogoče izdelati tudi iz smole, poliamida, polivinilalkoholov in ogljikovodikov.



Slika 4.7: Struktura ogljikovega vlakna

Za izdelavo ogljikovih vlaken je znanih več postopkov toplotne obdelave in raztezanja vlaken, ki pa imajo skupne štiri korake:

- **Vlaknizacija:** postopek izdelave predhodnih vlaken, ki se lahko izdelajo po mokrem, suhem, sol-gel postopku ali pa po postopku predenja iz taline, podobno kot steklena vlakna.
- **Stabilizacija oz. oksidacija:** predhodna vlakna se stabilizirajo pod napetostjo pri temperaturi med 200 °C in 300 °C v oksidativni atmosferi. Pri tem se poveča gostota vlaken, celoten postopek pa prepreči, da bi se vlakno stopilo pri visokih temperaturah.
- **Karbonatizacija:** poteka v dušikovi atmosferi, z njo pa se odstrani večino elementov, razen ogljika. Modul elastičnosti v smeri vlaken se z višanjem temperature povečuje, medtem ko se največja trdnost doseže pri 1300 °C.

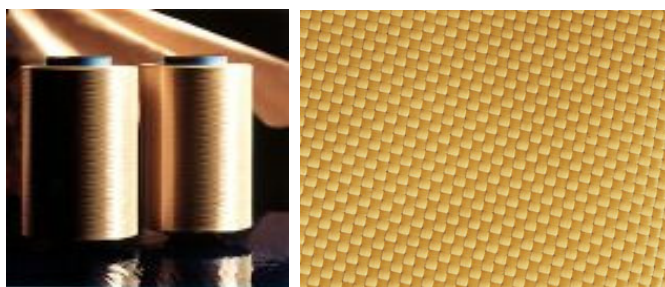
- Grafitizacija: poteka pri temperaturi med 2000 °C in 3000 °C v inertni atmosferi. Običajno se uporablja plin argon., medtem ko uporaba dušika ni dovoljena, saj bi lahko z ogljikom tvoril nitrile. V tem procesu se popravi ureditev kristalne strukture in izboljša lastnosti vlaken.

Ogljikova vlakna imajo premer med 5 in 15 mikronov. Pri različnih temperaturah procesa grafitizacije dobimo vlakna različnih mehanskih karakteristik, ki jih ločimo glede na trdnost in natezni elastični modul na:

- visoko trdnostna vlakna (HS – high strength):  $E < 265$  GPa,
- vlakna s srednjim modulom (IM – intermediate modulus):  $E = 265 - 320$  GPa,
- vlakna z visokim modulom (HM – high modulus):  $E = 320 - 440$  GPa,
- vlakna z izredno visokim modulom (UHM – ultra high modulus):  $E > 440$  GPa.

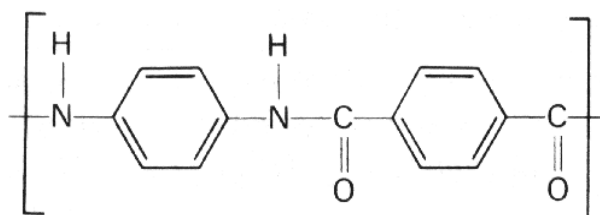
Ogljikova vlakna so precej dražja od steklenih vlaken, a imajo veliko boljše mehanske lastnosti. Dosegajo najvišje vrednosti elastičnega modula izmed vseh trenutno komercialno dostopnih vlaken, poleg tega pa imajo tudi visoko natezno in tlačno trdnost, so zelo odporna na korozijo in lezenje ter krčenje in utrujanje. Dosegajo tudi visoko moč kemične povezanosti s polimerno matrico. Slabost ogljikovih vlaken je nizka udarna trdnost, ki pa v gradbeništvu navadno ne predstavlja težav. S prilagajanjem efekta grafitizacije in orientacije atomov lahko korenito spreminjamo mehanske lastnosti ogljikovih vlaken, ki pa so na koncu vseeno odvisne tudi od strukturnih napak, kot so pore, mikrorazpoke, površinske poškodbe in nečistoče, ki morajo biti ustrezno izolirane, v kolikor hočemo dobiti vlakna najvišje kvalitete.

### 4.2.3 Aramidna vlakna



Slika 4.8 in 4.9: Levo: aramidna vlakna. Desno: tkanina iz aramidnih vlaken (Kevlar – DuPont)

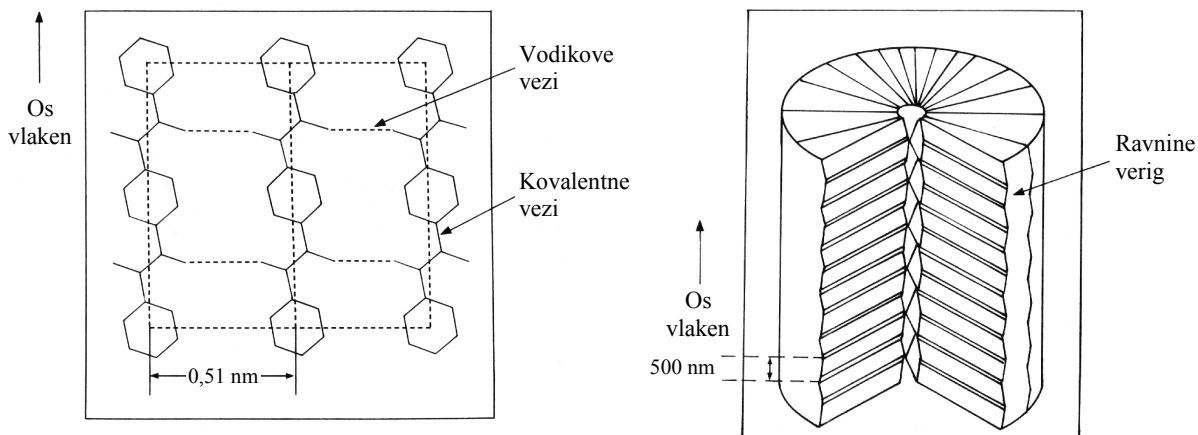
Aramidna vlakna spadajo med organska vlakna. Aramid je skupno ime za vse aromatske poliamide. Komercialno je znanih več tipov aramidnih vlaken z različnimi prodajnimi imeni. Najbolj znano vlakno je Kevlar, ki je zaščiteno ime podjetja DuPont in se na trgu pojavlja kot Kevlar 29, Kevlar 49 in Kevlar 149. Dokaj znani sta tudi komercialni imeni Twaron podjetja Akzo-Nobel, in Tecora podjetja Teijin.



Slika 4.10: Osnovni gradnik aramidnih vlaken

Aramidna vlakna so polimerna vlakna, kjer makromolekule vsebujejo najmanj 85 % aromatskih skupin, medsebojno povezanih z aramidnimi vezmi (slika 4.11). Toge aramidne molekule so sorazmerno poravnane že v raztopini, vendar so verige med seboj neurejene. Visoka urejenost aramidnih verig se doseže s postopki toplotne obdelave in raztegovanja polimernih verig. Aromatični obroči se v obliki verig povezujejo v ravninah z močnimi kovalentnimi vezmi, prečno na ravnine verig pa so povezani s šibkimi vodikovimi vezmi. Ploskovne verige se nato zavijajo in združujejo v tri-dimenzionalno strukturo z radialno simetrijo (slika 4.12). Stroga poravnava verig z močnimi kovalentnimi vezmi v smeri vlaken, vodikovimi vezmi in zelo velika urejenost verig makromolekul zaradi urejene razvrstitve fenilnih obročev in aromatskih skupin, omogočajo veliko natezno trdnost aramidnih vlaken.





Slika 4.11 in 4.12: Levo: ploskovna razporeditev aramidnih molekul s šibkimi vodikovimi in močnimi kovalentnimi vezmi. Desno: Tri-dimenzionalna struktura aramidnega vlakna z radialno nagubanimi ploskvami.

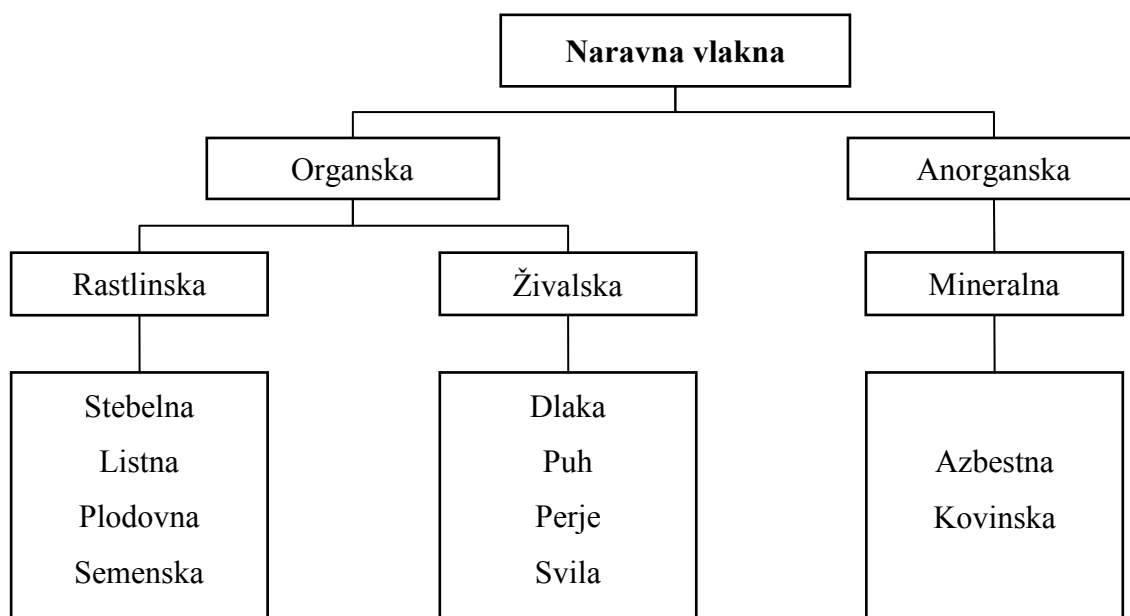
Končna vlakna so značilne zlate barve in imajo premer med 12 in 15 mikroni. Aramidna vlakna so lahko različnih karakteristik, vsem pa je skupna visoka specifična natezna trdnost, dobra odpornost na udarne obremenitve in nizek elastični modul. Odporna so tudi na visoke temperature, ogenj in kemične vplive, občutljiva pa na UV žarke. Posledica anizotropne narave vlaken je nizka tlačna trdnost, ki dosega le približno 10 % natezne trdnosti. Tlačne obremenitve namreč prenašajo predvsem šibke Van der Walsove in vodikove vezi, kar se kaže v lokalnem lezenju in uklanjanju vlaken. Zaradi svoje visoke odpornosti na udarne obremenitve se najpogosteje uporabljajo za razne protibalistične in zaščitne proizvode.

Preglednica 4.1: Preglednica mehanskih lastnosti umetnih vlaken (povzeto po različnih virih)

Vrsta vlakna	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost [MPa]	Spec. natezna trdnost [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [GPa]	Spec. modul elastičnosti [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Porušna deformacija [%]
E-steklo	2,55	2000 - 3500	784 - 1372	70	27	2,5 - 4,5
Ogljik (HM)	1,86	2700	1452	380	204	1,4
Ogljik (UHM)	1,90	3445	1813	441	232	0,8
Aramid (Kevlar 49)	1,45	3600	2482	131	90	2,8

### 4.3 Naravna vlakna

Naravna vlakna delimo glede na njihov izvor na rastlinska, živalska in mineralna. Za vlakna rastlinskega izvora je značilno, da so sestavljena iz celuloze. Delimo jih glede na mesto nahajanja v rastlini, to je na listna, stebelna, semenska in plodovna vlakna. Med najbolj razširjena spadajo vlakna rastlin bombaževca, lanu, ramije in jute. K stebelnim prištevamo vlakna, ki jih pridobimo iz stebel rastlin dvokaličnic. Stebelna vlakna segajo od korenine do vrha stebela in nudijo oporo tankim in visokim rastlinam lanu, konoplje, jute, ramije in podobnih.



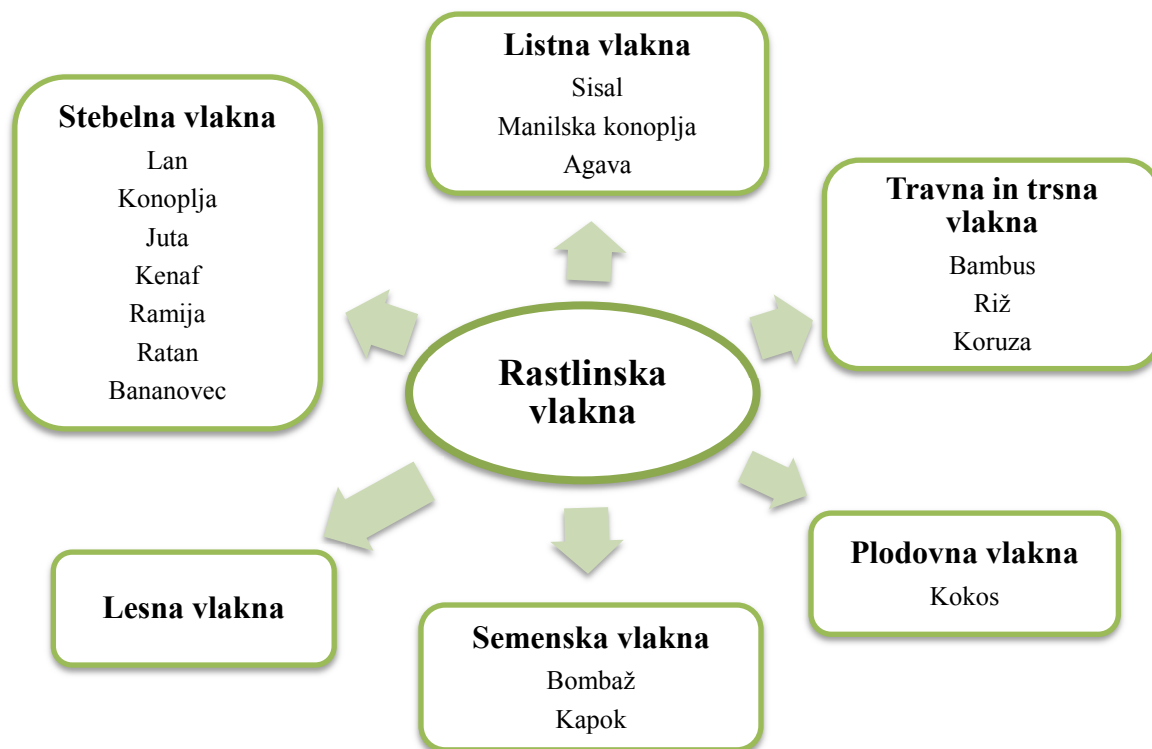
Slika 4.13: Klasifikacija naravnih vlaken glede na izvor

Glavni gradnik vlaken živalskega izvora so proteini. Najpogostejša vlakna te vrste so svila, volna, moher in alpaka. Uporabljajo se tudi ptičja vlakna, ki se pridobivajo iz ptičjih peres.

V naravi najdemo tudi mineralna vlakna, na primer azbestna, keramična vlakna, kot so aluminijev oksid, silicijev in borov karbid ter kovinska vlakna aluminija, železa, bronca itd.

Ker se v tem diplomskem delu osredotočamo na uporabo naravnih vlaken za ojačevanje polimernih matric, se pod pojmom naravna vlakna razumejo izključno vlakna, pridobljena iz rastlin, ki so primernejša za tovrstno uporabo. Rastlinska vlakna v večini sestavljajo celuloza,

hemiceluloza in lignin, kjer celuloza zagotavlja trdnost, lignin in hemiceluloza pa trdoto in zaščito vlaken. Posamezno vlakno sestavlja več manjših vlaken ali fibril. Za čim boljše mehanske lastnosti naravnih vlaken je v osnovi pomembna ustrezna usmerjenost fibril in mikrofibril ter visoka vsebnost celuloze.



Slika 4.14: Klasifikacija rastlinskih vlaken

Naravna vlakna imajo vrsto prednosti pred obstoječimi sintetičnimi vlakni predvsem z okoljevarstvenega vidika, saj so popolnoma biološko razgradljiva in imajo pozitivno ogljikovo bilanco, t.j. absorbirajo več ogljikovega dioksida, kot ga proizvedejo. Dobrodošla so tudi v proizvodnem procesu, saj ne povzročajo abrazije na proizvodni opremi, zaradi česar je njena obraba počasnejša. Vzgojanje kultur, ki jih uporabljamo za izdelavo naravnih vlaken, je nezahtevno in razširjeno v zelo različnih klimatskih območjih po vsem svetu. Z ekološkega vidika je zanimiv podatek o primerjavi porabljene energije za proizvodnjo tkanin. Celoten proces, potreben za izdelavo lanene tkanine, vključno z žetjem lanu, porabi približno 9,55 MJ/kg, medtem ko proces za izdelavo tkanine iz steklenih vlaken terja okoli 54,7 MJ/kg.

Izdelava tkanine iz naravnih vlaken torej potroši približno 17,0 % manj energije kot izdelava tkanine iz umetnih vlaken. Proces za izdelavo tkanine iz karbonskih in aramidnih vlaken pa je še bolj potraten. Pri tem je potrebno poudariti, da je razgradnja kompozitov iz naravnih vlaken in naravnih polimernih matric – biosmol popolnoma neškodljiva za okolje, medtem ko je deponiranje oz. recikliranje kompozitov iz umetnih proizvodov drago in obremenjujoče za okolje.



Slika 4.15: Tkanine iz naravnih vlaken (od leve proti desni): lan, konoplja, ramija in juta

S področja mehanskih lastnosti sta najbolj konkurenčni značilnosti naravnih vlaken nizka specifična teža in visoka specifična natezna trdnost. Z uporabo naravnih vlaken namesto sintetičnih lahko kompozitu zmanjšamo težo tudi za 40 %, kar je še posebej velika prednost v letalski in avtomobilski industriji. Z ustrezno obdelavo vlaken pred impregniranjem z matrico pa lahko dosežemo enakovredne in celo boljše natezne in upogibne lastnosti, kot jih imajo kompoziti s steklenimi vlakni in so tako v kombinaciji z manjšo težo ter biološko neoporečnostjo nesporen favorit. Slabost naravnih vlaken je njihova težnja k absorbiranju vode, kar povzroči, da vlakna nabreknejo, pri čemer se poruši stik med vlakni in matrico ter posledično zmanjša nosilnost kompozita. Absorpcijo vode je mogoče z ustrezno obdelavo – impregniranjem vlaken pred izdelavo kompozita, zmanjšati do zanemarljive vrednosti, kar je bilo tudi potrjeno v dosedanjih raziskavah.

V nadaljevanju so opisana najpogosteje uporabljena vlakna za ojačevanje polimernih matric, s poudarkom na lanenih vlaknih, ki se izkažejo kot najprimernejša za ojačevanje s tkaninami.

### 4.3.1 Lanena vlakna

Lanena vlakna so najbrž prva tekstilna vlakna, ki jih je uporabljal človek. Že v neolitiku, okoli leta 7500 pred našim štetjem, so kamenodobni ljudje vrvice iz lanenih vlaken povezovali v ribiške mreže. Okoli leta 5000 pred našim štetjem so stari Egipčani uporabljali laneno tkanino za mumificiranje faraonov. Na področje Evrope so lan prinesli prvi kmetje v obdobju novejšje kamene dobe, iz njega pa so že tkali preprosta oblačila. V naslednjih tisočletjih se je lan redno uporabljal v obliki niti za ribiške mreže ter vrvi in za izdelavo blaga za oblačila ter platen za jadra in šotore. Lanene tkanine so dominirale na področju izdelave tekstilnih izdelkov vse do leta 1950, ko so na trg prišla sintetična vlakna. Sintetične tkanine so nato praktično izpodrinile lan do nedavnega, ko so uspešno spojili laneno vlakno s sintetičnim ter tako združili prednosti obeh materialov. Posledično se je tekstilna industrija začela ponovno bolj zanimati za lanena vlakna in jih uporabljati za izdelavo lahkih naravnih oblačil.

Stranski produkt pri proizvodnji lanenih vlaken – odpadni leseni deli stebela se uporabljajo za izdelavo ivernatih plošč, poznamo pa tudi toplotno izolacijske materiale iz lanenih vlaken. Prva uporaba dolgih lanenih vlaken kot ojačitvenega materiala se pojavi v času druge svetovne vojne, ko so uporabili laneno tkanino za armiranje fenolne smole za potrebe izdelave delov vojnega letala Spitfire. V zadnjem desetletju pa so se pričele intenzivne raziskave o uporabnosti lanenih vlaken za ojačevanje polimernih matric predvsem na področju avtomobilske industrije.

Rastlina lan spada v družino lanovk (lat. *Linaceae*), ki jo sestavlja 13 rodov in 300 različnih vrst. Za pridobivanje vlaken se goji vrsta *Linum usitatissimum typicum microspermum*, enoletna rastlina, ki uspeva na področjih z zmernim podnebjem in se trenutno goji predvsem v državah vzhodne Evrope, v Belgiji, Franciji, Nizozemski, Rusiji, Argentini, Kanadi in na Kitajskem. Lan gojijo tudi v Sloveniji na področju Bele krajine in v nekaterih državah bivše Jugoslavije.



Slika 4.16 in 4.17: Lan (*Linum Usitatissimum*)

Beseda *usitatissimum* pomeni »najbolj uporaben« in že v imenu dobro opiše široko uporabnost te rastline. V osnovi ločimo lan, ki se prideluje zaradi vlaken, in lan, ki se prideluje zaradi semen. Rastlini sta med seboj različni, saj ima slednji bolj groba vlakna in veliko več semen kot lan, ki se goji z namembnostjo pridobivanja vlaken. Lanena semena se zaradi njihovih visokih vlakninskih vrednosti uporabljajo v prehrabeni industriji. Znani so tudi poizkusi uporabe semen lanu za razvoj novih bio-polimernih matric, a se ta za enkrat niso izkazala kot najbolj primerna.

#### 4.3.1.1 Proizvodnja lanenih vlaken

Med največje proizvajalce lanenih vlaken spadajo Francija, Belgija, Nizozemska, Rusija in Kitajska. Celotne površine, namenjene gojenju lanu za pridobivanje vlaken, so ocenjene na približno 120000 ha v Evropi in 320000 ha v celem svetu. V letu 2007 je bilo v Evropski uniji proizvedenih 122000 ton lanenih vlaken, kar jo uvršča v sam vrh, sledi pa ji Kitajska s 25000 tonami proizvodnje. Kitajska je trenutno največji uvoznik neobdelanega lanu s povprečnim uvozom 60000 ton letno, pri čemer prihaja večina lanu iz Evrope. V zadnjih letih se je večji del proizvodnje lanenih tkanin preselil v vzhodno Evropo in na Kitajsko, vendar najbolj cenjeni proizvajalci visoko kvalitetnih lanenih tkanin ostajajo Irska, Italija in Belgija, predvsem zaradi najugodnejših klimatskih razmer in dolgoletne tradicije ter znanj, ki zagotavljajo najvišjo kvaliteto lanenih vlaken.

#### 4.3.1.2 Postopek pridobivanja vlaken

Lanena vlakna ločimo od ostalih delov stebela rastline z zaporedjem postopkov, ki so na kratko opisani v nadaljevanju, saj so od kvalitete in načina pridobivanja vlaken zelo odvisne končne mehanske lastnosti tkanine.



Slika 4.18: Godenje lanu v rosi

Za dobro končno nosilnost je pomembna čim večja dolžina vlaken. Največji izkoristek dolžine vlaken, ki potekajo od korenin do vrha rastline, se doseže tako, da rastline ne režemo, ampak jo mehansko pulimo oziroma ruvamo iz zemlje. Ruvanje se izvaja ročno ali strojno v času, ko rastlina še ne dozori popolnoma. Stebla se nato razvrsti po dolžini, debelini, barvi in zdravju rastline ter zloži v kopice, da dozori. Ta proces se imenuje sušenje lanu na polju. Ko je lan zadosti suh, se odstrani posušene plodove s smukanjem z ročnim smukalnikom ali na smukalnih strojih. Pred nadaljnjo obdelavo je potrebno s postopkom goditve odstraniti nevlaknate dele stebela, zlasti pektin parenhimskih srednjih lamel, ki povezuje vlakna z ličjem. Ločimo več različnih postopkov goditve:

- a) Biološki način brez dodajanja kemikalij: godenje se izvede pod vplivom glivic in bakterij tako, da se lanena stebela razprostre po polju (godenje v rosi) ali namaka v topli vodi (godenje v vodi), lahko pa se jih moči tudi v rekah in votlinah.

- b) Biološki način z dodajanjem kemikalij: s pomočjo sode bikarbone ( $\text{NaHCO}_3$ ),  $(\text{CaMg})\text{CO}_3$  in sečnine.
- c) Biološki načini z dodajanjem čistih kultur bakterij: Rossi postopek (aerobne bakterije *Bacillus Comessi Rossi*), karbonovo namakanje (anaerobne bakterije *Bacillus felsineus*), namakanje z zrnatimi bacili *Saccharobutyricus immobilis B* (kvaliteten, a drag postopek), godenje s komercialnim encimi (npr. *Rhizomocur pusillus ...*).
- d) Kemični način razklopa lanenega stebela: s pomočjo razredčene žveplove (VI) kisline, vodikovega klorida in dušikove (V) kisline z natrijevim hidroksidom in petrolejem.

Pri biološkem načinu godenja gre za niz biokemijskih reakcij, pri katerih delujejo mikroorganizmi in biokemijske snovi – encimi. Ti mikroorganizmi so prisotni že na samem lanu ali pa se vodi dodajajo čiste kulture gliv in bakterij. Med samim godenjem je pomembno uravnavanje temperature, da se doseže optimalne pogoje za razvoj fermentov, ki so potrebni za goditev. V začetni fazi goditve deluje encim pektinaza, ki razkrajja pektin. Na razkrojne produkte pektina deluje v končni fazi tudi saharaza, ki cepi depolimerizirane molekule pektina v organske kisline (mlečna, maslena in propionska kislina). Pri tem se razvijajo tudi plini, kot sta  $\text{CO}_2$  in metan. Zelo pomemben je čas goditve, ki običajno traja med tremi in sedmimi tedni. S pravilno izbiro časa se doseže ločitev le tehničnih vlaken od stebela, brez nevarnosti, da bi prišlo tudi do ločevanja elementarnih vlaken.

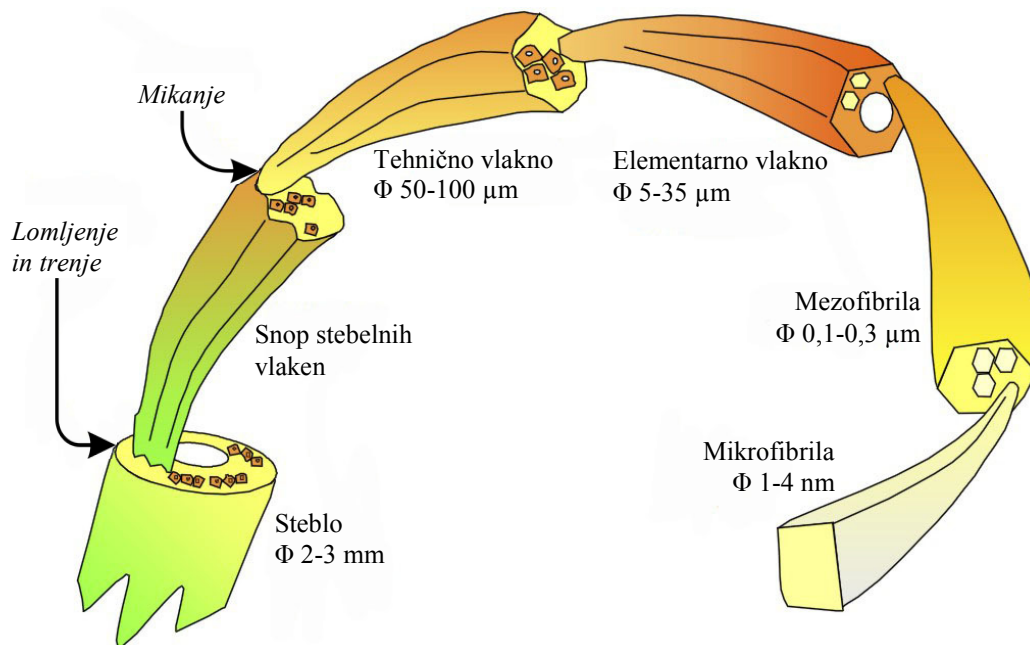
Kemični postopki za razklop lanenega stebela delujejo zelo hitro, a so relativno dragi. Poznamo veliko različnih postopkov, zanimivi pa so le tisti, ki so hitrejši od biološke goditve in dajejo bolj kvalitetna vlakna.

Godnost lanenih vlaken se ugotavlja na več načinov: z lomljenjem godenih stebel, z udrihanjem stebel po vodni gladini, s Kraisovo metodo ali z dinamometrično metodo.

Sušenje godene slame lahko poteka na prostem, v posebnih pečnicah ali v kanalskih in predalčnih sušilnicah. Nato se prične mehansko predelovanje godenih lanenih stebel – trenje, pri čemer se zlomi leseno jedro stebela. Sledi ročno ali strojno otepanje, kjer se iz vlaken odstranijo odpadli koščki lesa (pazder) ter ločijo krajša vlakna (tulovina) od daljših. Otepanju



sledi mikanje oziroma česanje lanu, kjer se odstranijo še zadnji ostanki pazderja in kratkih vlaken. Izčesana vlakna, pripravljena za tehnično predenje, se imenujejo hodnik oziroma tehnična vlakna.



Slika 4.19: Shematični prikaz sestave lanenega vlakna od stebela do mikrofibrile

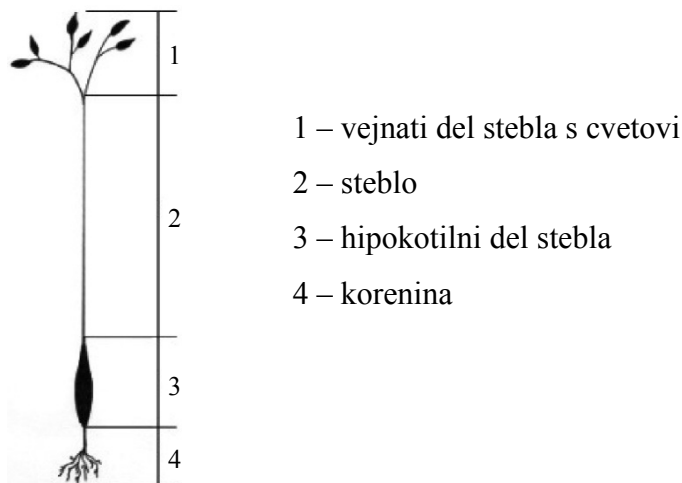
Celoten mehanski postopek otepanja lanu lahko poškoduje šibko povezanost pektina in lignina v vlaknih, zato raziskovalci za kasnejšo uporabo vlaken v kompozitih priporočajo postopek kemičnega razklopa lanenega stebela z uporabo encimske mešanice, ki omogoča večji nadzor nad procesom separacije in ekstrakcijo visoko kvalitetnih lanenih vlaken (Foult et al., 2004).

#### 4.3.1.3 Struktura lanenih vlaken

Kvaliteta lanenih vlaken je odvisna od klimatskih pogojev gojenja, postopkov pridobivanja vlaken in vrste lanene rastline. Vlakenati lan delimo po dolžini na:

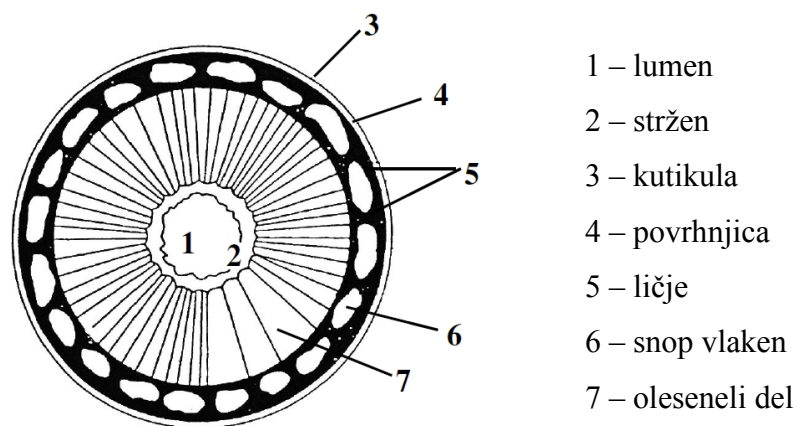
- kratke (20 – 60 cm),
- srednje (60 – 90 cm), in
- dolge sorte (90 – 150 cm).

Razmerje med dolžino stebela in njegovim premerom imenujemo vitkost lanu. Kot tehnično dolžino stebela označimo dolžino od tal do mesta, kjer se steblo razveja.



Slika 4.20: Lanena rastlina

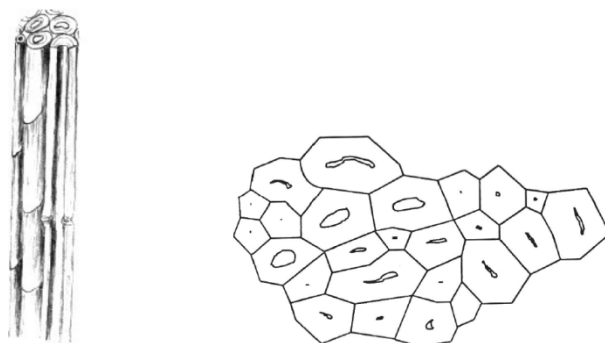
Vlakna so v snopih razporejena v obroč po obodu stebela med cvetom in korenino. Na zunanji strani stene stebela se nahaja povrhnjica (epidermis), ki ima na površini kutikulo in plast voska. Kutikula ima fine odprtine, ki omogočajo prodiranje bakterij pri godenju. Pod zunanjo steno se nahaja kambrij in pod njim olesenela plast. V sredini prereza vlakna se nahaja stržen (srž), ki zapira zračni prostor (lumen). Po prečnem prerezu obroča zunanje stene je enakomerno razporejenih okoli 40 snopov tehničnih vlaken, ki se razprostirajo po celotni dolžini stebela in so s steno močno povezana s pektinom (zunanjim pektinom). Tehnično vlakno v prečnem prerezu sestavlja 10–40 gosto zbitih elementarnih vlaken, ki so po dolžini med seboj povezana s t. i. notranjim pektinom.



Slika 4.21: Shematski prikaz prečnega prereza lanenega stebela.

Tehnično vlakno torej gradi veliko število elementarnih vlaken, ki jih je v enem tehničnem vlaknu lahko tudi prek 20 000. Dolžina vlakna je omejena z dolžino stebila rastline in običajno znaša okoli 90,0 cm. Finost tehničnih vlaken je odvisna od števila elementarnih vlaken v preseku in variira v širokem razponu od 10 do 250 dtex<sup>2</sup>.

Tehnično vlakno nima gladke površine, saj se iz njega štrleče odcepljajo elementarna vlakna. Na slikah 4.22 in 4.23 sta prikazani shemi vzdolžnega pogleda in prečnega prereza tehničnega lanenega vlakna.



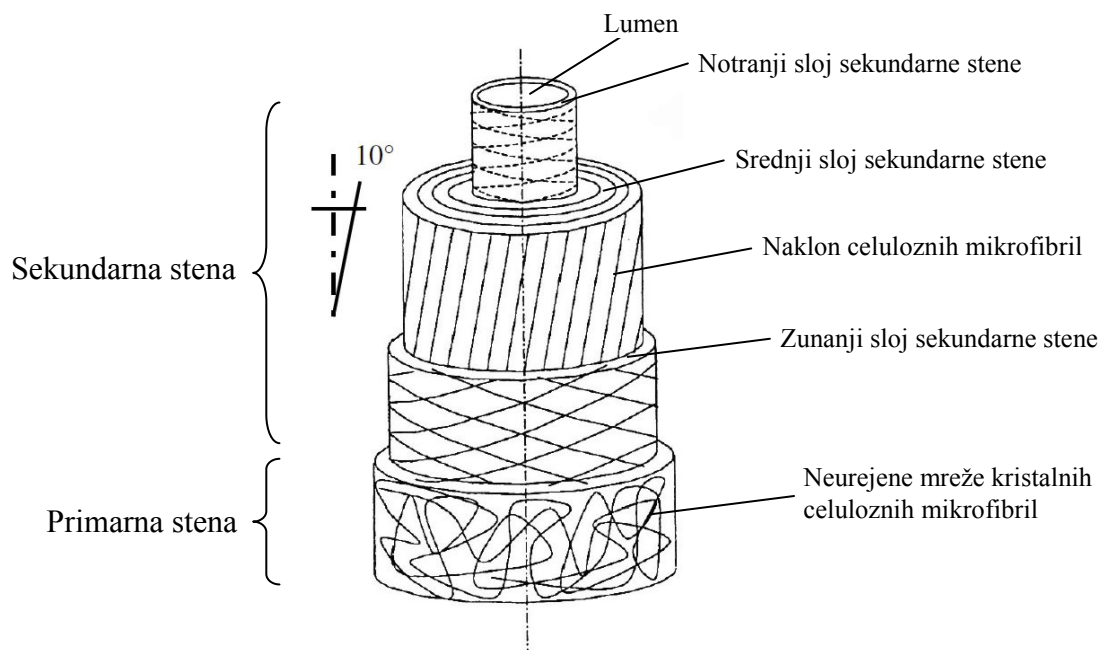
Slika 4.22 in 4.23: Tehnično vlakno: levo vzdolžni pogled, desno prečni prerez

Elementarna vlakna so vretenaste oblike, dolga med 2,0 in 5,0 cm in premera od 5,0 do 35,0  $\mu\text{m}$ . Pod mikroskopom lahko vzdolž vlaken opazimo karakteristična odebeljena mesta, prečne pregibe in zamike, ki so posledica mehanske obdelave. Ta mesta predstavljajo šibke točke vlakna. Elementarne celice lanu v prečnem prerezu so v začetni stopnji rasti rastline okrogle oblike, kasneje pa se preoblikujejo v poligonalno obliko s 3 do 7 robovi (slika 4.23), kar močno izboljša povezanost elementarnih vlaken. V spodnjem delu stebila so vlakna debelejša in krajša, v zgornjem pa tanjša in daljša.

Elementarno vlakno ali rastlinska celica je sestavljeno iz primarne in sekundarne celične stene ter lumna. Zunanja primarna stena je tanka in zgrajena iz mrežasto razporejenih fibril. Debelejša sekundarna stena je sestavljena iz več plasti, v katerih so celulozni fibrili

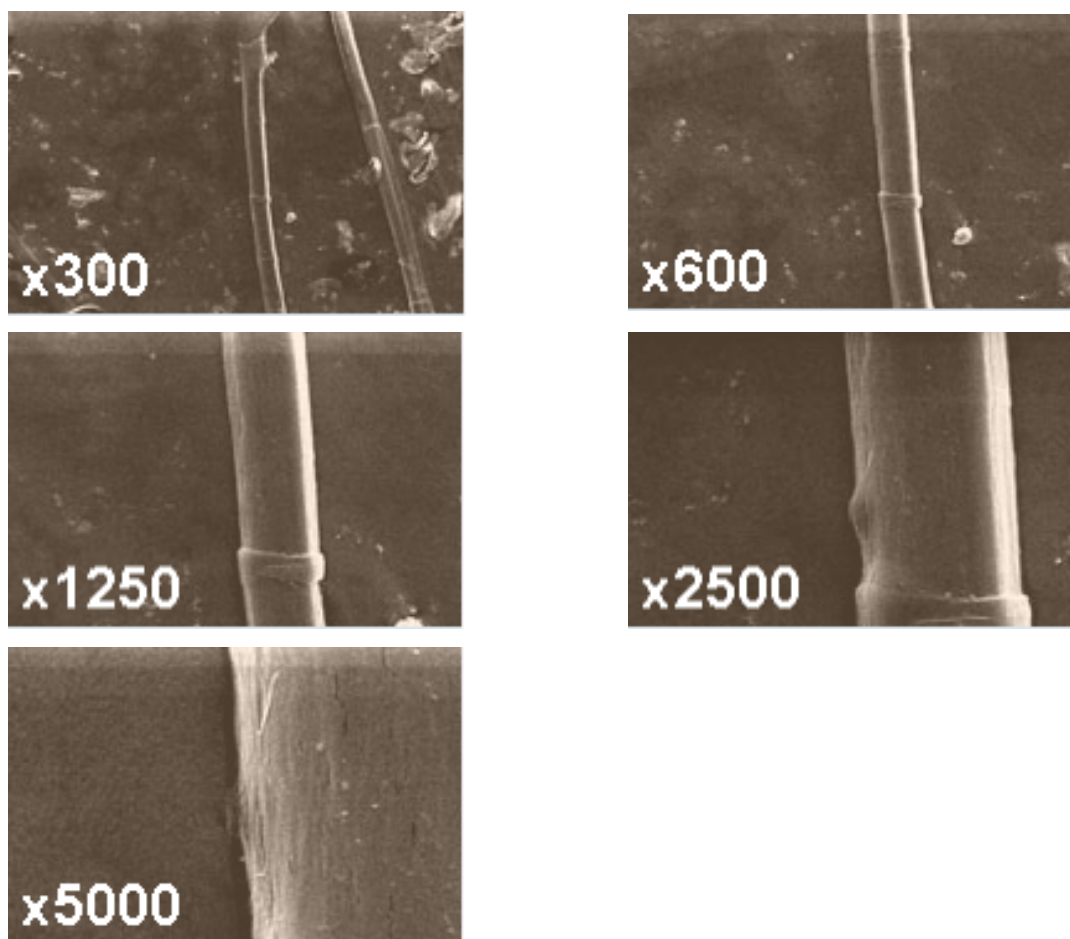
<sup>2</sup> dtex (deciteks) = 0,1 tex: Tex je merska enota za označevanje finosti tekstilnih vlaken in prej ter predstavlja maso 1000 metrov dolge preje v gramih (1tex = 1g/km).

helikoidalno nameščeni in nagnjeni pod različnimi koti glede na vzdolžno os vlakna. Zunanji sloj sekundarne stene je nagnjen pod kotom  $10^\circ$  glede na vzdolžno os, notranji pa pod kotom  $5^\circ$ . Ta značilna razporeditev slojev v elementarnem vlaknu – visoka orientacija fibril in visoka stopnja urejenosti strukture, zagotavlja elementarnim vlaknom lanu veliko trdnost, zaradi česar jih prištevamo med najtrša naravna vlakna.



Slika 4.24: Shematski prikaz slojev celuloze v elementarnem vlaknu

Na kvaliteto in izkoristek vlaken vpliva zgradba pramen in zgradba posameznih vlaken, ki je odvisna od vrste lanu, pogojev gojenja in položaja znotraj stebela. Kvaliteto vlaken lahko izračunamo na osnovi mikroskopske slike in jo izrazimo kot procentualni delež pramen vlaken glede na celotno površino prečnega prereza. Kvaliteto določata tudi oblika svežnjev, ki je lahko ovalna do ledvičasto zaokrožena, in oblika prereza elementarnih vlaken. Vlakna z neenakomerno sestavljenimi svežnji in ovalnimi elementarnimi vlakni spadajo med nekvalitetna, vlakna s poligonalno obliko elementarnih vlaken in debelo celično steno, od katere je odvisna trdnost vlakna, pa med visoko kvalitetna vlakna.



Slika 4.25: Laneno vlakno pod različnimi povečavami. Na sliki s 1250-kratno povečavo se dobro vidi prečni pregib, ki je posledica mehanske obdelave in predstavlja šibki člen lanenega vlakna.

#### 4.3.1.4 Kemična zgradba lanu

Lanena vlakna so sestavljena pretežno iz celuloze ter delno iz celulozi podobnih snovi, kot so hemiceluloza, lignin in pektin. V preglednici 4.2 je podana kemična zgradba lanenih ter jutinih in konopljinih vlaken.

Preglednica 4.2: Kemična sestava stebelnih vlaken lanu, jute in konoplje

Vlakno	Celuloza [%]	Hemiceluloza [%]	Pektin [%]	Lignin [%]	Voski [%]	Vlaga [%]
Lan	64,1	16,7	1,8	2,0	1,5	7,0
Konoplja	67,0	16,1	0,8	3,3	0,7	8,0
Juta	64,4	12,0	0,2	11,8	0,5	11,0

Visoka vrednost celuloze sicer zagotavlja dobre mehanske lastnosti vlakna, vendar pa povzroča tudi večjo absorpcijo vlage, saj se na površju celuloznih vlaken nahajajo reaktivne hidroksilne skupine. Te hidroksilne skupine so zelo hidrofilne, vendar tudi zelo dobro reagirajo z duroplastnimi smolami, kot so epoksi, poliester in vinilester. Kljub temu da je njihova reakcija s termoplastnimi smolami dokazano slabša, pa se je veliko raziskovalcev lanenih kompozitov vseeno orientiralo na impregniraje lanenih vlaken s termoplastnimi matricami zaradi njihove nižje cene ter lažje in za okolje manj obremenjujoče proizvodnje.

#### 4.3.1.5 Primerjava lanenih vlaken z umetnimi vlakni

Za boljšo predstavo o kvaliteti vlaken lahko primerjamo mehanske lastnosti naravnih vlaken z lastnostmi najbolj razširjenih steklenih E vlaken. Ugotovimo lahko, da so mehanske lastnosti elementarnih lanenih vlaken primerljive lastnostim steklenih vlaken. Največjo prednost izkazuje specifična teža lanenega vlakna, ki predstavlja le 56 % teže steklenega in je enaka specifični teži aramidnega vlakna. Natezna trdnost elementarnega vlakna lanu je v povprečju 700 MPa nižja od natezne trdnosti steklenega E vlakna običajne kvalitete, vendar če jo ocenimo relativno glede na težo vlakna ugotovimo, da je specifična natezna trdnost lanenega kar 20 % višja od natezne trdnosti steklenega E vlakna. Podobno opazimo, da ima stekleno vlakno v splošnem višji modul elastičnosti, vendar pa je specifični modul elastičnosti lanenega vlakna 30 % višji od modula steklenega vlakna. Porušna deformacija pri steklenih vlaknih sicer variira glede na njihov tip, a pri običajno uporabljenih steklenih vlaknih v gradbeništvu znaša 4,5 %, pri lanenih vlaknih pa 1,5 %, kar je ekvivalentno porušni deformaciji ogljikovega vlakna. Edina lastnost, ki ne deluje v prid lanenim vlaknom, je visoka afiniteta do absorpcije vlage, ki pa se z ustreznimi postopki površinske obdelave lahko zmanjša na zanemarljivo raven.

Preglednica 4.3: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih in lanenih vlaken.

Vrsta vlakna	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost [MPa]	Specifična natezna trdnost [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [GPa]	Specifični modul elastičnosti [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Porušna deformacija [%]
E-steklo	2,55	2200	863	70	27	4,5
Lan	1,45	1500	1034	50	35	1,5

Slabost naravnih vlaken je tudi, da ne moremo vedno pridobiti vlaken natanko enakih mehanskih lastnosti, saj je njihova kvaliteta odvisna od kakovosti in okoljskih pogojev njihovega pridobivanja. Najkvalitetnejša lanena vlakna je moč pridobiti iz lanu, vzgojenega v evropskih pokrajinah, kjer je tudi postopek obdelave rastlin in pridobivanja vlaken najbolj dovršen.

#### 4.3.1.6 Zaključek

Lanena vlakna se s svojimi konkurenčnimi mehanskimi lastnostmi izkažejo kot najprimernejša naravna vlakna za ojačevanje polimernih matric. Poleg tega je njihovo pridobivanje preprosto, okolju prijazno in dovolj natančno raziskano. Zaradi svoje dolgoletne tradicije v tekstilni industriji so bila lanena vlakna sprva nekoliko spregledana na področju ojačevanja polimernih matric, vendar se z rezultati zadnjih preiskav to spreminja. Lanena vlakna so namreč po svojih mehanskih lastnostih primerljiva steklenim, v nekaterih specifičnih karakteristikah pa pred njimi celo prednjačijo. Dejstvo, da je gojenje lanu zelo razširjeno v Evropi, kjer se izvaja največ raziskav s področja biokompozitov, pa napoveduje razvoj bolj izpopolnjenih postopkov pridobivanja in obdelave vlaken, ki bodo zagotavljali še kvalitetnejše ojačitvene materiale.

#### 4.3.2 Konopljina vlakna

Industrijska konoplja (*Cannabis sativa*) je rastlina iz rodu konopelj (*Cannabis*), ki spada v družino konopljevok (*Cannabaceae*). Vzgaja se predvsem zaradi vlaken in semen, ki vsebujejo približno 30 odstotkov olj. Zaradi podobne oblike listov se pogosto zamenjuje z drugo podvrsto konoplje, ki se vzgaja kot surovina za drogo. Čeprav obe rastlini pripadata istemu rodu, industrijske konoplje ne moremo izkoriščati kot droge, saj vsebuje manj kot 1 % opojne spojine THC (delta-9-tetrahidrokanabinola), medtem ko ga vrsta *Cannabis Indica* ali indijska konoplja, ki se goji za drogo, vsebujejo 5–20 %.



Slika 4.26 in 4.27: Industrijska konoplja (*Cannabis sativa*)

Konopljina vlakna so vedno igrala pomembno vlogo v tehnološki in kulturni zgodovini človeštva. Že leta 2800 pred našim štetjem so na Kitajskem delali prve vrvi iz konopljinih vlaken. Vemo tudi, da je bil iz konopljinih vlaken narejen prvi papir leta 100 pr.n.št., prav tako na Kitajskem. Od začetka srednjega veka in vse do konca 19. stoletja je konoplja igrala pomembno vlogo v trgovini s poljedelskimi pridelki v evropskih državah. Glavni produkti so bili konopljine niti, vreče, vrvi, platna, jadra in razni tekstilni izdelki.

Danes so glavne svetovne pridelovalke konoplje Kitajska, Kanada in Evropa. V letu 2008 je celotno področje, namenjeno za gojenje konoplje v Evropski uniji, znašalo okoli 15000 ha, in napovedi predvidevajo, da bo v letu 2009 naraslo na 18000 ha (aktualni podatki o dejanskem stanju v trenutku nastajanja naloge še niso bili na voljo). Ta področja trenutno proizvedejo 24000 ton konopljinih vlaken, številka pa se bo ob predpostavljenem povečanju površin zvišala na 29000 ton. Pri tem velja omeniti, da so vsi deli rastline, tako vlakna kot tudi oleseneli deli stebela in prah, ki nastane pri obdelavi, uporabni v industrijski proizvodnji. Glavne proizvajalke konoplje v Evropi so Francija, Velika Britanija, Nemčija, Nizozemska in Poljska. Industrija pridobivanja konopljinih vlaken je torej dobro razvita in razširjena, tako da ni večjih ovir za pridobivanje vlaken za uporabo v najrazličnejše namene, npr. izdelavo toplotnih izolacij, peletov, granul in različnih ojačitev za kompozite.

Vlakna evropske konoplje so trenutno namenjena zgolj za tehnično uporabo, kot na primer za izdelavo specialnega papirja (cigaretni papir, tehnični filtri), izolacijskih materialov, z naravnimi vlakni ojačenih polimernih matric (proizvodi za avtomobilsko industrijo in



proizvodi za končnega uporabnika – kovčki, igrače, stoli ...) in agrotekstila. Največji porast trga konopljinih produktov se kaže prav na področju toplotnih izolacij in kompozitnih materialov. Po drugi strani pa predvsem Kitajska in Kanada kažeta povečan interes pri razvoju obdelave konopljinih vlaken za tkanje v tekstil, ki bi po svoji kvaliteti lahko nadomestila bombažna vlakna.

Večji problem se pojavi pri dobavi tehničnih konopljinih tkanin. V svoji preiskavi sem sprva želel primerjati tudi ojačitev s tkanino iz konopljinih vlaken, vendar se je pojavil velik problem pri dobavi take tkanine. Dejstvo je, da dobavljivost konopljinih vlaken za tkanje ni konstantna in zato evropske tkalnice v večini ne tkejo tkanin iz teh vlaken. Bolj razširjene so tkalnice konoplje na Kitajskem, vendar je kvaliteta, in predvsem kontrola kvalitete, tam na nižji ravni. Ne ukvarjajo se namreč s tkanjem tehničnih tkanin, ampak zgolj s proizvodnjo za tekstilno industrijo. V Evropi sicer lahko dobimo konopljino tkanino preko raznih posrednikov, ki jo imajo na zalogi, vendar so te zaloge omejene, kvaliteta neznana, prav tako pa ne morejo zagotoviti ponovne oz. konstantne dobave produktov enake kvalitete, niti enakega tipa. Preko posrednikov je tako praktično nemogoče dobiti ponovno dobavo blaga enake kvalitete tkanja in vlaken, kot je bila predhodna pošiljka. Poleg tega so cene tkanin pri posrednikih vsaj desetkrat višje kot pri proizvajalcih. Zaradi teh ovir sem se odločil v svojih preiskavah uporabljati le tkanine iz lanenih vlaken.

#### **4.3.2.1 Proizvodnja konopljinih vlaken**

Konoplja raste v zmerno toplem podnebju in jo vsako leto znova vzgojijo iz semen. Zraste do višine 5 metrov. Posevki, namenjeni pridobivanju vlaken, so posejani gosto, zrastejo 2–3 m visoko in so malo razvejani. Rastline, gojene za semena, pa so posejane bolj poredko in so močno razvejane. Vitka stebela so, razen na vrhu in ob tleh, votla. Listi so sestavljeni in so dlanaste oblike, cvet pa je majhen ter zeleno-rumene barve.



Slika 4.28: Žetev konoplje

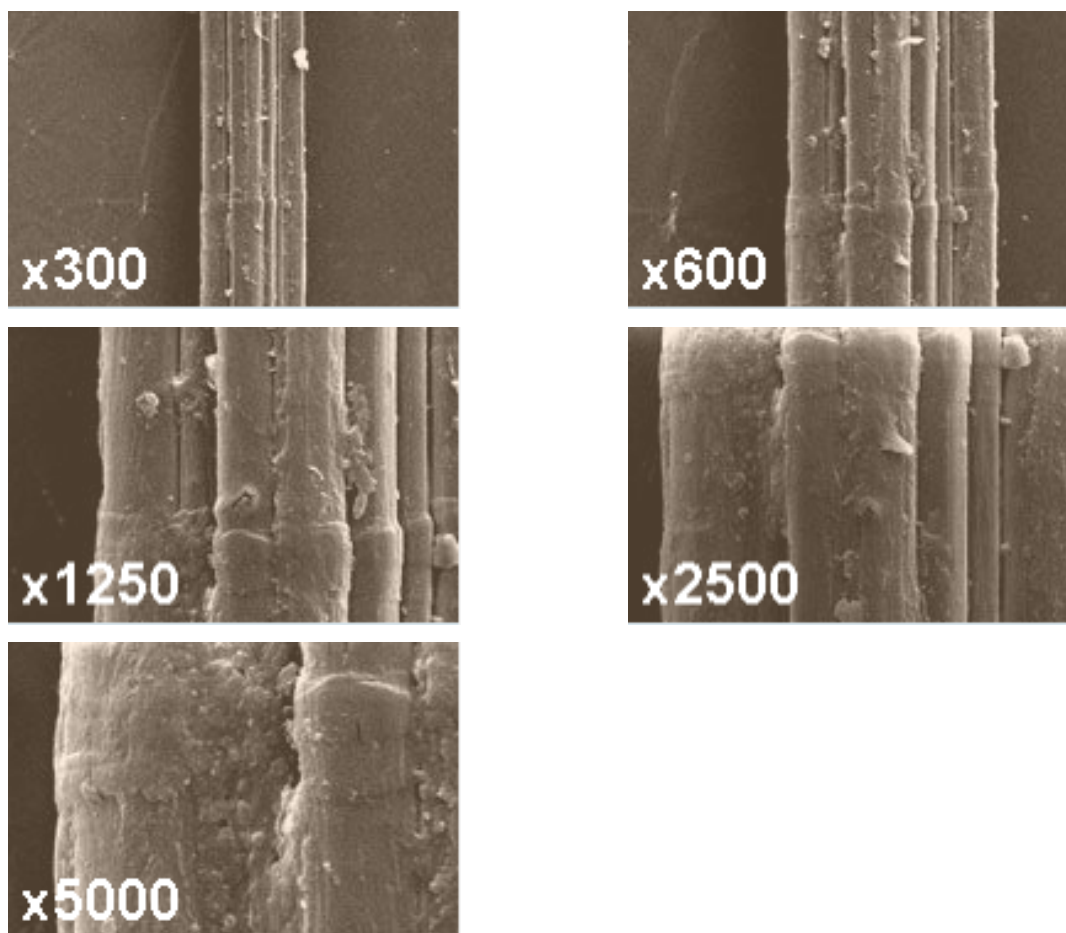
Posevki uspevajo najbolje na peščenih ilovnatih tleh in potrebujejo mesečno povprečno 65,0 mm padavin. Maksimalni donos in kvaliteta se dosežeta z žetvijo takrat, ko so rastline odrasle (v polnem cvetu). Včasih so rastline pulili ročno, danes pa se strojno odrežejo 2–3 cm nad tlemi. Vlakena se pridobijo z zaporedjem postopkov, kot so defolizacija, sušenje in mletje ter separacija vlaken in lesnega dela stebela. Produkt so dokaj ravna vlakna, običajno dolga več kot 1,8 m, sestavljena iz niza posameznih cilindričnih celic z neravno površino – elementarnih vlaken. Vlakna so daljša in bolj upogljiva kot lanena in so rumenkaste do temnorjave barve.

Kar zadeva ekološko sprejemljivost, je že skupna poraba energije za proizvodnjo steklenih vlaken več kot 10-krat višja od skupne porabljene energije pri proizvodnji konopljinih vlaken. Poleg tega so izpusti CO<sub>2</sub> pri proizvodnji steklenih 10-krat višji kot pri proizvodnji konopljinih vlaken.

#### **4.3.2.2 Postopek pridobivanja vlaken**

Postopek pridobivanja konopljinih vlaken je precej podoben postopku, uporabljenem pri lanenih rastlinah. Prav tako si običajno sledijo postopki smukanja, godenja in trenja. Po žetju in smukanju je potrebno razgraditi rastlinski klej pod vplivom glivic in bakterij s postopkom godenja. Nato se z otepavanjem odstrani pazder, s čimer dobimo otepena konopljjina vlakna, ki jih lahko s postopkom mikanja pripravimo za tehnično predenje.

Z ustreznim postopkom pridobivanja dobimo dolga, močna in trpežna vlakna, ki so odporna na ultravijolično svetlobo in imajo naravne antibakterijske lastnosti.



Slika 4.29: Konopljino vlakno pod 300, 600, 1250, 2500 in 5000-kratno povečavo

#### 4.3.2.3 Mehanske lastnosti

Struktura konopljinega vlakna je zelo podobna strukturi lanenega, ki je prikazana na sliki 4.19. Premer konopljinega vlakna meri od 16 do 50  $\mu\text{m}$ , premer mikrofibril pa 5 do 50 nm. Tudi po kemijski sestavi je konopljino vlakno zelo podobno lanenemu, sestavljeno je iz 65–88 % celuloze ter 3–4 % lignina. Visok delež celuloze in nizek delež lignina vpliva na veliko nagnjenost vlaken k absorbiranju vlage. Prav tako kot pri lanenih vlaknih se tudi pri konopljinih pojavi problem hidroksilnih skupin, ki se nahajajo na površju vlaken in tako zvišujejo njihovo hidrofilnost. Te težave je mogoče rešiti z različnimi kemijskimi obdelavami vlaken. Za eno najprimernejših se je izkazal postopek alkalizacije z natrijevim hidroksidom.

Ob primerjavi konopljinih vlaken s steklenimi lahko ugotovimo, da imajo oboja dokaj podobne mehanske lastnosti. Specifična teža konopljinih vlaken predstavlja 58 % specifične teže steklenih. Specifična natezna trdnost je 30 % manjša, specifični modul elastičnosti 75 % višji, porušna deformacija konopljinih vlaken pa je 2,9 % nižja in je primerljiva s porušno deformacijo ogljikovih vlaken. Pri vrednosti elastičnega modula je potrebno omeniti, da se podatki iz različnih virov zelo razlikujejo in je v resnici elastični modul morebiti nekoliko nižji. Šibka stran konopljinih vlaken je težnja k absorpciji vlage, ki jo je z ustrezno obdelavo vlaken mogoče zmanjšati na sprejemljivo vrednost.

Preglednica 4.4: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih in konopljinih vlaken

Vrsta vlakna	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost [MPa]	Specifična natezna trdnost [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [GPa]	Specifični modul elastičnosti [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Porušna deformacija [%]
E-steklo	2,55	2200	863	70	27	4,5
Konoplja	1,48	900	608	70	47	1,6

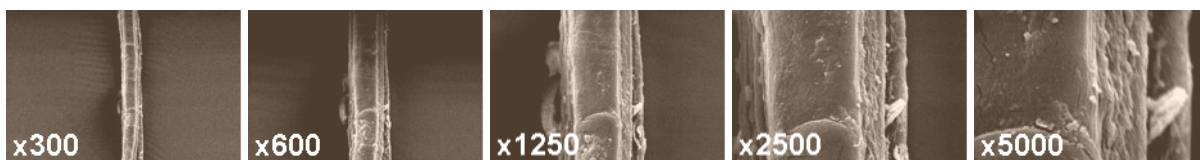
#### 4.3.2.4 Zaključek

Konopljina vlakna imajo dobre mehanske lastnosti, ki so primerljive z mehanskimi lastnostmi steklenih vlaken. Prav tako kot lan tudi konoplja dobro uspeva v evropskih klimatskih razmerah. Velik problem pri popularizaciji konopljinih vlaken predstavljajo zakonske ovire, saj je za vzgajanje konoplje potrebno pridobiti posebna dovoljenja, polja je potrebno opremiti z ustreznimi napisi in jih ograditi, poleg tega pa mora pridelovalec konoplje imeti že v naprej potrjeno naročilo za določeno količino pridelka. Te omejitve so nastale kot posledica prepovedi gojenja marihuane, konoplje, ki se pridobiva zaradi opojnih učinkovin. Številne omejitve preprečujejo širjenje konopljinih produktov v Evropi, in v kolikor ne bo prišlo do sprememb na področju zakonodaje, naj bi po nekaterih študijah gojenje konoplje v Evropi zamrlo v naslednjih petih letih. Po drugi strani pa naraščajoče število raziskav na področju biokompozitov s svojimi pozitivnimi rezultati predstavlja upanje za povečanje povpraševanja po naravnih vlaknih v industriji, med katerimi je konopljino še posebej zanimivo.

### 4.3.3 Jutina vlakna

Juta se pridobiva iz ličja jutovca (*Corchorus capsularis*), enoletne tropske rastline iz družine lip. Največji pridelovalci jute so azijske države Indija, Bangladeš, Kitajska, Burma in Nepal. Uporaba jute ima sicer dolgo zgodovino, a pravi preporod se je zgodil med industrijsko revolucijo, ko so vreče iz jute popolnoma nadomestile do tedaj uporabljane vreče iz lanu in konoplje ter še danes predstavljajo glavni proizvod iz jutinih vlaken. V avtomobilski industriji uporaba jutinih vlaken sega že v leto 1940, do pravega razvoja pa je prišlo po uveljavitvi prepovedi uporabe kompozitov iz stekleni vlaken, ki so jih nato uspešno nadomestili kompoziti, ojačeni z jutinimi in drugimi naravnimi vlakni. Danes se juta uporablja v papirni industriji, za ojačitev polimernih matric v avtomobilski industriji, kot netkano tehnično blago ter kot geotekstil za preprečevanje erozije tal.

Jutina vlakna vsebujejo 60–65 % celuloze, 12–16 % hemiceluloze, 11–14 % lignina in ostale komponente, kot so pektin, maščobe, voda in olja. Premer vlaken se giblje med 40 in 80 mikrometri, kar posledično vpliva na različno natezno trdnost vlaken, ki se giblje med 450 in 1000 MPa.



Slika 4.30: Jutino vlakno pod 300, 600, 1250, 2500 in 5000-kratno povečavo

#### 4.3.3.1 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti so v veliki meri odvisne od premera vlaken ter trajanja temperaturne obdelave. Tako lahko natezna trdnost variira od 330 MPa pri premeru vlakna 53,20  $\mu\text{m}$  do 1210 MPa pri premeru vlakna 19,60  $\mu\text{m}$ . Podobno se spreminja natezni modul, in sicer od vrednosti 16,80 MPa pri premeru 53,20  $\mu\text{m}$  do 27,00 MPa pri 19,60  $\mu\text{m}$  debelem vlaknu. Težavo predstavlja tudi velika poroznost vlaken, ki povzroča precej veliko tendenco k absorbiranju vlage, kar pa je neugodno pri ojačevanju polimernih matric. Ko vlakna vpijejo vlago, nabreknejo, ko pa vlaga izhlapi, se volumen vlaken zmanjša, kar povzroči porušitev

stika med vlaknom in polimerno matrico. Posledica je zmanjšanje natezne trdnosti in modula elastičnosti kompozita tudi do 25 %. Z ustreznimi površinskimi obdelavami vlaken lahko ta učinek omilimo. Za najprimernejše obdelave so se izkazale obdelave z akrilnimi kislinami, silikati, poliester-amidi in polivinil acetati. Detajlni vpogled v principe teh postopkov je opisan v obširni literaturi in presega okvire te naloge.

Preglednica 4.5: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih in jutinih vlaken.

Vrsta vlakna	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost [MPa]	Specifična natezna trdnost [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [GPa]	Specifični modul elastičnosti [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Porušna deformacija [%]
E-steklo	2,55	2200	863	70	27	4,5
Juta	1,30	800	615	27	21	1,1

#### 4.3.3.2 Zaključek

Juta je ena najugodnejših surovin, ki jih lahko uporabljamo za ojačevanje polimernih matric. Vendar karakteristike jutinega vlakna onemogočajo doseganje visokih nosilnosti, ki so potrebne v gradbeništvu. Najbolje se izkažejo ojačitve polimernih matric s kratkimi, netkanimi jutinimi vlakni pri uporabi v nenosilnih elementih, kot so notranje obloge v avtomobilskih vratih ipd. Matrice, ojačene z vlakni, stkanimi v tkanine, pa ne izkazujejo zadostne nosilnosti, da bi konkurirale ojačitvam iz lanenih in konopljinih vlaken.

#### 4.3.4 Sisalova vlakna

Sisalova vlakna pridobivajo iz listov rastline agave (*Agave sisalana*), ki je razširjena v tropskih in subtropskih podnebjih po celem svetu. Največ vlaken pridelajo v državah Brazilija, Kitajska, Kuba, Kenija, Haiti, Madagaskar in Mehika. Agava uspeva v zelo različnih vročih podnebnih razmerah, tudi tako suhih, da tam ne uspeva nobena druga kultura. Sisal se tradicionalno uporablja za izdelavo niti in vrvi, vendar ga na tem mestu vse bolj nadomešča polipropilen. Danes sisal uporabljajo predvsem za izdelavo specialnega papirja, filtrov, geotekstila, preprog in tapet. Iz sisala so večinoma narejene tudi tarče za pikado. Uporaba sisalovih vlaken za ojačitev polimernih matric je razširjena predvsem za izvedbo

nenosilnih delov v avtomobilski industriji ter za izdelavo pohištva. Zelo obetajoče področje uporabe se kaže pri nadomeščanju azbesta v zavornih ploščicah.



Slika 4.31: Sisalovo vlakno pod 300, 600, 1250, 2500 in 5000-kratno povečavo

#### 4.3.4.1 Mehanske lastnosti

Sisalova vlakna so lesketajoče kremasto bele barve ter merijo v dolžino do 1,20 metra. Premer vlaken se giblje med 200 in 400 mikroni. Vlakno je grobo ter trdo in ni primerno za izdelavo oblačil. Je zelo močno, trpežno, duktilno in manj dovzetno za absorpcijo vlage. Odporno je na razjedanje, ki ga povzroča slana voda, in ima površinsko strukturo, ki je zelo primerna za obdelavo z različnimi barvami in impregnacijami. Sisal se kot ojačitev polimerne matrice najpogosteje uporablja pri izdelavi pohištva, saj nima tako izrazitega vonja kot lan in konoplja. Še zlasti za lan je značilno, da pri izdelavi kompozita pri višjih temperaturah sprošča izrazit vonj.

Mehanske lastnosti sisalovih vlaken so sicer slabše od lastnosti steklenih vlaken, a jim njihova nizka cena, ekološka neoporečnost in majhna teža deluje v njihov prid.

Preglednica 4.6: Primerjava mehanskih lastnosti steklenih vlaken in vlaken sisala

Vrsta vlakna	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost [MPa]	Specifična natezna trdnost [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [GPa]	Specifični modul elastičnosti [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Porušna deformacija [%]
E-steklo	2,55	2200	863	70	27	4,5
Sisal	1,21	700	583	38	31	2,5

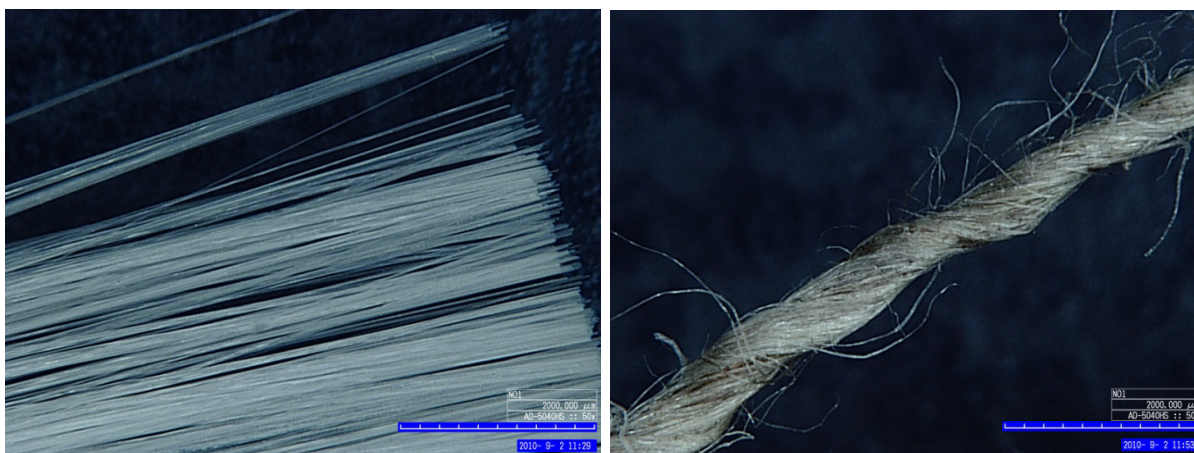
#### 4.3.4.2 Zaključek

Zaradi visokih mehanskih lastnosti so sisalova vlakna ustrezna za ojačevanje polimernih matric, vendar zaostajajo za lanenimi. Sisalova vlakna bi lahko prišla v ospredje v geografskih

območjih, kjer lan in ostale kulture ne uspevajo, saj je agava razširjena predvsem v tropskih in suhih podnebjih. Dobra stran teh vlaken pa je tudi njihova majhna specifična teža, saj so lažja od vseh predhodno naštetih vlaken.

#### 4.4 Primerjava mehanskih lastnosti naravnih in umetnih vlaken

V nasprotju s kontinuiranimi umetnimi vlakni naravna že sama po sebi predstavljajo kompozit. Zato se na področju impregniranja naravnih vlaken s polimernimi matricami pojavljajo nove težave in tehnološke ovire, ki jih je potrebno premostiti, da lahko v celoti izkoristimo mehanske lastnosti naravnih vlaken.



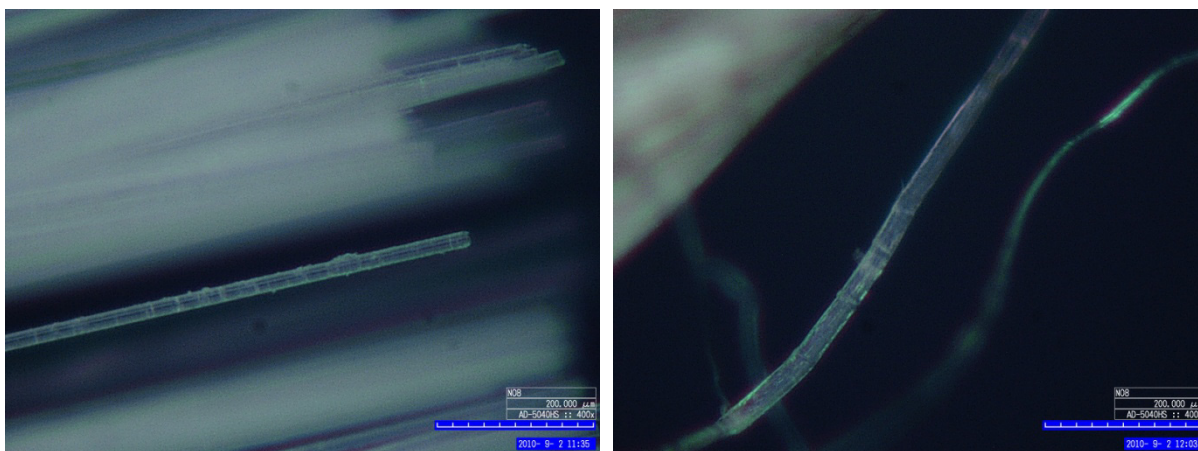
Slika 4.32 in 4.33: Levo: Razprostrta nit steklenih vlaken (50-kratna povečava). Desno: Nit lanene tkanine, vidijo se odcepljajoča se lanena vlakna (50-kratna povečava).

Kljub temu da večina omenjenih naravnih vlaken izkazuje mehanske lastnosti, zelo primerljive lastnostim steklenih vlaken, je za uporabo v gradbeništvu primernih le malo. V gradbenih konstrukcijah prihaja do velikih sil, za prenos katerih je pomembna izredno velika nosilnost vlaken. Tako veliko nosilnost pa z večino naravnih vlaken težko dosežemo. Za najprimernejše se izkaže laneno vlakno, ki je bilo tudi podrobneje analizirano.

Prednost umetnih vlaken je tudi v njihovi biološki neobčutljivosti, trajnosti in majhni poroznosti. Seveda pa imajo eno veliko slabost – so ekološko obremenjujoča. Zato je smiselno, da se tudi v gradbeništvu skušamo v primeru uporabe sonaravnih materialov, kot je les, polasčati sonaravnih sanacijskih metod, kot je ojačevanje z naravnimi vlakni.



Na spodnji mikroskopski sliki steklenega in lanenega vlakna pri 400-kratni povečavi lahko opazimo, da je stekleno vlakno konstantnega prereza, laneno pa variira v debelini prereza in je proti konci vlakna vedno tanjše. Pomembna je tudi razlika v dolžini vlaken, saj so steklena praktično neskončna (omejena so le z dolžino aplikacije), lanena pa so omejena z dolžino rastline in običajno merijo okoli 90,0 cm. Zato se morajo prepletati v nit oziroma prejo, ki vlakna povezuje, s čimer se zagotavlja prenos sil med posameznimi vlakni. Na slikah 4.32 in 4.33 se vidi razlika v pleteni niti lanenih vlaken in stekleni niti z vzporednim potekom vlaken.



Slika 4.34 in 4.35: Levo: Vlakno steklene tkanine pri 400-kratni povečavi. Desno: Vlakno lanene tkanine pri 400-kratni povečavi.

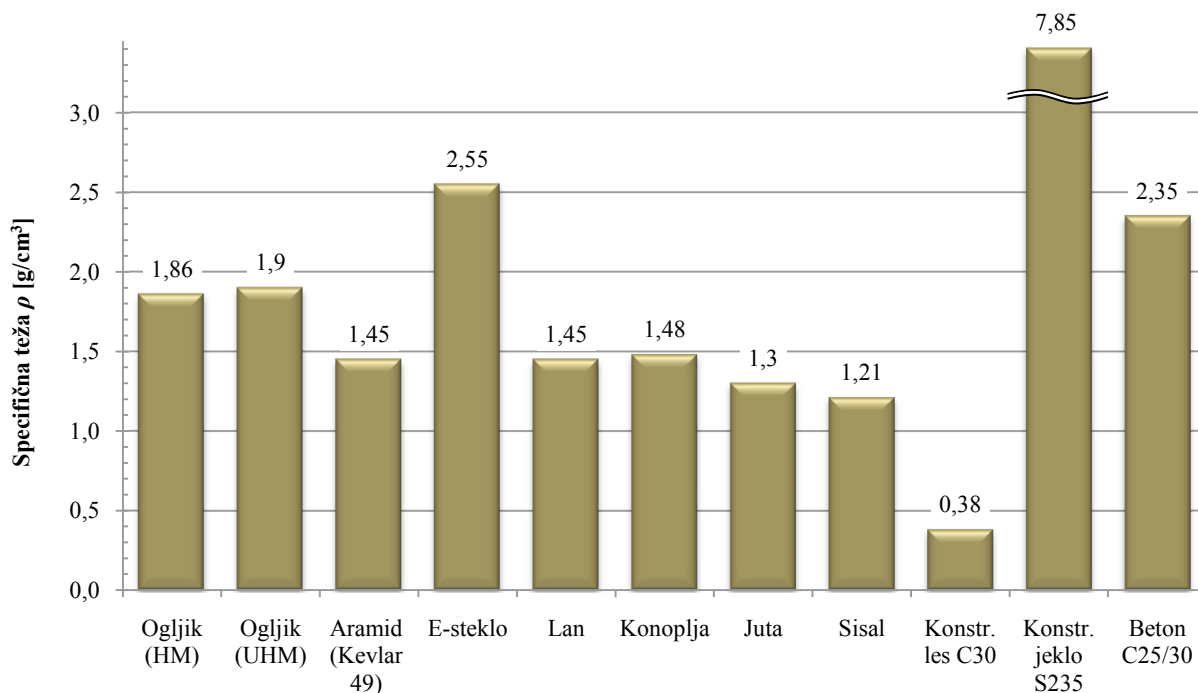
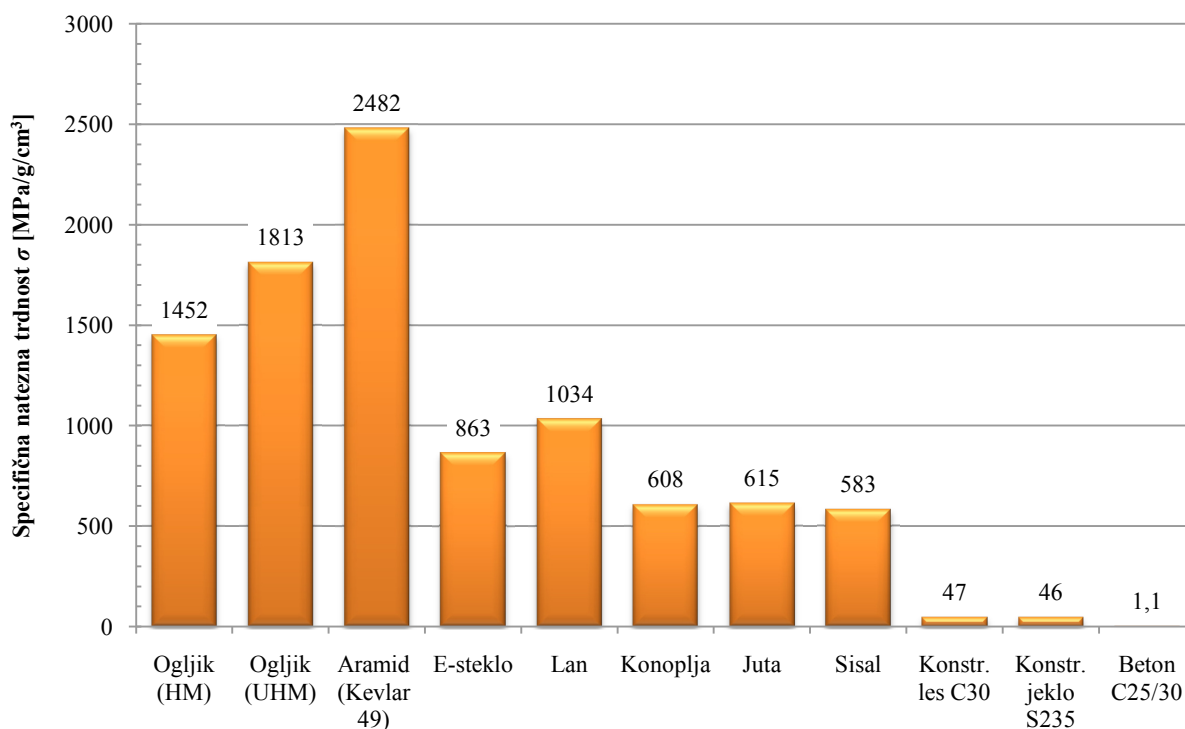
Za realno primerjavo mehanskih lastnosti materialov z različno specifično težo in elastičnimi moduli je potrebno primerjati njihove specifične mehanske lastnosti. Specifične mehanske lastnosti so lastnosti materiala, deljene z njegovo specifično težo. Tako dobimo relativno vrednost določene lastnosti, ki jo potem lahko enakovredno primerjamo med različnimi materiali. V nadaljevanju je prikazana preglednica z mehanskimi in specifičnimi mehanskimi lastnostmi predhodno obravnavanih vlaken. Za boljšo predstavbo pa so dodane mehanske lastnosti še treh klasičnih materialov, ki se uporabljajo v gradbeništvu; lesu, jekla in betona. Za te tri materiale so vzete karakteristične vrednosti mehanskih lastnosti, kot jih priporoča standard Evrokod.

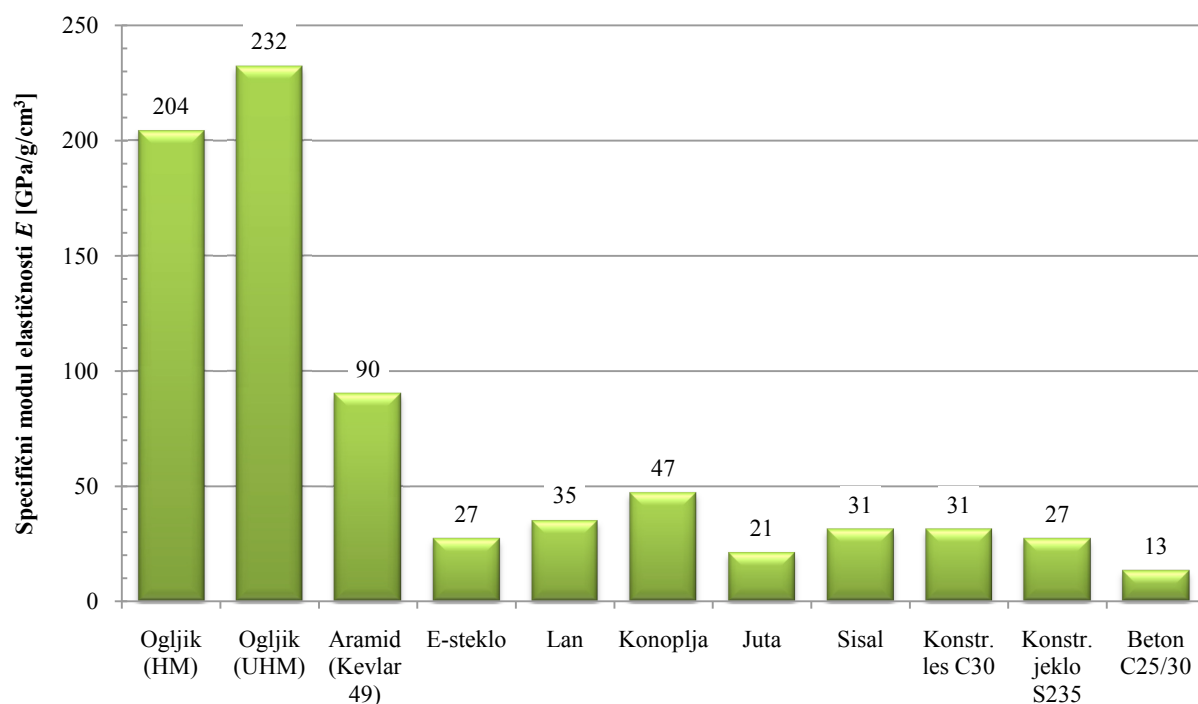
Preglednica 4.7: Preglednica mehanskih lastnosti naravnih in umetnih vlaken

Vrsta vlakna oz. material	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost [MPa]	Spec. natezna trdnost [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [GPa]	Spec. modul elastičnosti [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Porušna deformacija [%]
Ogljik (HM)	1,86	2700	1452	380	204	1,4
Ogljik (UHM)	1,90	3445	1813	441	232	0,8
Aramid (Kevlar 49)	1,45	3600	2482	131	90	2,8
E-steklo	2,55	2200	863	70	27	4,5
Lan	1,45	1500	1034	50	35	1,5
Konoplja	1,48	900	608	70	47	1,6
Juta	1,30	800	615	27	21	1,1
Sisal	1,21	700	583	38	31	2,5
Konstrukcijski les C30	0,38	18	47	12	31	0,8
Konstrukcijsko jeklo S235	7,85	360	46	210	27	30
Beton C25/30	2,35	2,6	1,1	31	13	-

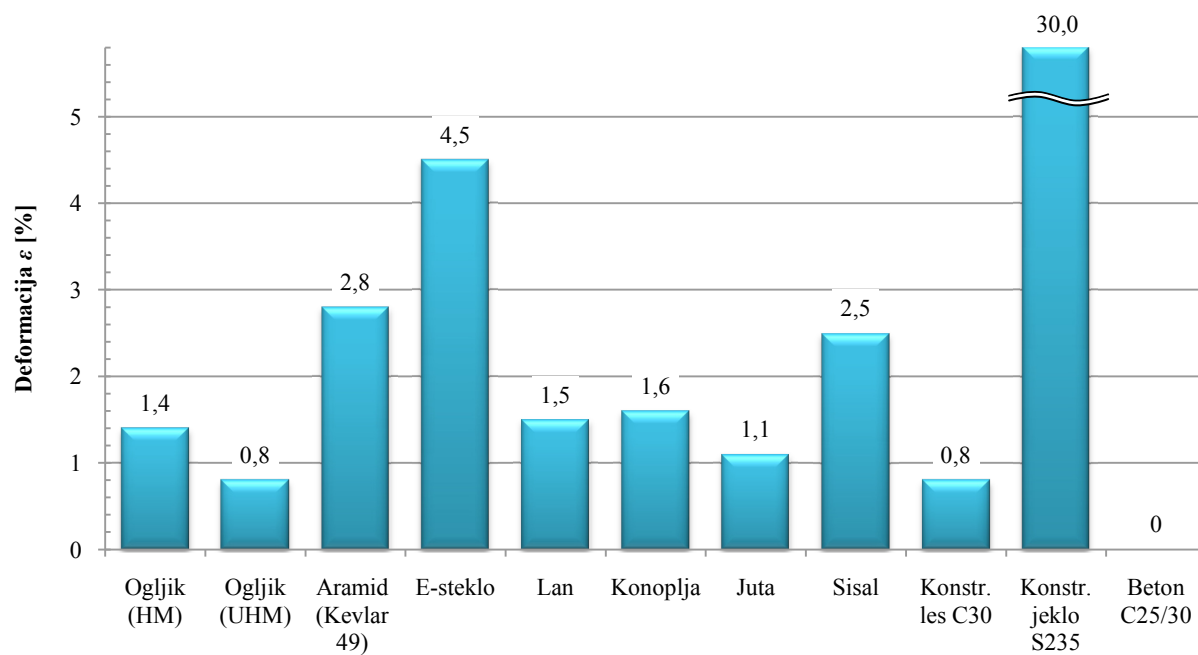
Ob navedenih podatkih velja omeniti, da se izmerjene vrednosti lahko v različnih virih precej razlikujejo, saj pri umetnih vlaknih igra veliko vlogo kakovost izdelave in hrambe vlaken, pri naravnih vlaknih pa je moč zaslediti še večja odstopanja izmerjenih količin, saj so lastnosti zelo odvisne od dolžine in debeline vzorca, ki pa se pri različnih avtorjih običajno precej razlikuje. V tej diplomski nalogi so upoštewane vrednosti, ki so se avtorju na podlagi pregledane literature zdele najbolj merodajne v smislu pravilnega poteka preiskav in večkratne ponovljivosti rezultatov pri različnih preiskavah.

V nadaljevanju so prikazani diagrami specifične teže, specifične natezne trdnosti, specifičnega modula elastičnosti in porušne deformacije za predhodno obravnavane materiale.

Slika 4.36: Primerjava specifičnih tež [g/cm<sup>3</sup>]Slika 4.37: Primerjava specifičnih nateznih trdnosti [MPa/g/cm<sup>3</sup>]



Slika 4.38: Primerjava specifičnih elastičnih modulov [GPa/g/cm³]



Slika 4.39: Primerjava porušnih deformacij [%]

## 5 PREGLED IN PRIMERJAVA UPORABLJENIH MATERIALOV

### 5.1 Uvod

Uporaba tkanin iz umetnih vlaken za ojačevanje gradbenih konstrukcij s kompoziti je že dobro uveljavljena tako na področju sanacij kot tudi novogradenj posebnih in zahtevnih objektov. Zaradi visoke cene pridobivanja kvalitetnih umetnih vlaken pa se že razvita tehnologija uporablja le za posebne primere, kjer izrazito visoke mehanske lastnosti kompozitnih materialov močno prednjačijo pred klasičnimi gradbenimi pristopi. Ob pospešenih raziskavah na področju naravnih kompozitov v zadnjem desetletju in izpopolnjeni tehnologiji obdelave vlaken, zaradi česar so ta trajnejša in dosegajo višje mehanske lastnosti, pa se odpirajo nove priložnosti uporabe naravnih materialov tudi na področju gradbeništva. Ker pa so mehanske lastnosti naravnih vlaken nizke v primerjavi s karbonskimi vlakni, ki so trenutno najbolj uveljavljena na področju gradbeništva, za enkrat še ni bilo konkretnih raziskav v tej smeri. Če pa se lotimo ojačevanja šibkejših gradbenih elementov, kot so stari leseni nosilci, lahko tudi z ojačitvami iz naravnih materialov ustrezno izboljšamo nosilnost teh elementov.

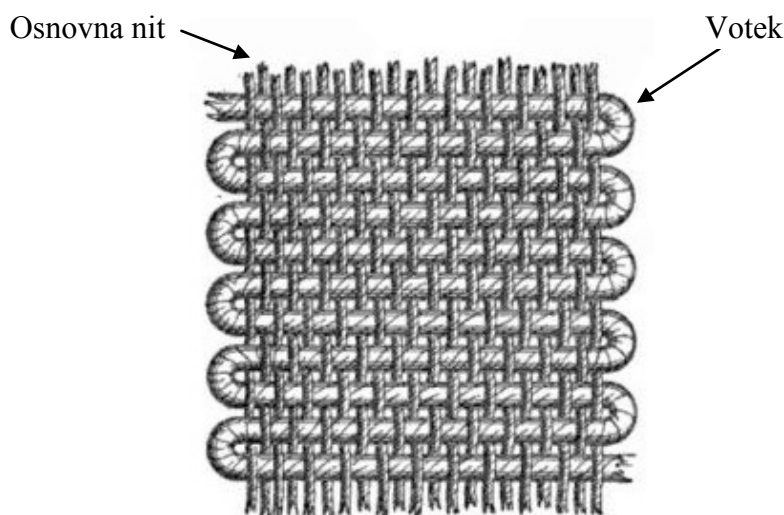
### 5.2 Pridobivanje osnovnih materialov

Na podlagi znanj, pridobljenih iz literature, sem se lotil iskanja tkanin, ustreznih za ojačevanje gradbenih konstrukcij.

V gradbeništvu se navadno uporabljajo visoko nosilne steklene in ogljikove tkanine, večinoma prepletene v prečni in vzdolžni smeri ( $0^\circ$  in  $90^\circ$ ), z nosilnostjo v eni ali obeh smereh. Dobavljive so pri večini dobaviteljev gradbenega sanacijskega materiala. Različni proizvajalci ponujajo tkanine z različno nosilnostjo, v večini pa gre za projektne natezne nosilnosti od 140 do 800 kN/m<sup>1</sup>. Ime tkanine navadno sestavlja tudi informacija o njeni teži v gramih na kvadratni meter, ki nam posredno sporoča nosilnost tkanine. Na voljo so v 50 in več metrskih rolah širine od 10 do 100 cm. Podatke o ponudbi steklenih in ogljikovih tkanin je dokaj preprosto dobiti, saj nam različni dobavitelji in proizvajalci hitro posredujejo informacije, tehnične liste in ustrezna dokazila o kvaliteti.

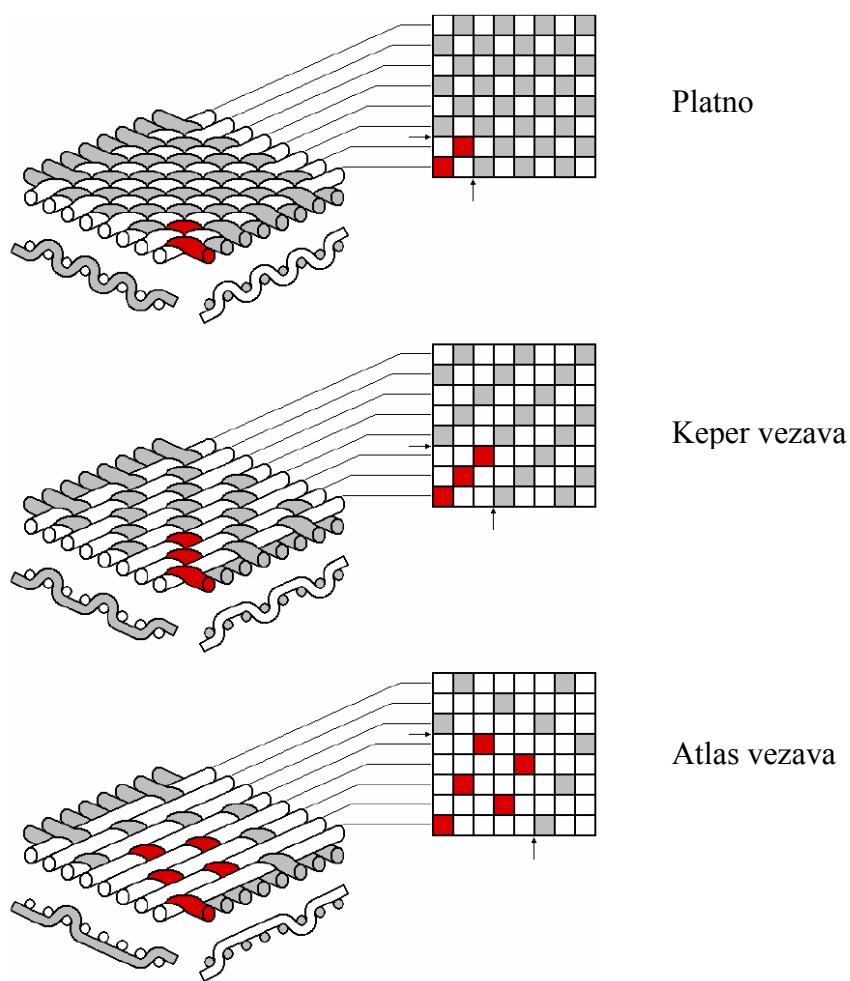
Popolnoma drugače je pri dobavi tkanin iz naravnih vlaken. Naravna vlakna se običajno tkejo v tkanine za uporabo v tekstilni industriji, kjer je njihova nosilnost drugotnega pomena, trajnosti za obdobje pričakovane življenjske dobe običajne gradbene konstrukcije pa se od njih sploh ne pričakuje. Ker pa se v zadnjem času odvija več raziskav s področja biokompozitov, sem uspel vzpostaviti nekaj dobrih kontaktov z raznim tkalnicami, tudi takimi, ki že sodelujejo pri projektih izdelave kompozitnih materialov, ojačenih z naravnimi vlakni.

V raziskavah trga sem v polletnem obdobju uspel pridobiti večje število vzorcev lanenih tkanin, ki so primerne za armiranje epoksidne smole. Ker nobena od tkalnic ni razpolagala z informacijami o nosilnosti tkanine na tekoči meter, sem moral želeno kvaliteto tkanine izbrati glede na nosilnost osnovne (warp) niti in votka (weft).



Slika 5.1: Definicija osnovne niti in votka

Da tkanina obdrži obliko, se vlakna med seboj mehansko povežejo, kar imenujemo tkanje. Od načina tkanja vlaken so odvisne lastnosti tkanine, kot so prilagodljivost, stabilnost in gladkost. Teža, poroznost in stopnja omočljivosti vlaken pa so odvisni predvsem od pravilne kombinacije, gostote pramenov vlaken in števila vlaken na enoto dolžine.



Slika 5.2: Osnovni načini tkanja

Sprva sem se lotil iskanja naravnih tkanin pri slovenskih proizvajalcih in dobaviteljih. Kmalu sem ugotovil, da pri nas praktično ni mogoče dobiti tkanine iz naravnih vlaken, ki bi bila ustrezna za ojačevanje polimernih matric. Zahtevam za tovrstno uporabo se še najbolj približajo tkanine za slikarska platna, ki pa nimajo nobenih podatkov o mehanskih lastnostih, poleg tega pa so tudi izjemno draga zaradi impregnacij, ki izboljšajo oprijem barve na platno. Poleg lanenih slikarski platen sem uspel najti še dobavitelja tekstilnih izdelkov iz konopljinih vlaken, ki ima na zalogi tudi manjšo količino metrskega konopljinega blaga. Vsi tipi blaga, ki jih je imel dobavitelj na zalogi, so bili prešibki za ojačevanje matric, dobava primernejšega blaga pa je bila praktično nemogoča, saj pošiljke z metrskim blagom dobivajo le 1-krat letno, in še to v neznanih ter različnih količinah in kakovostih.

Ker je bila dobava tkanine v slovenskem prostoru neuspešna, sem začel vzpostavljati stike s tkalnicami po celem svetu. Nekaj kontaktov mi je uspelo pridobiti iz Kitajske, večino pa iz evropskih držav. V iskanju sem se osredotočil na tkanine iz lanenih in konopljinih vlaken, ki izkazujejo najvišje mehanske lastnosti. Iz Kitajske bi lahko dobavil tkanine tako iz konopljinih kot tudi iz lanenih vlaken, v Evropi pa mi je uspelo pridobiti ponudbe le za tkanine iz lanenih vlaken. Zaradi dolgega potovanja tkanine iz Kitajske ter zapletov v primeru slabe kvalitete sem se osredotočil zgolj na evropske dobavitelje. Poleg tega pa so lanena vlakna iz Evrope znana po svoji superiorni kvaliteti.

Kontakt sem vzpostavil neposredno s tkalnicam in tako uspel pridobiti 64 vzorcev tkanin iz Belgije, Poljske, Češke in Irske. Poleg vzorcev 100 % lanenih tkanin sem pridobil tudi vzorce bombažne in jutine tkanine. Vzorci so prikazani na sliki 5.3.



Slika 5.3: Pridobljeni vzorci tkanin iz naravnih vlaken

Vsi vzorci, z izjemo jutinih in bombažnih, so bili bolj ali manj primerni za armiranje polimernih matric. Odločil sem se za tkanino poljskega proizvajalca, ki se je po svojih karakteristikah osnovne in votkovne niti najbolj približala moči steklenih vlaken, obenem pa so bila vlakna videti dovolj omočljiva za prepojitev z nizko viskozno matrico. Poleg ujemanja specifične natezne trdnosti tkanin pa sem pri izbiri upošteval tudi maso tkanine, saj je le s pomočjo mase mogoče ustrezno primerjati rezultate mehanskih lastnosti kompozita,



armiranega z naravnimi vlakni, s kompozitom, armiranim z umetnimi vlakni. Čeprav je izbrana tkanina težja od steklene, sem se zanjo odločil zaradi visoke specifične natezne trdnosti v smeri vlaken.

Preglednica 5.1: Primerjava uporabljenih tkanin

Vrsta tkanine	Teža tkanine [g/m <sup>2</sup> ]	Širina tkanine [cm]	Dolžina tkanine [m]	Cena tkanine [/m <sup>2</sup> ]
Lanena tkanina	525	110	45	x
Steklena tkanina	350	67	50	4,2·x

Preglednica 5.2: Primerjava mehanskih lastnosti uporabljenih tkanin

Vrsta tkanine	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost osnovne niti [N/mm <sup>2</sup> ]	Spec. natezna trdnost osnovne niti [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Natezna trdnost votka [N/mm <sup>2</sup> ]	Spec. natezna trdnost votka [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]
Lanena tkanina	1,45	2000	1379	1100	759
Steklena tkanina	2,60	3400	1308	3400	1308

### 5.3 Primerjava uporabljenih epoksi smol

Med velikim številom različnih epoksi smol, primernih za uporabo v kompozitih, sem se odločil uporabiti smole, ki se uporabljajo za ojačevanje gradbenih konstrukcij in jih je mogoče dobiti pri različnih proizvajalcih in dobaviteljih gradbenih materialov. Epoksi smola mora biti primerna za postopek mokrega lameliranja in se mora strjevati pri sobni temperaturi. Za ustrezno penetracijo smole v vlakna lanene tkanine je pomembno, da ima tudi dovolj nizko viskoznost.

Pri nateznem preizkusu sem uporabil dva tipa matric, in sicer epoksi smolo, ki se uporablja za klasično ojačevanje betonskih konstrukcij s steklenimi ali ogljikovimi tkaninami, ter epoksi smolo, ki je namenjena izključno za statično ojačevanje lesenih nosilnih elementov. Razlog za izbor epoksi matrice za ojačevanje lesenih elementov je logičen glede na uporabo naravnih materialov, matrico za ojačevanje betonskih konstrukcij pa sem izbral predvsem zaradi nižje viskoznosti, ki je obetala boljšo prepojitve vlaken in s tem boljše rezultate.

Preglednica 5.3: Mehanske lastnosti uporabljenih smol

<b>Matrica</b>	<b>Viskoznost pri 23°C [mPa·s]</b>	<b>Natezna trdnost [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Upogibna trdnost [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Tlačna trdnost [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Upogibni modul elastičnosti [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Porušna deformacija [%]</b>
A	11400	30	60	65	2000	1,20
B	300	30	55	65	2500	1,20

A specialna epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij

B specialna epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij

Pri uporabljeni smoli je pomembno, da ima dovolj nizko viskoznost, da lahko prodre v naravna vlakna, in obenem zadostno tiksotropnost, da ne odteče iz ojačevanega elementa med lameliranjem. Uporabljeni smoli sta se izkazali za najprimernejši med desetimi testiranimi, ki sem jih pridobil od različnih proizvajalcev.

## 6 RAČUNSKA ANALIZA KOMPOZITNIH MATERIALOV

### 6.1 Določitev materialnih karakteristik kompozita

Lastnosti z vlakni oziroma tkaninami ojačenih polimernih materialov je možno določiti tudi teoretično s pomočjo enačb mikromehanike. Mehanske lastnosti kompozita so funkcija vrste uporabljene matrice in vlaken ter orientacije in deleža vlaken v kompozitu. V nadaljevanju so predstavljene teoretične enačbe, ki opisujejo določitev mehanskih lastnosti kompozitnega materiala.

Mehanske karakteristike materiala so funkcije volumskega deleža vlaken. Zato moramo najprej izbrati želeno masno razmerje vlaken in matrice v končnem kompozitu, ki ga nato pretvorimo v volumsko razmerje s pomočjo enačbe

$$V_f = \frac{\rho_m W_f}{\rho_m W_f + \rho_f W_m} \quad (6.1)$$

kjer je

- $W_f$  masni delež vlaken,
- $W_m$  masni delež matrice,
- $\rho_f$  specifična teža vlaken,
- $\rho_m$  specifična teža matrice.

Modul elastičnosti v vzdolžni smeri vlaken lahko določimo po modelu merila mešanic:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (6.2)$$

- $E_f$  elastični modul vlaken,
- $E_m$  elastični modul matrice,
- $V_m$  volumski delež matrice v kompozitu:  $V_m = 1 - V_f$ .

Ob predpostavki, da je potek napetosti linearen ter enak v vlaknih in matrici, lahko izračunamo prečni modul elastičnosti kot inverz formule modela merila mešanice:

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (6.3)$$

Predpostavka o linearnem poteku napetosti po matrici in vlaknih se lahko uporabi tudi za določitev strižnega modula v ravnini lamele:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (6.4)$$

$G_f$  strižni modul vlaken,

$G_m$  strižni modul matrice.

Določimo lahko tudi Poissonov količnik, ki je definiran kot razmerje med deformacijo v prečni in vzdolžni smeri, kar zapišemo kot:

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (6.5)$$

$\varepsilon_T$  deformacija v prečni smeri,

$\varepsilon_L$  deformacija v vzdolžni smeri (v smeri obtežbe).

Če je kompozit sestavljen iz izotropnih komponent, se model merila mešanic lahko uporabi tudi za račun Poissonovega količnika:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (6.6)$$

Predpostavka o linearnem poteku napetosti po celotnem prerezu vlaken in matrice pa ni pravilna ter daje le grobo oceno prečnega modula elastičnosti in strižnega modula v ravnini lamele. Izkaže se namreč, da pri slednjih matrica odigra glavno vlogo, saj se vpliv količine vlaken v kompozitu pozna šele pri zelo visokih odstotkih armiranja. Za boljšo oceno  $E_{22}$  in  $G_{12}$  je primernejša empirična formula Halpina in Tsaia, ki najbolj natančno velja za kompozite z volumskim deležem vlaken med 45 % in 65 %:

$$E_{22} = E_m \left( \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right) \quad (6.7)$$

kjer je

$$\eta = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + 2} \quad (6.8)$$

Empirično pridobljen parameter  $\zeta$  je odvisen od oblike prereza vlaken. Halpin in Tsai predlagata za vlakna z okroglim prečnim prerezom uporabo  $\zeta = 2$ .

Za natančnejši izračun strižnega modula  $G_{12}$  je potrebno izraz (6.4) korigirati na osnovi cilindričnega modela:

$$G_{12} = G_m \frac{(1+V_f) + \frac{(1-V_f)G_m}{G_f}}{(1-V_f) \frac{(1+V_f)G_m}{G_f}} \quad (6.9)$$

Pomembna mehanska karakteristika pa je tudi medplastni strižni modul, ki nastane kot posledica poteka strižnih sil po debelini lamele. Določimo ga na osnovi empirične enačbe:

$$G_{23} = G_m \frac{V_f + \eta_{23}(1-V_f)}{\eta_{23}(1-V_f) + \frac{V_f G_m}{G_f}} \quad (6.10)$$

kjer  $\eta_{23}$  predstavlja empirično določen korekcijski faktor:

$$\eta_{23} = \frac{3 - 4\nu_m + \frac{G_m}{G_f}}{4(1 - \nu_m)} \quad (6.11)$$

### 6.1.1 Račun mehanskih lastnosti preizkušanih kompozitov

V skladu z zgoraj navedenimi formulami lahko izračunamo mehanske lastnosti projektiranih kompozitov s preprostim programom v Excelu. Pri računu sem upošteval dejansko volumsko razmerje vlaken in smole v kompozitu.

Preglednica 6.1: Mehanske lastnosti osnovnih materialov

Vrsta materiala	Specifična teža $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti $E$ [GPa]	Strižni modul $G$ [GPa]	Poissonov količnik $\nu$
Lanena tkanina	1,45	50,0	30,0	0,20
Steklena tkanina	2,60	73,0	30,0	0,20
Matrica A	1,01	2,0	2,0	0,38
Matrica B	1,10	2,5	2,5	0,38

Preglednica 6.2: Teoretično določene mehanske lastnosti preiskovanih kompozitov

Vrsta kompozita	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$E_{11}$ [GPa]	$E_{22}$ [GPa]	$G_{12}$ [GPa]	$G_{23}$ [GPa]	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$
LA	1,17	19,42	4,86	3,86	3,61	0,32	0,08
LB	1,23	20,69	6,21	4,90	4,59	0,31	0,09
SA	1,54	25,49	4,63	3,63	3,41	0,32	0,06
SB	1,56	24,05	5,36	4,24	4,01	0,33	0,07

- LA epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij, armirana s tkanino iz lanenih vlaken,  
 LB epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij, armirana s tkanino iz lanenih vlaken,  
 SA epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij, armirana s tkanino iz steklenih vlaken,  
 SB epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij, armirana s tkanino iz steklenih vlaken,  
 $\rho$  specifična teža kompozita,  
 $E_{11}$  modul elastičnosti v smeri vlaken,  
 $E_{22}$  modul elastičnosti v smeri pravokotno na smer vlaken (v ravnini plasti),  
 $G_{12}$  strižni modul v ravnini plasti,  
 $G_{13}$  strižni modul v ravnini plasti; predpostavimo  $G_{13} = G_{12}$ ,  
 $G_{23}$  strižni modul pravokotno na ravnino plasti,  
 $\nu_{12}$  Poissonov količnik v ravnini plasti,  
 $\nu_{21}$  Poissonov količnik v ravnini plasti.

Za boljšo neposredno primerjavo med kompoziti lahko izračunamo še specifične vrednosti mehanskih lastnosti, tako da elastične in strižne module iz preglednice 6.2 delimo s specifično težo kompozita.

Preglednica 6.3: Teoretično določene specifične mehanske lastnosti preiskovanih kompozitov

Vrsta kompozita	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$E_{11}$ [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	$E_{22}$ [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{12}$ [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{23}$ [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$
LA	1,17	16,61	4,15	3,30	3,08	0,32	0,08
LB	1,23	16,77	5,03	3,97	3,72	0,31	0,09
SA	1,54	16,59	3,02	2,36	2,22	0,32	0,06
SB	1,56	15,43	3,44	2,72	2,57	0,33	0,07

## 6.2 Togost plastovitih kompozitov

### 6.2.1 Analiza plasti

Za analizo kompozitnega materiala privzamemo Cauchyev model elastične snovi, ki je zasnovan na predpostavki, da so komponente  $\sigma_{ij}$  napetostnega tenzorja enolične funkcije komponent  $\varepsilon_{ij}$  tenzorja deformacij:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sum_k \sum_l Q_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = x, y, z, \text{ oz. } 1, 2, 3) \quad (6.12)$$

Privzamemo, da obravnavamo linearno elastično, homogeno anizotropno snov, kar pomeni, da so koeficienti  $Q_{ijkl}$  konstante. Simetrični tenzor s komponentami  $\sigma_{ij}^0$  pa predstavlja začetne napetosti, ki pripadajo nedeformirani obliki in velikosti telesa.

Napetostni  $\sigma_{ij}$  in deformacijski  $\varepsilon_{ij}$  tenzor sta tenzorja drugega reda in imata  $3^2 = 9$  komponent, med tem ko elastični tenzor četrtega reda  $Q_{ijkl}$  v trirazsežnem prostoru tvori  $3^4 = 81$  komponent. Ker povezuje simetrična tenzorja ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ) in ( $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ ), mora biti tudi tenzor  $Q_{ijkl}$  simetričen glede na indeksa  $i$  in  $j$  oziroma  $k$  in  $l$ . Tako imamo dejansko le 36 materialnih konstant, med katerimi jih je 21 med sabo neodvisnih, kar omogoča poenostavljeno obliko zapisa indeksov:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_1 & \varepsilon_{11} &= \varepsilon_1 \\ \sigma_{22} &= \sigma_2 & \varepsilon_{22} &= \varepsilon_2 \\ \sigma_{33} &= \sigma_3 & \varepsilon_{33} &= \varepsilon_3 \\ \sigma_{23} &= \sigma_4 & 2\varepsilon_{23} &= \varepsilon_5 \\ \sigma_{31} &= \sigma_5 & 2\varepsilon_{31} &= \varepsilon_5 \\ \sigma_{12} &= \sigma_6 & 2\varepsilon_{12} &= \varepsilon_6 \end{aligned} \quad (6.13)$$

Sedaj lahko enačbo (6.12) zapišemo kot

$$\sigma_i = Q_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (i, j = 1, \dots, 6). \quad (6.14)$$

Pri tem velja izpostaviti, da količine  $\varepsilon_4$ ,  $\varepsilon_5$  in  $\varepsilon_6$  niso tenzorske in se zato tudi ne transformirajo pri spremembi koordinatnega sistema. Podobno tudi  $Q_{ij}$  ni več tenzor in se ne transformira po pravilih tenzorskega računa.

Za anizotropno snov torej dobimo matrično enačbo:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (6.15)$$

Pri kompozitnih materialih lahko privzamemo, da se obnašajo izotropno glede na tri medsebojno pravokotne ravnine, kar imenujemo ortotropnost. Pri ortotropni snovi je zveza med napetostmi in deformacijami opisana z dvanajstimi mehanskimi parametri. Pri tem so normalne napetosti odvisne samo od normalnih deformacij, strižne napetosti pa le od kotnih sprememb. Dobimo posplošen Hookov zakon linearno elastične ortotropne snovi:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (6.16)$$

Nadalje lahko v primeru obravnavanja ortotropne plasti kot osnovnega gradnika laminata predpostavimo, da je zaradi majhne debeline obremenjena le v svoji ravnini. To nam togostno matriko še nadalje poenostavi, saj lahko napetosti po debelini elementa zanemarimo ( $\sigma_3 = 0$ ). Pri tem pa ne smemo zanemariti strižnih deformacij, ki so močno odvisne od matrice:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (6.17)$$



Člene matrike  $[Q_{ij}]$  lahko zapišemo eksplicitno:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_{22}\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{44} &= G_{23} \\ Q_{55} &= G_{13} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (6.18)$$

$E_{11}$  modul elastičnosti v smeri vlaken,

$E_{22}$  modul elastičnosti v smeri pravokotno na smer vlaken (v ravnini plasti),

$G_{12}$  strižni modul v ravnini plasti,

$G_{13}$  strižni modul v ravnini plasti; predpostavimo  $G_{13} = G_{12}$ ,

$G_{23}$  strižni modul pravokotno na ravnino plasti – medplastni strižni modul,

$\nu_{12}$  Poissonov količnik v ravnini plasti,

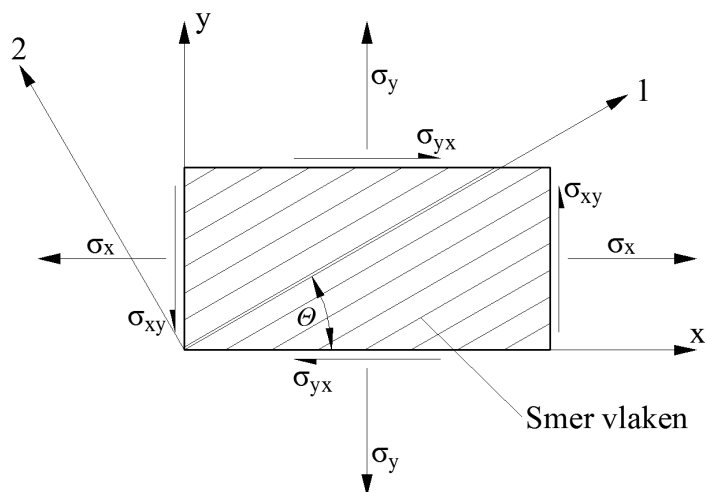
$\nu_{21}$  Poissonov količnik – po teoriji elastičnosti velja:  $\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1}$ .

Matrika  $[Q_{ij}]$  je nesingularna in lahko izračunamo njeno inverzno matriko  $[Q_{ij}]^{-1}$ . S tem določimo obrat enačbe (6.17), kar pomeni, da rešimo sistem konstitutivnih enačb glede na deformacije. Dobimo:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (6.19)$$

Kompozitni materiali so običajno sestavljeni iz več slojev vlaken in matrice ter tako tvorijo kompozitni laminat. Ker so posamezni sloji vlaken pogosto različno orientirani, obtežba nanje pa deluje v isti smeri, moramo togostno matriko prilagoditi za potrebe izven osne obremenitve. V ta namen definiramo geometrijski koordinatni sistem z osmi  $x$ ,  $y$ ,  $z$  in materialni koordinatni sistem z osmi 1, 2, 3. Geometrijski sistem sledi robovom laminata,

materialni pa smeri vlaken. Osi  $z$  in  $3$  sovpadata in sta usmerjeni v smeri debeline laminata. Kot med smerjo  $x$  in  $1$  oziroma smerjo  $y$  in  $2$  označimo s  $\theta$ .



Slika 6.1: Prikaz določitve globalnega in lokalnega koordinatnega sistema glede na usmerjenost vlaken

Transformacijo togostne matrike iz globalnega v lokalni koordinatni sistem izvedemo s pomočjo transformacijske matrike, kjer je  $m = \cos\theta$  in  $n = \sin\theta$ :

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 2mn \\ 0 & 0 & m & n & 0 \\ 0 & 0 & -n & m & 0 \\ mn & -mn & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Velja:

$$\{\sigma\}_{xyz} = [T]^{-1} \{\sigma\}_{123} = [T]^{-1} [Q] \{\varepsilon\}_{123} = [T]^{-1} [Q] [T] \{\varepsilon\}_{123} \quad (6.21)$$

Transformirano togostno matriko označimo s  $\bar{Q}$ :

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [T] \quad (6.22)$$

Zvezo lahko zapišemo še v matrični obliki:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & 0 & 0 & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & 0 & 0 & \bar{Q}_{26} \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{54} & \bar{Q}_{55} & 0 \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.23)$$

Členi togostne matrike v razviti obliki:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{44} &= Q_{44}m^2 + Q_{55}n^2 \\ \bar{Q}_{55} &= Q_{44}n^2 + Q_{55}m^2 \\ \bar{Q}_{45} &= (Q_{55} - Q_{44})mn \end{aligned} \quad (6.24)$$

### 6.2.2 Analiza laminata

Za določitev togosti laminata moramo izvesti integracijo napetosti po vseh lamelah prereza laminata. Ker je matrika  $[Q_{ij}]$  lahko različna za vsako plast laminata, ni nujno, da bo potek napetosti po prerezu laminata linearen, čeprav je potek deformacij linearen. Tako dobimo diskontinuitete poteka napetosti na mejah plasti, znotraj vsake izmed plasti pa je potek napetosti linearen.

Za kompozit, sestavljen iz N plasti, lahko za k-to plast laminata zapišemo:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}_k = [\bar{Q}]_k \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{pmatrix}_k \quad (6.25)$$

S pomočjo kinematičnih enačb lahko zapišemo deformacije elastičnega telesa:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} & \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (6.26)$$

kjer  $u$ ,  $v$  in  $w$  predstavljajo pomike v smereh koordinatnega sistema  $x$ ,  $y$  in  $z$ . Ob upoštevanju Kirchhoffove hipoteze o ohranitvi pravokotnosti prečnega prereza na osrednjo ravnino elementa tudi ob deformiranju lahko napišemo pomike in zasuke laminata v funkcijski obliki:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u^0(x, y) + z\bar{\alpha}(x, y) \\ v(x, y, z) &= v^0(x, y) + z\bar{\beta}(x, y) \\ w(x, y, z) &= w(x, y) \end{aligned} \quad (6.27)$$

kjer  $u^0$ ,  $v^0$  in  $w$  predstavljajo pomike v srednji ravnini ploskve oziroma linijskega elementa,  $\bar{\alpha}$  in  $\bar{\beta}$  pa zasuke. Po klasični teoriji nosilcev in plošč  $\bar{\alpha}$  in  $\bar{\beta}$  predstavljata negativno vrednost prvega odvoda pomikov glede na  $x$  in  $y$  os ( $\bar{\alpha} = -\frac{\partial w}{\partial x}$ ,  $\bar{\beta} = -\frac{\partial w}{\partial y}$ ), vendar to ne velja za večino kompozitnih materialov, saj strižnih deformacij ne moremo zanemariti in torej  $\bar{\alpha}$  in  $\bar{\beta}$  predstavljata od nič različni neznanki. Za tankostenski prerez velja tudi, da so napetosti v smeri osi  $z$  zanemarljivo majhne, iz česar sledi tudi  $\varepsilon_z = 0$ . Če v enačbe (6.26) vstavimo enačbe pomikov (6.27), dobimo:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u^0}{\partial x} + z \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} & \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left( \bar{\alpha} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v^0}{\partial y} + z \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \bar{\beta} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\
\varepsilon_z &= 0 & \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} \right) + \frac{z}{2} \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{6.28}$$

Deformacije v srednji ravnini ( $z = 0$ ) so torej:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u^0}{\partial x} \\
\varepsilon_y^0 &= \frac{\partial v^0}{\partial y} \\
\varepsilon_{xy}^0 &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{6.29}$$

Ukrivljenost lahko zapišemo kot:

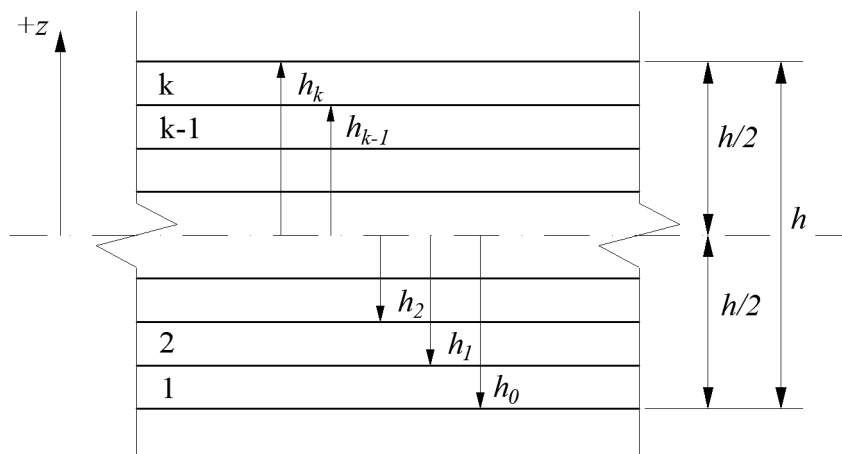
$$\begin{aligned}
\kappa_x &= \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x} \\
\kappa_y &= \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y} \\
\kappa_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{6.30}$$

Ob upoštevanju zapisa ukrivljenosti (6.30) v enačbah (6.28) in ob predpostavki zanemarnjenih napetosti v smeri debeline ( $\sigma_z = \varepsilon_z = 0$ ) dobimo:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k = [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 + z\kappa_x \\ \varepsilon_y^0 + z\kappa_y \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2(\varepsilon_{xy} + \kappa_{xy}z) \end{Bmatrix}_k \tag{6.31}$$

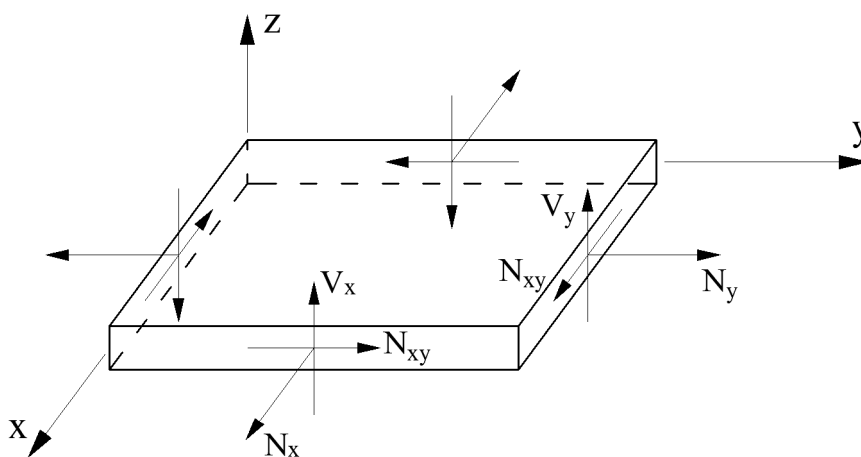
Če poznamo desno stran enačbe (6.31), lahko torej izračunamo napetosti za vsako plast laminata.

Laminat je sestavljen iz več med seboj togo zlepljenih plasti. Če poznamo debelino plasti in določimo srednjo ravnino laminata, lahko s  $h_k$  označimo oddaljenost zgornjega roba  $k$ -te plasti od srednje ravnine za vsako izmed  $N$  plasti. Pri tem upoštevamo pozitiven predznak za plasti nad srednjo ravnino in negativnega za plasti pod srednjo ravnino laminata.

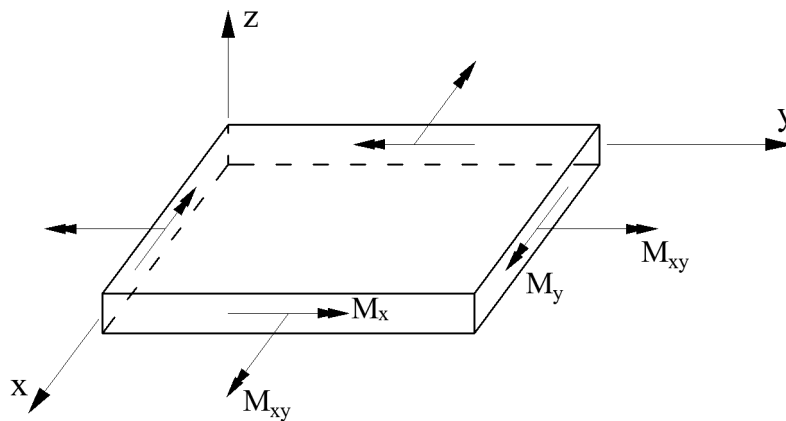


Slika 6.2: Geometrija laminata s  $k$ -timi plastmi

V nadaljevanju lahko določimo rezultante napetosti in določimo notranje sile celotnega laminata. Pozitivne smeri notranjih sil in momentov so prikazane na spodnjih slikah.



Slika 6.3: Pozitivne smeri osnih sil v laminatu



Slika 6.4: Pozitivne smeri momentov v laminatu

Po klasični teoriji ploskovnih konstrukcij lahko izrazimo osne sile v ravnini laminata z integracijo napetosti po posameznih plasteh za celoten prerez, momente pa z ravnotežjem napetosti na srednjo ravnino:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} dz \quad (6.32)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (6.33)$$

Za laminate in kompozitne sestavljene (sendvič) prezeze lahko komponente napetosti integriramo za vsak sloj posebej in z upoštevanjem enačbe (6.31) dobimo:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \left( \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \epsilon_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right) \quad (6.34)$$

Ker je matrika  $[\bar{Q}]$  za posamezno plast konstantna, odvodi pomikov v srednji ravnini ( $u_0$  in  $v_0$ ) ter zasukov  $\bar{\alpha}$  in  $\bar{\beta}$  niso odvisni od  $z$ , lahko enačbo (6.34) ponovno zapišemo kot:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \left( \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \right) \quad (6.35)$$

Oziroma pregledneje:

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon^0\} + [B]\{\kappa\} \quad (6.36)$$

kjer člena  $[A]$  in  $[B]$  določimo z vsoto po vseh plasteh ( $i, j = 1, 2, 6$ ):

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \end{aligned} \quad (6.37)$$

Podobno z množenjem enačbe (6.31) z  $z$  pred integriranjem dobimo enačbo za določitev momentov:

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon^0\} + [D]\{\kappa\} \quad (6.38)$$

kjer je člen  $[D]$  enak ( $i, j = 1, 2, 6$ ):

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (6.39)$$

Sedaj lahko združimo zveze med napetostmi in deformacijami za osne sile in momente ter jih zapišemo v skupni matriki:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ \dots \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & | & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & | & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & | & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & | & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & | & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & | & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ 2\varepsilon_{xy}^0 \\ \dots \\ \kappa_x \\ \kappa_{xy} \\ 2\kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.40)$$



Na podlagi njihovih značilnosti lahko matrike  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[D]$  in  $[H]$  ustrezno poimenujemo. Matrika  $[A]$  povezuje osne sile ( $N$ ) z deformacijami v srednji ravnini ( $\varepsilon^0$ ) in jo lahko imenujemo razteznostna togostna matrika. Podobno lahko matriko  $[D]$ , ki povezuje upogibne momente ( $M$ ) z ukrivljenostmi ( $\kappa$ ), imenujemo upogibna togostna matrika. Matriko  $[B]$ , ki povezuje momente ( $M$ ) z deformacijami srednje ravnine ( $\varepsilon^0$ ) in osne sile ( $N$ ) z ukrivljenostmi ( $\kappa$ ), pa imenujemo raztežno-upogibna togostna matrika.

V enačbi (6.40) lahko opazimo več povezav med osnimi silami in strižnimi napetostmi ter upogibnimi momenti in torzijskimi ukrivljenostmi ipd. Velika prednost lameliranih elementov pred monolitnimi je, da s pravilno zgradbo laminata lahko določene vplive izničimo. Na primer, če je laminat zasnovan tako, da ne bo prišlo do povezave med normalnimi silami in strižnim deformacijami, torej bosta  $A_{16}$  in  $A_{26}=0$ , potem vsiljena osna obtežba ne bo povzročala strižnih deformacij laminata.

Strižne sile lahko določimo ob predpostavki parabolčne razporeditve strižnih napetosti po prerezu, ki je dovolj natančna kljub dejanskim diskontinuitetam, ki nastanejo na stikih posameznih plasti laminata. Ob upoštevanju (2.18), (2.24), (2.28), (2.34) dobimo:

$$\begin{Bmatrix} V_y \\ V_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{54} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} \quad (6.41)$$

kjer je člen  $[H]$  enak ( $i, j = 4, 5$ ):

$$H_{ij} = \frac{5}{4} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left( h_k - h_{k-1} - \frac{4}{3} (h_k^3 - h_{k-1}^3) \frac{1}{h^2} \right) \quad (6.42)$$

Matriko  $[H]$ , ki povezuje prečne deformacije ( $\varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ ) s prečnimi silami ( $V_x, V_y$ ), imenujemo prečno strižna togostna matrika. S to matriko lahko zajamemo vpliv prečnih sil na obnašanje laminata v primeru, ko analiziramo laminat po teoriji prvega reda. Z uporabo enačb klasične teorije plošč pa jo zanemarimo. Klasična teorija plošč je namreč manj natančna in se lahko uporablja le za preliminarno oceno.

## 7 OSNOVNE PREISKAVE LAMELNIH KOMPOZITOV

Ker gre za razvoj popolnoma novega materiala je najprej potrebno pridobiti mehanske lastnosti samega kompozita, ki jih lahko kasneje uporabimo pri računski analizi konstrukcije. Preiskave so bile izvedene v laboratoriju Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Natezni preizkus je bil izveden na preizkuševalnem okvirju Roell Amsler s servohidravličnim batom Roell Amsler HA 100. Servohidravlični bat s kapaciteto  $\pm 100$  kN in pomikom  $\pm 75$  mm omogoča statične in dinamične preiskave do frekvence 100 Hz. Pomik bata se nadzoruje s krmilno – kontrolno enoto preko zunanjih merilnih naprav. Tako krmiljenje ni vezano zgolj na pomik bata ali na vneseno silo, ampak ga lahko upravljamo preko poljubne veličine, ki je merjena z zunanjimi merilnimi instrumenti (npr. induktivni merilniki, merilni lističi, deformetri ipd.). Ta princip omogoča izvedbo zelo zahtevnih in specifičnih preiskav za določanje dejanskih mehanskih lastnosti različnih materialov.

V sklopu osnovnih preiskav smo pridobili mehanske podatke za razvit kompozitni material, ki bo nato uporabljen za ojačevanje lesenih nosilcev. Izvedeno je bilo več nateznih preiskav s preizkušanci, ojačenimi z različnimi tkaninami (lanena in steklena tkanina), ter različnimi matricami. Z izvedenimi preiskavami so bili pridobljeni podatki o natezni trdnosti, elastičnem modulu in Poissonovem količniku različnih kompozitov. Različne kombinacije preizkušenih kompozitov so prikazane v preglednici.

Preglednica 7.1: Prikaz različnih vrst kompozitov glede na uporabljeno polimerno matrico in ojačitveno tkanino

Vrsta kompozita	Matrica	Ojačitveni material
Kompozit LA	Specialna epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij	Lanena tkanina
Kompozit LB	Specialna epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij	Lanena tkanina
Kompozit SA	Specialna epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij	Steklena tkanina
Kompozit SB	Specialna epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij	Steklena tkanina

Material – laminat za kompozitne vzorce sem izdelal sam v prostorih podjetja Saning International, d.o.o., v Kranju. Pri izvedbi ustreznih kompozitov in izboru najprimernejših materialov sem izhajal iz lastnega znanja, ki sem ga pridobil v obsežni študiji obstoječih vedenj, in na podlagi preučevanja najnovejših znanstvenih dognanj s področja biokompozitov. Razrez vzorcev in lepljenje vpenjalnih ploščic je prav tako potekalo v prostorih podjetja Saning.

Preiskave so bile opravljene v skladu z veljavnimi ISO standardi. Spisek uporabljenih standardov se nahaja v dodatku tega diplomskega dela.

### 7.1 Preizkuševalni okvir

Preizkuševalni okvir Roell Amsler je namenjen statičnemu in dinamičnemu preizkušanju. Okvir je sestavljen iz spodnje in zgornje oprijemalne glave, pri čemer je spodnja nepremično pritrjena na posebej izdelano ohišje, zgornja pa se oprijema dveh na ohišje pritrjenih stebrov s štirimi hidravličnimi bati in jo je mogoče pomikati po višini. Spodnja oprijemalna glava je povezana s servohidravličnim batom s kapaciteto 100 kN pri statičnih oziroma 50 kN pri dinamičnih preiskavah.



Slika 7.1: Preizkuševalni okvir Roell Amsler laboratorija Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani

## 7.2 Merilna oprema

### 7.2.1 Merilni lističi

Za merjenje deformacij so bili uporabljeni uporovni merilni lističi (*strain gauge*) japonskega proizvajalca Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., tip BFLA-5-5. Merilni lističi te serije so posebej prirejani za merjenje deformacij kompozitnih materialov, saj imajo uporovno žico speljano tako, da se zmanjša vpliv armature kompozita na meritev. Uporovna žica je narejena iz zlitine bakra in niklja (konstantan) in zalita s prozorno poliamidno maso. Dolžina merilnega območja je 5,0 mm, širina pa 1,5 mm. Površina, ki jo listič zavzema na vzorcu, je 12,3×3,3 mm. Upornost merilnega lističa je 120±0,3 Ω, koeficient lističa pa  $k_l = 2,09 \pm 1\%$ .

Lističi so bili na preizkušance prilepljeni s cianoakrilatnim lepilom proizvajalca Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.. Lepilo veže v manj kot eni minuti, potreben pritisk pa se ustvari ročno – s pritiskanjem.

Natezno deformacijo, merjeno z merilnim lističem, se izračuna po enačbi:

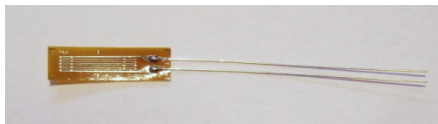
$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i \cdot 0,4}{k_l} \quad (7.1)$$

kjer je

$\varepsilon_i$  natezna deformacija pri i-tem odčitku (%)

$\delta_i$  i-ti odčitek instrumenta

$k_l$  koeficient lističa ( $k_l = 2,09$ )



Slika 7.2: Merilni listič Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., tip BFLA-5-5

### 7.2.2 Merjenje pomika

Pomik je določen z merjenjem pomika zgornje vpenjalne čeljusti preizkuševalnega okvirja Roell Amsler. Spodnja čeljust je fiksna.

### 7.3 Preizkušanci

Izdelani so bili štiri različni tipi preizkušancev glede na vrsto tkanine in vrsto uporabljene matrice. Preizkušanci enakega tipa – skupine, so bili izrezani iz istega laminata, iz katerega so bile izrezane tudi vpenjalne ploščice. Vpenjalne ploščice so bile na preizkušance prilepljene z enakim epoksijem, kot je bil uporabljen za matrico določene skupine.

Ker je imela lanena tkanina različno nosilnost v prečni in vzdolžni smeri, so bili za vsako skupino, ojačeno z laneno tkanino, izdelani preizkušanci v dveh različnih nosilnih smereh, enkrat z večjo nosilnostjo tkanine v smeri vzdolžne osi preizkušanca, in drugič z večjo nosilnostjo tkanine pravokotno na smer osi preizkušanca. Tako smo pridobili podatke o natezni trdnosti lanenega kompozita v močnejši kot tudi v šibkejši smeri.

Tkanina iz steklenih vlaken je imela nosilnost v obeh smereh enako, tako da ni bilo potrebno izvajati preizkusa v različnih oseh. Izdelana je bila torej le ena skupina preizkušancev s stekleno ojačitvijo za vsako izmed matric.

Preglednica 7.2: Osnovne mehanske lastnosti matric po navedbi proizvajalcev

Matrica	Natezna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ]	Upogibna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ]	Tlačna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ]	Upogibni modul elastičnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	Porušna deformacija [%]
A	30	60	65	2000	1,20
B	30	55	65	2500	1,20

Preglednica 7.3: Osnovne mehanske lastnosti tkanin po navedbi proizvajalcev

Vrsta tkanine	Specifična teža [g/cm <sup>3</sup> ]	Teža tkanine [g/m <sup>2</sup> ]	Natezna trdnost osnovne niti [N/mm <sup>2</sup> ]	Natezna trdnost votka [N/mm <sup>2</sup> ]
Lanena tkanina	1,45	525	2000	1100
Steklena tkanina	2,60	350	3400	3400

Za izdelavo preizkušancev sem se odločil uporabiti dve različni epoksidni matrici, saj imata vsaka svoje prednosti in pomanjkljivosti v dani novi aplikaciji. Očitna prednost specialne epoksi smole za sanacije lesenih konstrukcij je v tem, da je ta smola že prvotno namenjena

aplikaciji na lesene konstrukcije in ima temu ustrezno formulacijo ter zagotovljeno kompatibilnost materialov. Negativni karakteristiki te smole pa se kažeta v njeni višji viskoznosti, ki se odraža na slabši penetraciji smole v laneno tkanino in nižjem modulu elastičnosti. Kot pozitivno lastnost te smole lahko štejemo tudi obstoj systemskega premaza (*primer-ja*), ki izboljša oprijem med smolo in lesenim nosilcem. Prednosti specialne epoksi smole za sanacije betonskih konstrukcij pa sta nižja viskoznost in višji modul elastičnosti. Zaradi nižje viskoznosti – bolj tekoče konsistence, smola med nanašanjem na laneno tkanino laže prodira v vlakna in tako omoči večji volumen vlaken, kar se odraža na višji nosilnosti kompozita. Prav tako je višji modul elastičnosti bolj ustrezen za izvedbo statične ojačitve, saj želimo izvesti čim bolj togo ojačitev. Težava pri smoli, namenjeni sanaciji betonskih konstrukcij, je tudi systemski premaz, ki je namenjen izboljšanju oprijema smole na betonsko podlago, medtem ko njegov učinek v primeru aplikacije na les ni znan in potrjen s strani proizvajalca. Nadalje proizvajalec ne nudi nobene informacije o morebitni kompatibilnosti premaza, namenjenega za aplikacijo z epoksijem za sanacijo lesenih konstrukcij z epoksijem, namenjenim sanaciji betonskih konstrukcij, kar bi pogojno lahko predstavljalo rešitev tega problema.

Za potrditev domnev, postavljenih na podlagi opažanj in izkušenj pri izdelavi laminatov, je bilo torej potrebno izvesti preizkušance z obema matricama. Da pa lahko realno ovrednotimo učinek določene smole kot posledico njene kemijske formulacije, pa je potrebno obe vrsti matrice uporabiti tudi na preizkušancih, ojačenih s stekleno tkanino, kjer je problem absorbiranja smole v vlakna zanemarljivo majhen. S tem izločimo vpliv količine absorpcije smole v vlakna in tako vrednotimo samo razliko med sestavo obeh smol.

Izdelanih je bilo 6 kompozitnih laminatov, iz katerih je bilo izrezanih 6 kompletov preizkušancev, ki so se razlikovali glede na vrsto in usmerjenost tkanine ter uporabljeno ojačitveno matrico.

Preglednica 7.4: Preglednica kompozitov za osnovne preiskave

Oznaka kompozita	Matrica	Ojačitveni material	Večja nosilnost	Število preizkušancev
LA-v	Spec. epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij	Lanena tkanina	v smeri osi preizkušanca	5 + 2 rezervna
LA-p	Spec. epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij	Lanena tkanina	pravokotno na os preizkušanca	5 + 2 rezervna
LB-v	Spec. epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij	Lanena tkanina	v smeri osi preizkušanca	5 + 2 rezervna
LB-p	Spec. epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij	Lanena tkanina	pravokotno na os preizkušanca	5 + 2 rezervna
SA	Spec. epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij	Steklena tkanina	enaka v obeh smereh	5 + 2 rezervna
SB	Spec. epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij	Steklena tkanina	enaka v obeh smereh	5 + 2 rezervna

Pomemben pokazatelj prepojenosti vlaken z epoksidno matrico in s tem kvalitete kompozita je razmerje med količino vlaken in matrice. Razmerje se določi utežno s tehtanjem samih vlaken pred impregniranjem in tehtanjem izvedenega laminata. Razlika med vrednostma predstavlja težo matrice, s pomočjo katere lahko določimo želeno razmerje. V referenčnih preiskavah biokompozitov je bilo ugotovljeno, da je najbolj optimalno razmerje 40 % oz. 50 % tkanine ter 60 % oz. 50 % matrice. Teh priporočenih vrednosti sem se skušal čim bolj držati, dejanska razmerja za posamezne skupine pa so prikazana v spodnji preglednici.

Preglednica 7.5: Utežni delež tkanine v kompozitu

Vrsta kompozita	Delež tkanine v kompozitu [%]	Delež epoxy matrice v kompozitu [%]
LA-v	45	55
LA-p	45	55
LB-v	43	57
LB-p	43	57
SA	52	48
SB	55	45

## 7.4 Obdelava rezultatov

Podatke, pridobljene s pomočjo merilnih instrumentov, sem na podlagi osnovnih enačb mehanike pretvoril v fizikalno predstavljljive vrednosti in s pomočjo programa Microsoft Office Excel izrisal diagrame, ki ponazarjajo razmerja med temi količinami. Račun mehanskih karakteristik je natančno opisan v standardu, zato sem predlaganemu postopku tudi sledil.

### 7.4.1 Račun napetosti

Vse napetosti se izračuna na podlagi začetnega prečnega prereza preizkušanca po enačbi:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7.2)$$

kjer je

$\sigma$  natezna napetost (MPa)

$F$  obtežba (N)

$A$  začetni prečni prerez ( $\text{mm}^2$ ).

### 7.4.2 Račun deformacij

Deformacije se izračuna na podlagi meritvenega območja:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (7.3)$$

$$\varepsilon(\%) = 100 \cdot \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (7.4)$$

kjer je

$\varepsilon$  deformacija (%)

$L_0$  meritveno območje preizkušanca (mm)

$\Delta L_0$  raztezek preizkušanca (mm).



Ker smo uporabili merilne lističe, smo dobili dejanske deformacije kot rezultat meritev s preizkušanca. Za kontrolo pa po navedeni enačbi lahko izračunamo deformacije še iz podatkov pomika čeljusti preizkuševalnega okvira.

### 7.4.3 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti (Youngov modul) določimo na podlagi dveh meritev deformacij in pripadajočih napetosti:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (7.5)$$

kjer je

$E_t$  modul elastičnosti (MPa)

$\sigma_1$  napetost pri deformaciji  $\varepsilon_1 = 0,0005$  (MPa)

$\sigma_2$  napetost pri deformaciji  $\varepsilon_2 = 0,0025$  (MPa).

Standard dovoljuje, da se ob uporabi elektronske meritvene opreme modul elastičnosti določi s pomočjo linearne regresije na delu krivulje med deformacijama  $\varepsilon_1$  in  $\varepsilon_2$ .

### 7.4.4 Poissonov količnik

Poissonov količnik določimo na podlagi vrednosti deformacije v dveh medsebojno pravokotnih smereh:

$$\nu_n = -\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} \quad (7.6)$$

kjer je

$\nu_n$  Poissonov količnik, kjer  $n$  označuje izbrano smer normale;  $n=b$  (širina) ali  $n=h$  (debelina)

$\varepsilon$  sprememba deformacije v vzdolžni smeri preizkušanca (%)

$\varepsilon_n$  sprememba deformacije v smeri normale;  $n=b$  (širina) ali  $n=h$  (debelina) (%).

Spremembo deformacije se določi na enakem intervalu kot pri določitvi elastičnega modula.

### 7.4.5 Statistični parametri

Za dobljene mehanske lastnosti se izračunajo povprečna vrednost, standardni odklon in koeficient variacije:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \left( \sum_{i=1}^n X_i \right) \quad (7.7)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \cdot \bar{X}^2}{n-1}} \quad (7.8)$$

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{X}} \quad (7.9)$$

$\bar{X}$  povprečna vrednost

$s_{n-1}$  standardni odklon

$CV$  koeficient variacije (%)

$n$  število preizkušancev

$X_i$  izmerjena oziroma izračunana vrednost

### 7.5 Natezna preiskava

Natezna preiskava je bila izvedena skladno s standardom SIST EN ISO 527-1:2000 Polimerni materiali – Določanje nateznih lastnosti. Skladno s standardom izdelan preizkušavec se vpne v čeljusti mehanske naprave in monotonu natezno obremenjuje do porušitve. Med preiskavo se elektronsko beležijo aplicirana sila, pomik čeljusti ter vzdolžna in prečna deformacija preizkušanca. S pomočjo največje dosežene natezne sile se določi natezna trdnost, iz deformacijskih podatkov pa povezava med napetostjo in deformacijo, natezni modul elastičnosti in Poissonov količnik. Standard narekuje minimalno število petih preizkušancev za merodajnost preiskave.

#### 7.5.1 Priprava preizkušancev

Glede priprave kompozitnih preizkušancev za natezni preizkus se standard ISO 527 sklicuje na standard ISO 1268, in sicer na njegov 2. del, v primeru, da gre za izvedbo kompozita po postopku kontaktnega lameliranja. Zahtevane dimenzije preizkušanca so podane v delu, ki se

sklicuje na tip preiskave – v našem primeru v delu ISO 527-4 Plastics – Determination of tensile properties. Standard predpisuje tri različne oblike preizkušancev v odvisnosti od narave ojačitve in tipa matrice. V mojem primeru izberem tip 3, preizkušanec pravokotne oblike s ploščicami za vpenjanje. Predpisana geometrija preizkušanca mi narekuje geometrijo laminata, ki ga moram pripraviti za izdelavo preizkušancev.

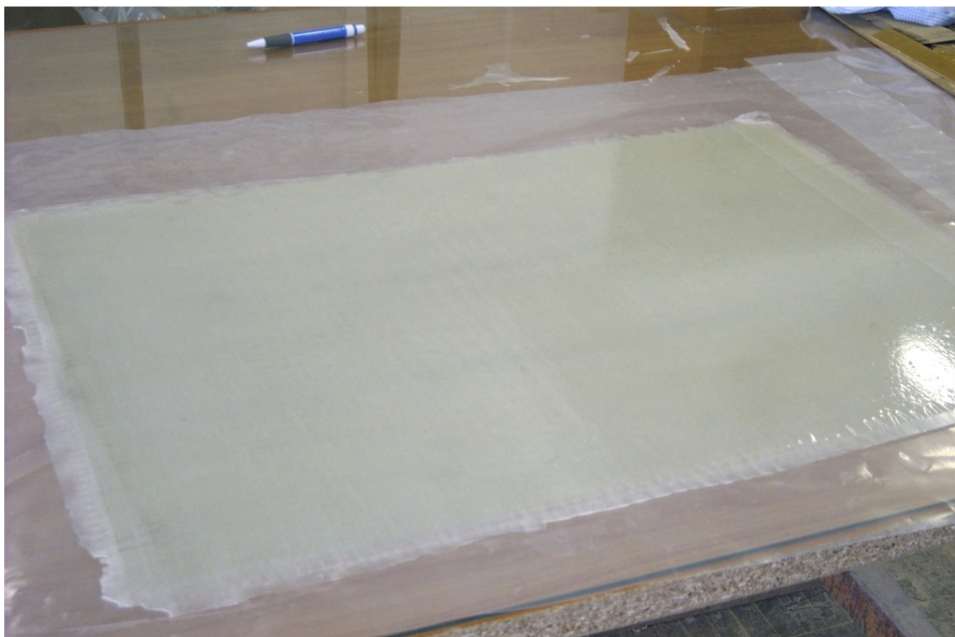
### 7.5.1.1 Priprava kompozitnega laminata

Ker standard zahteva minimalno 5 regularnih preiskav za preizkus določenega materiala, so bili izdelani tako veliki laminati, da so zadoščali za izrez 8 preizkušancev ter 32 podložnih ploščic. Pri tem je upoštevano, da ostaneta minimalno 2 preizkušanca viška za rezervo oziroma dvojno kontrolo pravilnosti preizkusa.

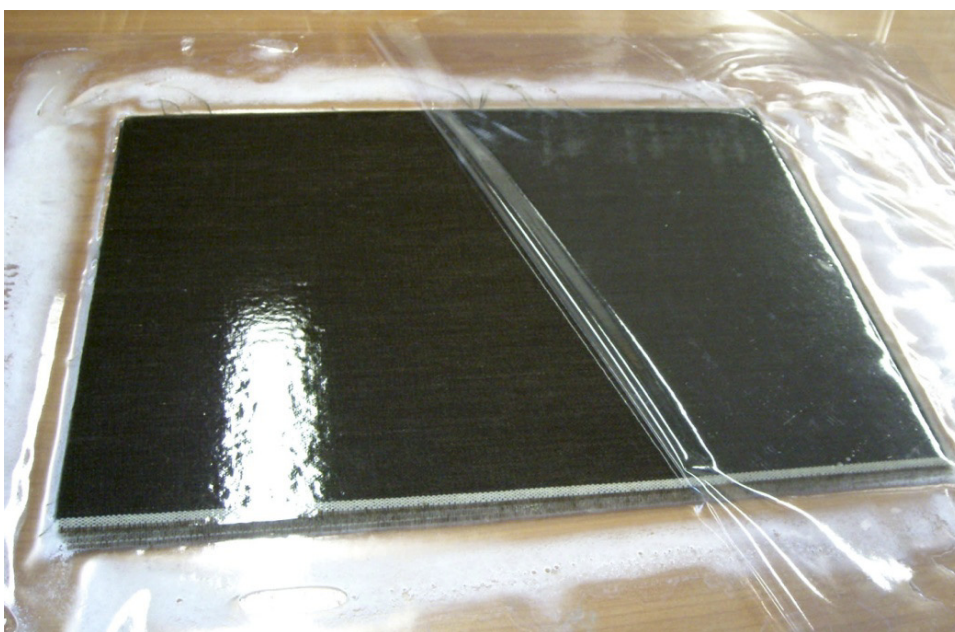
Laminati so bili izdelani iz steklene in lanene tkanine z dvema različnima matricama. Vsak laminat sestavljajo 4 plasti ojačitvene tkanine. Za iztiskanje zračnih mehurčkov iz matrice med posameznimi plastmi sta bila uporabljena klasičen kovinski valjček za lameliranje in čopič. Izrez preizkušancev je potekal po končanem strjevanju epoksidne matrice, t.j. 7 dni po izvedbi lameliranja.



Slika 7.3: Impregnacija steklene tkanine z epoksi smolo za sanacije lesenih konstrukcij – 3. plast



Slika 7.4: Stekljeni laminat, pripravljen za izrez preizkušancev – epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij



Slika 7.5: Laneni laminat, pripravljen za izrez preizkušancev – epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij



Slika 7.6: Laneni laminat, pripravljen za izrez preizkušancev – epoksi smola za sanacije lesenih konstrukcij

Kvalitetna izdelava kompozita po postopku ročnega lameliranja je dokaj zapletena zadeva, saj zračni mehurčki, ki se ustvarijo ob nanašanju matrice, oslabijo mehanske lastnosti laminata. Zato je potrebno pri lameliranju posvetiti veliko pozornosti že pri mešanju obeh komponent smole, vlivanju smole na tkanino in natančnem iztiskanju mehurčkov s pomočjo valjčka. Pri tem je potrebno paziti tudi na ustrezno orientacijo vlaken v slojih in iztiskanju odvečne smole iz kompozita.

#### 7.5.1.2 Geometrija preizkušancev

Geometrija vzorcev je natančno določena v standardu ISO 527-4 Plastics – Determination of tensile properties, ki obravnava 3 tipe vzorcev. Za tkanine, nosilne v eni smeri (vlakna so orientirana v vzdolžni osi tkanine, prečno pa so povezana z nenosilnimi nitmi), je primeren tip 1, za dvoosno nosilne ojačitvene tkanine pa sta primerna tipa 2 in 3. Razlikujeta se glede na izdelavo preizkušanca s ploščicami ali brez ploščic za vpenjanje. Standard pravi, da izdelava ploščic ni nujna, v kolikor imamo ustrezno testno opremo in velikost sil ne presega sile zdrsa na vpenjalni glavi.

Vzorci so sestavljeni iz štirih plasti ojačitvene tkanine. Ker pa ima lanena tkanina v smeri osnovne niti večjo natezno trdnost kot v smeri votka, so bili izdelani vzorci v obeh pravokotnih smereh. Tako je bilo za vsako izmed matric izdelanih sedem preizkušancev z glavno nosilno osjo v smeri osnovne niti ter sedem preizkušancev z glavno osjo v smeri votkovne niti. Na ta način pridobimo podatek o natezni trdnosti tkanine v obeh smereh. Vsak vzorec je bil označen s smerjo orientacije osnovne niti.

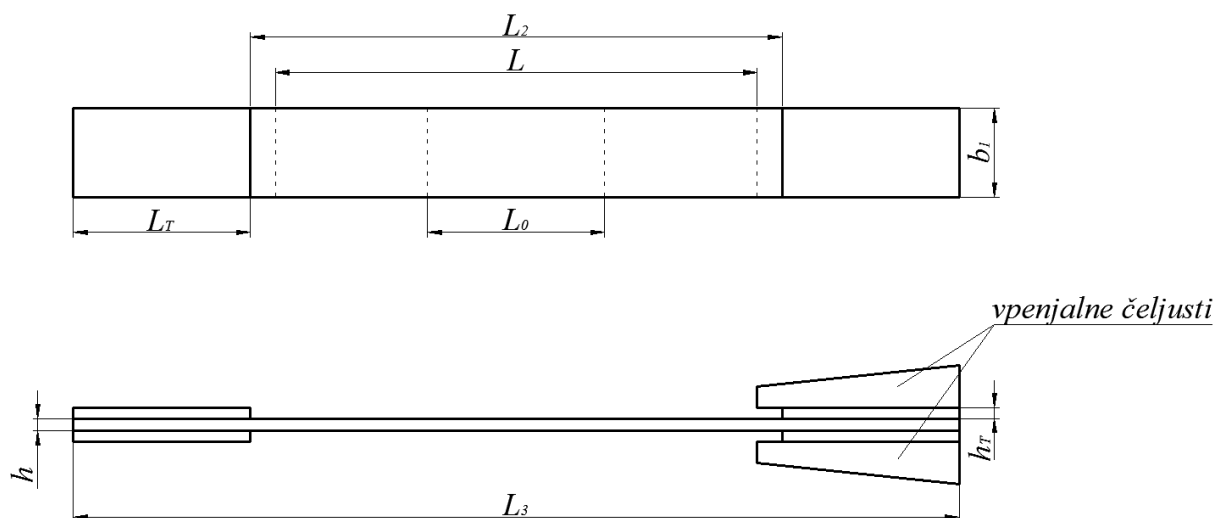
Uporabljena steklena tkanina ima enako nosilnost v obeh smereh, zato je bila izdelana le ena serija sedmih preizkušancev za vsako izmed matric.

Dolžina preizkušanca je skladno z zahtevami standarda znašala 250 mm, z razmikom med vpenjalnimi ploščicami 150 mm in širino 25 mm. Debelina lanenega vzorca je znašala 3,5 mm.

Podložne ploščice so bile izrezane iz istega laminata kot preizkušanci in prilepljene na preizkušane z enako epoksi smolo, kot je bila uporabljena za matrico pri izvedbi kompozita. Dimenzije podložnih ploščic so bile: dolžina 50 mm, širina 25 mm in debelina 3,5 mm.



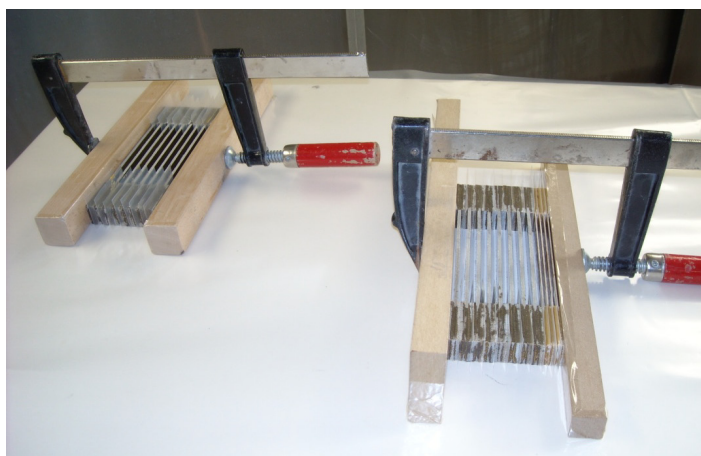
Slika 7.7: Izrezani preizkušanci in vpenjalne ploščice pripravljene za lepljenje



Slika 7.8: Skica preizkušanca tipa 3 za natezno preiskavo, skladno s standardom ISO 527-4

Preglednica 7.6: Razlaga v standardu definiranih oznak in priporočene dimenzije za preizkušane tipa 3

$L_3$	Celotna dolžina preizkušanca	$\geq 250$ mm
$L_2$	Razdalja med ploščicami za vpenjanje	$150 \pm 1$ mm
$b_1$	Širina	$25 \pm 0,5$ mm ali $50 \pm 0,5$ mm
$h$	Debelina preizkušanca	2 do 10 mm
$L_0$	Dolžina merilnega območja (priporočena za deformetre)	$50 \pm 1$ mm
$L$	Začetna razdalja med prijemališčema	136 mm (nominalno)
$L_T$	Dolžina vpenjalnih ploščic	$\geq 50$ mm
$h_T$	Debelina vpenjalnih ploščic	1 do 3 mm



Slika 7.9: Lepljenje vpenjalnih ploščic na preizkušance

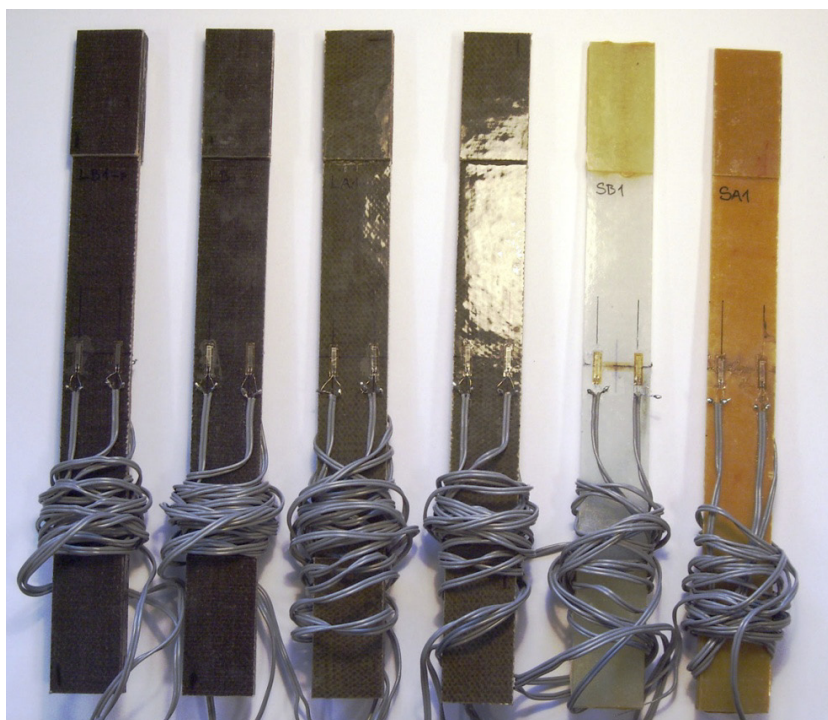
### 7.5.1.3 Merska mesta

Preizkušanci so bili opremljeni s tremi oz. z dvema merilnima lističema. Meritev deformacij dveh vzporedno orientiranih merilnih lističev v vzdolžni smeri na isti ploskvi preizkušanca nam služi kot informacija za izravnavo vpliva ekscentričnega vpetja oziroma lege vpenjalnih čeljusti. Tretji merilni listič pa je nameščen v prečni smeri na nasprotni ploskvi preizkušanca. Preiskavo natezne trdnosti smo izvedli v dveh serijah. V prvi seriji je bil po en preizkušanec vsakega tipa, torej 6 preizkušancev SA, SB, LA-v, LA-p, LB-v, LB-p, izmed katerih so bili na vsakega nameščeni trije merilni lističi. S prvo serijo preiskav smo tako lahko ovrednotili vpliv ekscentričnosti vpetja in ugotovili, da le-ta ni problematična. Zato smo v drugi seriji uporabili manj merilnih lističev, in sicer za preizkušance SA in SB le po enega vzdolžnega in enega prečnega, pri dveh preizkušancih v skupinah LA-v in LB-v dva vzdolžna in enega prečnega ter pri dveh enega vzdolžnega in enega prečnega, pri enem preizkušancu v skupinah LA-p in LB-p dva vzdolžna in enega prečnega in pri treh enega vzdolžnega in enega prečnega. S tem smo pri najpomembnejših preizkušancih še vedno kontrolirali vpliv ekscentričnosti, ki je potrjeval, da opuščanje drugega vzdolžnega merilnega lističa na preostalih preizkušancih ni problematično. Preglednejši zapis števila merilnih lističev po skupinah preizkušancev je prikazan v spodnji preglednici.

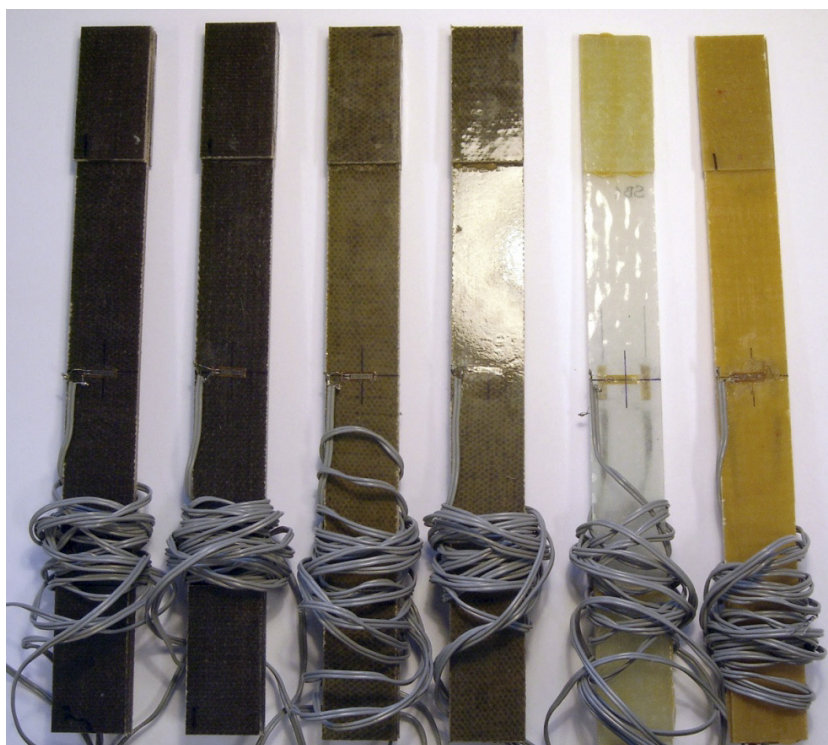
Preglednica 7.7: Pregled števila merilnih lističev po skupinah preizkušancev

Oznaka preizkušanca	Število preizkušancev z dvema vzdolžnima in enim prečnim merilnim lističem	Število preizkušancev z enim vzdolžnim in enim prečnim merilnim lističem
LA-v	3	2
LA-p	2	3
LB-v	3	2
LB-p	2	3
SA	1	4
SB	1	4





Slika 7.10: Prva skupina preizkušancev z dvema merilnima lističema v smeri delovanja obtežbe – čelna stran: od leve proti desni: LB1-p, LB1-v, LA1-p, LA1-v, SB1, SA1



Slika 7.11: Prva skupina preizkušancev z enim merilnim lističem prečno na smer delovanja obtežbe – hrbtna stran: od leve proti desni: LB1-p, LB1-v, LA1-p, LA1-v, SB1, SA1

## 7.5.2 Postopek preiskave

### 7.5.2.1 Testna atmosfera

Preiskava se mora izvajati pod enakimi atmosferskimi pogoji, kot so jim bili podvrženi preizkušanci v času hranjenja. V našem primeru se preiskava vodi pri sobnih atmosferskih pogojih. Manjše ambientalne spremembe v prostoru pa lahko vplivajo na natančnost meritve deformacij, zato smo uporabili dodatni vzorec, ki je bil opremljen s tremi merilnimi lističi, dvema v vzdolžni in enim v prečni smeri, ter povezan z računalnikom za procesiranje podatkov deformacij, ki je sprti korigiral rezultate deformacij z natezno obremenjenih preizkušancev glede na deformacije, do katerih je prihajalo na kontrolnem neobremenjenem vzorcu.



Slika 7.12: Kontrolni vzorec za sprotno korigiranje ambientalnih deformacij

### 7.5.2.2 Dimenzije preizkušancev

Pred preiskavo je skladno z navodili standarda potrebno vizualno pregledati vse vzorce, ki ne smejo biti ukrivljeni v nobeni smeri, imeti morajo medsebojno pravokotne pare vzporednih ploskev, robovi pa morajo biti brez odrgnin in drugih poškodb. Vzorcev, ki ne ustrezajo tem zahtevam, v preiskavi ne smemo upoštevati.

Minimalno število preizkušancev je 5, lahko pa jih uporabimo več, v kolikor je zahtevana večja natančnost preiskave. Rezultatov preiskave, pri kateri pride do zdrsa vpenjalnih čeljusti,

do porušitve vzorca v območju 10 mm od vpenjalne glave ali do prezgodnje porušitve zaradi kakršnega koli drugega očitnega razloga, ne smemo upoštevati.

Potrebno je tudi natančno določiti dimenzije vsakega preizkušanca. Širino  $b$  moramo določiti na 0,1 mm, debelino  $h$  pa na 0,02 mm natančno na sredini vsakega preizkušanca in v območju petih milimetrov od vsakega konca merilnega območja ( $L_0$ ).

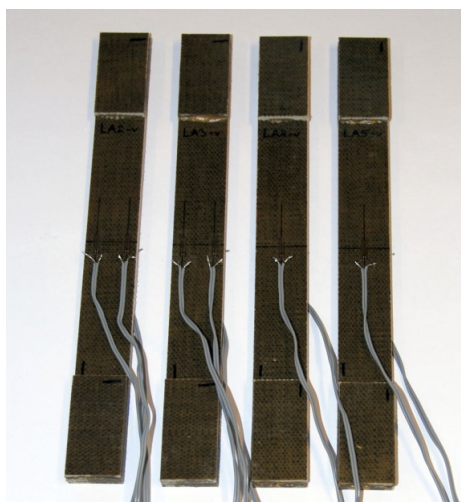
Da je vzorec regularen, morajo vsa izmerjena območja zadoščati pogojem geometrije preizkušanca z ustreznimi tolerancami, kot jih navaja standard. Iz vseh izmerjenih količin nato izračunamo aritmetično sredino in tako dobimo širino in debelino vzorca, ki nam služita za nadaljnje izračune.

Preglednica 7.8: Pregled povprečnih dimenzij preizkušancev določenih skladno s standardom

Oznaka skupine	Razdalja med ploščicami za vpenjanje [mm]	Širina preizkušanca $b$ [mm]			Debelina preizkušanca $h$ [mm]		
		zgoraj	sredina	spodaj	zgoraj	sredina	spodaj
LA-v	149,13	25,60	25,60	25,60	3,32	3,50	3,50
LA-p	149,46	25,60	25,60	25,60	3,42	3,42	3,44
LB-v	149,53	25,70	25,70	25,70	3,60	3,60	3,58
LB-p	150,00	25,10	25,10	25,20	3,48	3,48	3,48
SA	149,17	25,80	25,70	25,70	1,42	1,42	1,40
SB	148,97	25,20	25,20	25,10	1,48	1,48	1,48

### 7.5.2.3 Namestitev merilnih lističev

Merilne lističe prilepimo znotraj merilnega območja in označimo njihovo lokacijo. Za meritev Poissonovega količnika potrebujemo dva merilna lističa, in sicer enega v vzdolžni in drugega v prečni smeri. Nato zvežemo vsa merilna mesta z merilnim instrumentom in preverimo pravilno delovanje instrumenta.



Slika 7.13: Prikaz nameščenih merilnih lističev na preizkušancih iz skupine LA-v

#### 7.5.2.4 Vpenjanje

Vpenjanje vzorca v vpenjalno glavo mora biti izvedeno izredno natančno. Za pravilno meritev je ključnega pomena, da je vzdolžna os preizkušanca poravnana z vzdolžno osjo testne naprave. Pri vpenjanju pa moramo biti pozorni, da ne pride do zdrsa vzorca med stiskanjem vpenjalnih čeljusti ali do prevelikih začetnih napetosti  $\sigma_0$ .



Slika 7.14: Prikaz preizkušanca, natančno vpetega v vpenjalne čeljusti

### 7.5.2.5 Hitrost preiskave

Hitrost preiskave vpliva na spreminjanje napetosti v preizkušancu, ki pa mora biti čim bolj konstantno. Ustrezno hitrost nadziramo s pomočjo krmiljenja pomika bata. Standard podaja več priporočljivih hitrosti obremenjevanja. Izbrana je bila hitrost obremenjevanja 2 mm/min z dovoljeno toleranco  $\pm 20\%$ .



Slika 7.15: Preizkuševalni okvir s preizkušancem ter računalniške enote za vodenje in spremljanje preiskave

### 7.5.3 Rezultati natezne preiskave

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati nateznih preiskav preizkušancev ločeno po skupinah glede na uporabljeno matrico in ojačitveno tkanino. Vse preiskave so bile izvedene uspešno, saj ni prišlo do težav, povezanih s kvaliteto lepljenja vpenjalnih ploščic, niti do zdrsa v napenjalni glavi.

### 7.5.3.1 Skupina LA-v

V tej skupini so bili zajeti preizkušanci z matrico iz specialne epoksi smole za sanacije lesenih konstrukcij ter ojačeni s tkanino iz lanenih vlaken. Močnejša os tkanine je bila orientirana vzdolž preizkušanca, oziroma v smeri obremenitve.

Preizkušanci so se rušili pri porušnih silah med 6,8 in 7,3 kN, kar predstavlja povprečno doseženo vrednost natezne trdnosti  $\sigma_M = 78,08$  MPa. Deformacije so bile večje od merilnega območja merilnih lističev, zato izmerjeni podatki o porušni vzdolžni deformaciji niso pravilni. Verodostojne pa so deformacije, odčitane pred odpovedjo merilnih lističev, ter izmerjeni pomik. Na preizkušancu LA1-v sta merilna lističa v smeri obtežbe odpovedala izjemoma hitro in torej ne odražata dejanskega stanja izvedene deformacije vzorca. Velikost deformacije pri poružitvi so zato izračunane tudi iz podatka o pomiku čeljusti, vendar se pri primerjanju tako določenih deformacij z deformacijami izmerjenimi s pomočjo merilnih lističev, opazi razliko, saj so iz pomika čeljusti izračunane deformacije večje od izmerjenih vrednosti. Ker zaradi pomanjkanja podatkov o deformacijah diagram  $\sigma$ - $\varepsilon$  ni izrisan do konca, je v nadaljevanju prikazan tudi diagram napetost – pomik, na katerem je vidna končna porušna napetost vsakega izmed preizkušancev. Rezultati so sicer zelo primerljivi med posameznimi preizkušanci, kar potrjuje enakomerno kvaliteto izvedbe kompozita ter tudi enakovrednost poteka preiskav.

Pri vseh preizkušancih je prišlo do poružitve v območju med zgornjo in spodnjo čeljustjo. Smer poružitve je bila v vseh primerih vodoravna, zato so rezultati veljavni, četudi do poružitve ni prišlo na sredini vzorca.

Preglednica 7.9: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih

Oznaka preizkušanca	$\sigma_M$ (MPa)	$\varepsilon_M$ (%)	$E_t$ (GPa)	$\nu_b$
LA1-v	81,16	0,67	8,16	0,30
LA2-v	78,26	2,39	7,97	0,28
LA3-v	79,29	2,39	7,69	0,24
LA4-v	76,16	2,39	7,97	0,26
LA5-v	75,54	2,45	7,97	0,27
Povprečna vrednost ( $\bar{X}$ ):	<b>78,08</b>	<b>2,06</b>	<b>7,95</b>	<b>0,27</b>
Standardni odklon ( $s_{n-1}$ ):	2,30	0,78	0,17	0,02
Koeficient variacije (CV):	2,94	37,79	2,09	8,07

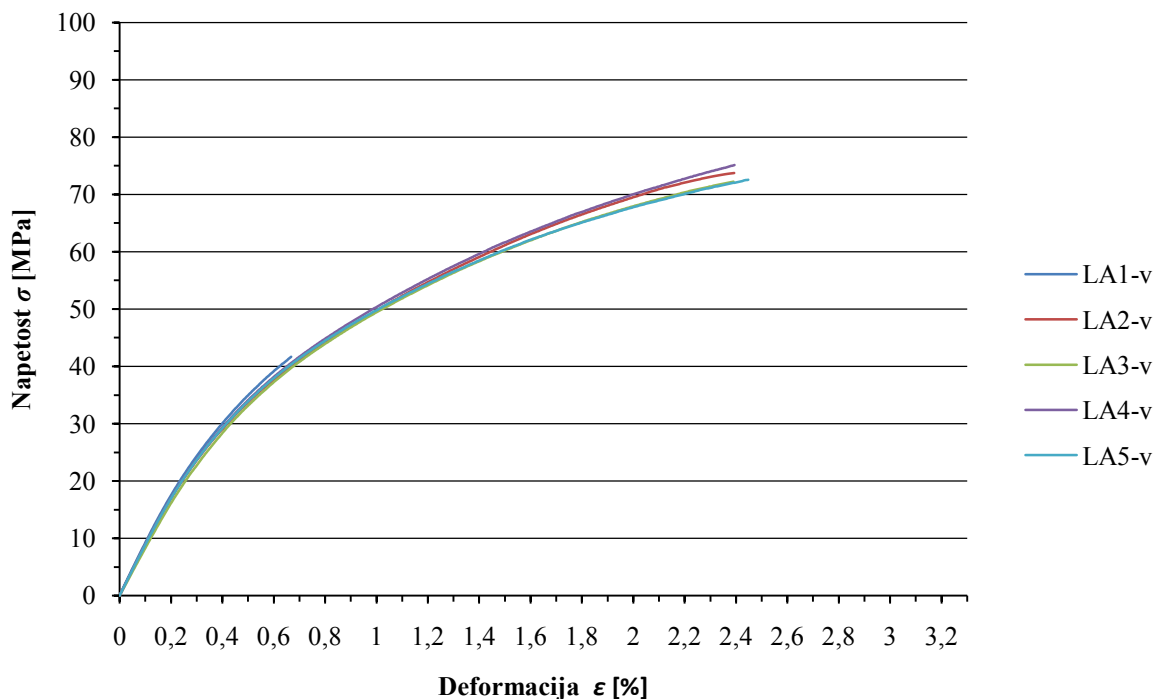


Diagram 7.1: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LA-v

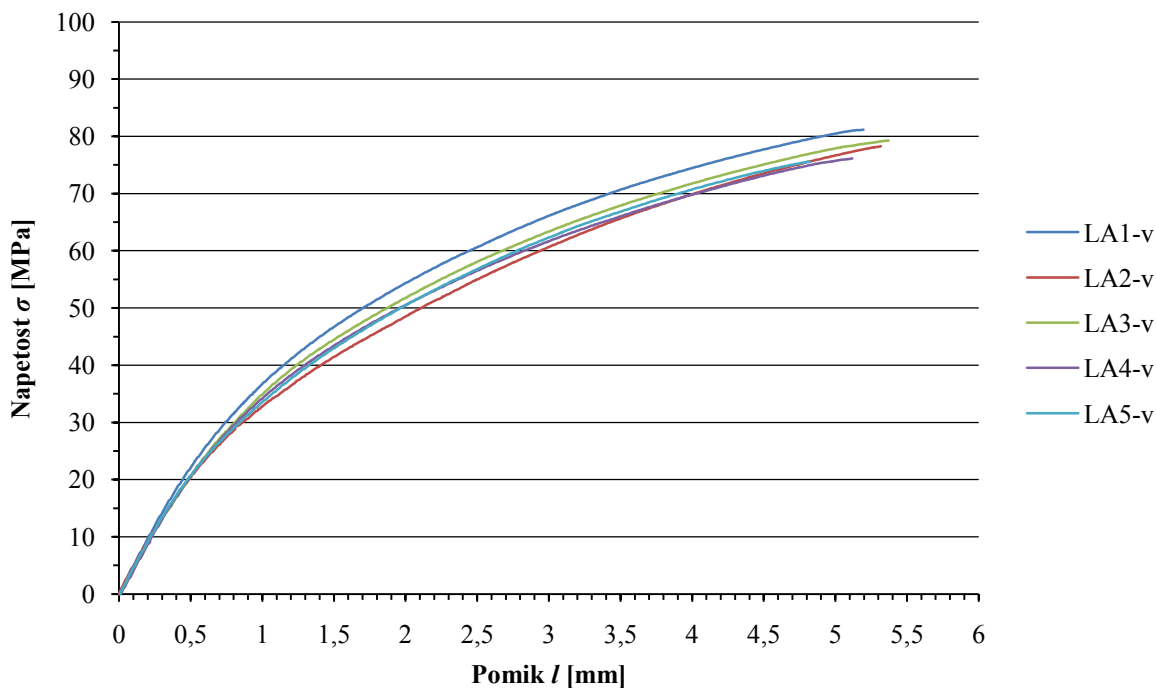


Diagram 7.2: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LA-v

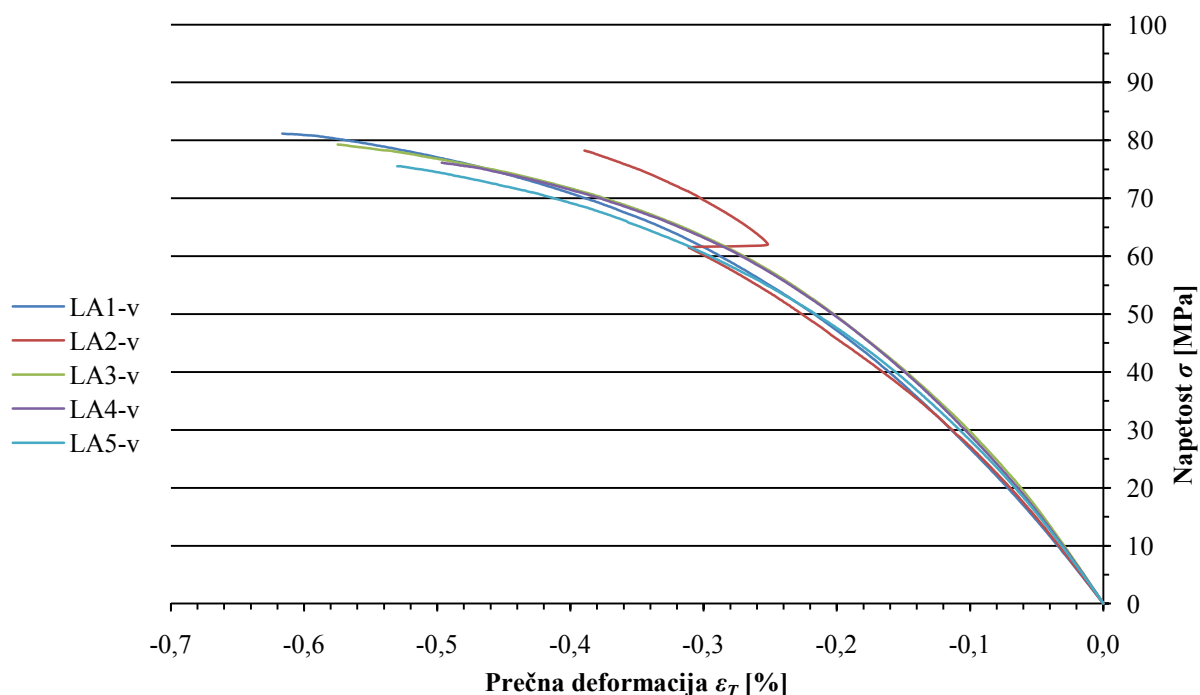


Diagram 7.3: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LA-v

### 7.5.3.2 Skupina LA-p

Vzorci v tej skupini so imeli enako matrico in tkanino kot vzorci iz predhodne skupine, le da je bila usmerjenost močnejše osi tkanine tokrat prečna na vzdolžno os preizkušanca, torej pravokotna na smer obremenjevanja.

Posledično je prihajalo do porušitev pri nižjih vrednostih vnesene sile, in sicer med 3,9 in 5,2 kN, kar za celotno skupino predstavlja v povprečju 55,11 MPa. Ker je porušitev nastala pri manjši sili, je bila ustrezno manjša tudi deformacija, ki ni povzročila odpovedi merilnih lističev. Zato so v tej skupini vse deformacije točno izmerjene z merilnimi lističi, popoln pa je tudi  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagram.

Značaj porušitev, do katerih je prihajalo med obema območjema vpenjalnih ploščic in v horizontalni smeri, je bil tudi pri tej skupini regularen.



Preglednica 7.10: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih

Oznaka preizkušanca	$\sigma_M$ (MPa)	$\varepsilon_M$ (%)	$E_t$ (GPa)	$\nu_b$
LA1-p	53,18	1,96	5,81	0,21
LA2-p	56,24	2,01	5,97	0,19
LA3-p	53,68	1,91	5,97	0,21
LA4-p	57,29	1,78	6,80	0,20
LA5-p	55,15	1,73	6,41	0,20
Povprečna vrednost ( $\bar{X}$ ):	<b>55,11</b>	<b>1,88</b>	<b>6,19</b>	<b>0,20</b>
Standardni odklon ( $s_{n-1}$ ):	1,72	0,12	0,41	0,01
Koeficient variacije (CV):	3,12	6,35	6,56	3,34

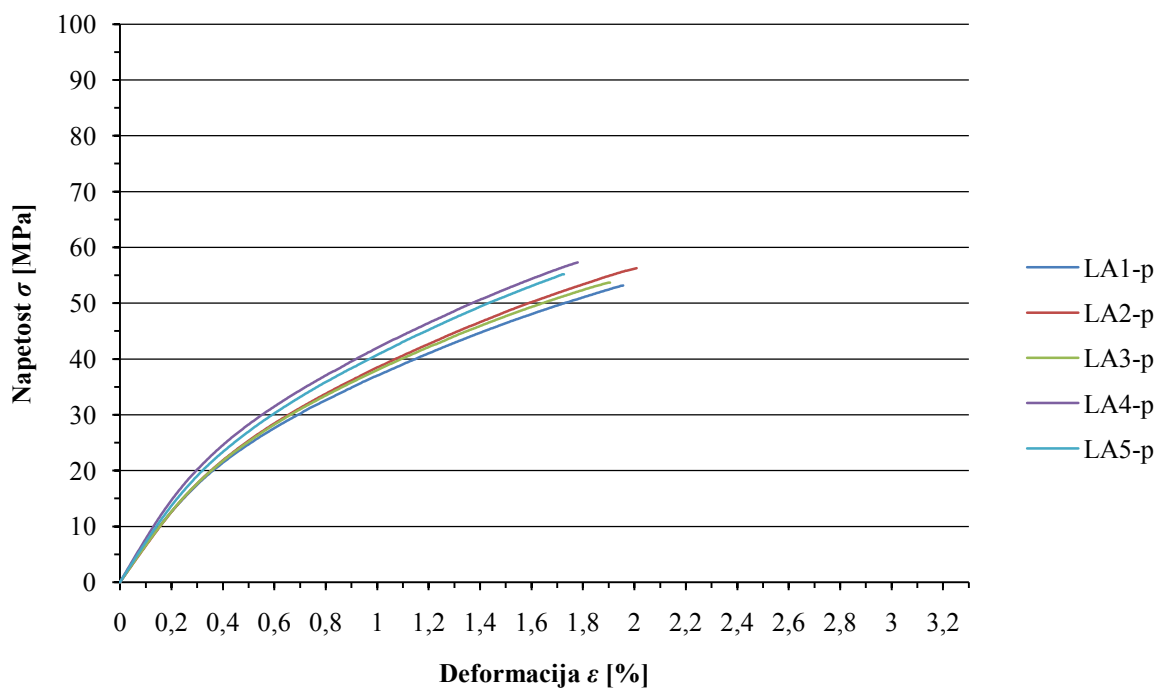


Diagram 7.4: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LA-p

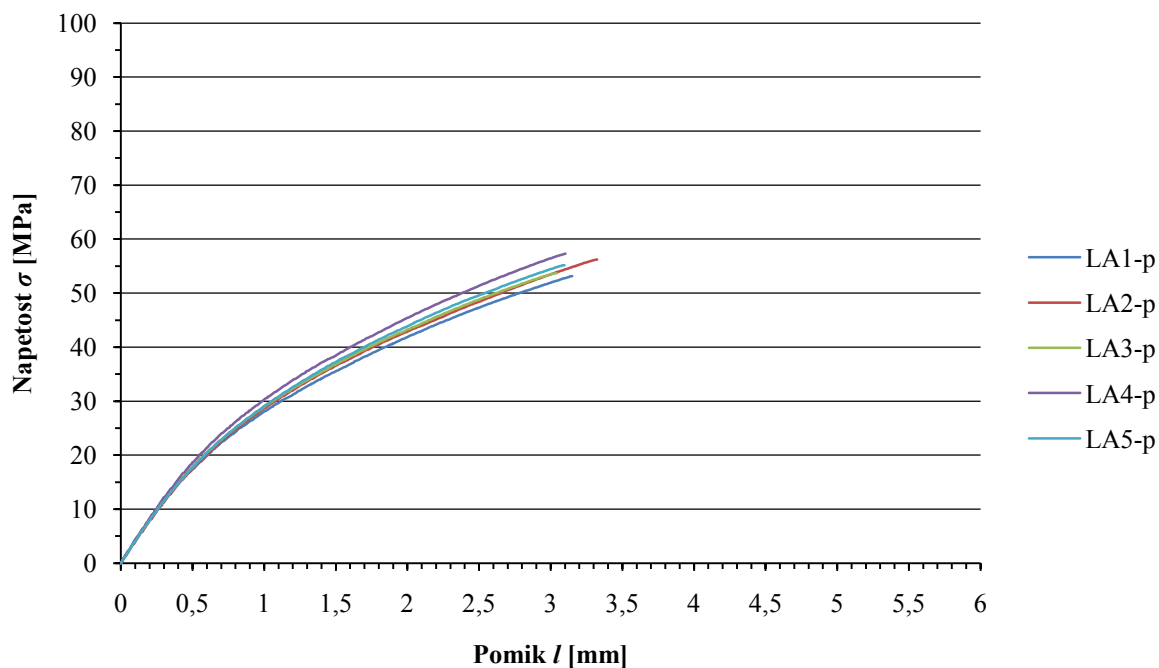


Diagram 7.5: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LA-p

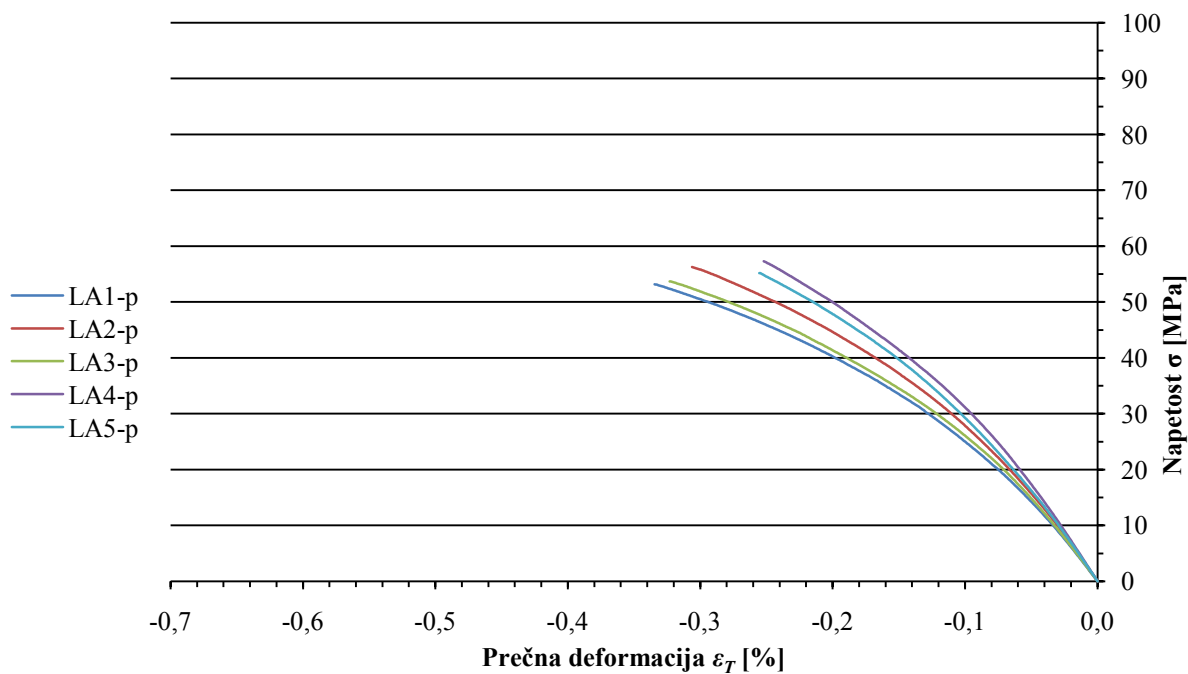


Diagram 7.6: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LA-p

### 7.5.3.3 Skupina LB-v

V tej skupini so bili zajeti preizkušanci z matrico iz specialne epoksi smole za sanacije betonskih konstrukcij ter ojačeni z enako tkanino iz lanenih vlaken kot prejšnji dve skupini. Močnejša os tkanine je bila orientirana vzdolž preizkušanca, oziroma v smeri obremenitve. Sile pri poružitvi vzorcev so dosegale vrednosti med 7,0 in 7,3 kN, kar, preračunano, v povprečju predstavlja natezno trdnost 78,12 MPa.

Vsi preizkušanci v skupini so dosegali zelo podobne vrednosti napetosti, vendar je zaradi velikih deformacij ponovno prišlo do odpovedi merilnih lističev v vzdolžni smeri. V tabeli in na diagramu  $\sigma$ - $\varepsilon$  so prikazane izmerjene velikost deformacij v merilnem območju merilnih lističev, dejanska porušna napetost pa je vidna iz diagrama napetost – pomik.

Poružitve vzorcev so se dogajale v sredinskem območju preizkušancev ter tudi v bližini vpenjalnih ploščic. Vse poružitve so bile pravilne.

Preglednica 7.11: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih

Oznaka preizkušanca	$\sigma_M$ (MPa)	$\varepsilon_M$ (%)	$E_t$ (GPa)	$\nu_b$
LB1-v	76,65	2,98	8,06	0,28
LB2-v	77,99	2,37	7,87	0,27
LB3-v	77,00	2,58	7,52	0,28
LB4-v	79,85	2,99	7,93	0,25
LB5-v	79,12	2,99	8,22	0,25
Povprečna vrednost ( $\bar{X}$ ):	<b>78,12</b>	<b>2,78</b>	<b>7,92</b>	<b>0,26</b>
Standardni odklon ( $s_{n-1}$ ):	1,36	0,29	0,26	0,02
Koeficient variacije ( $CV$ ):	1,74	10,50	3,27	6,03

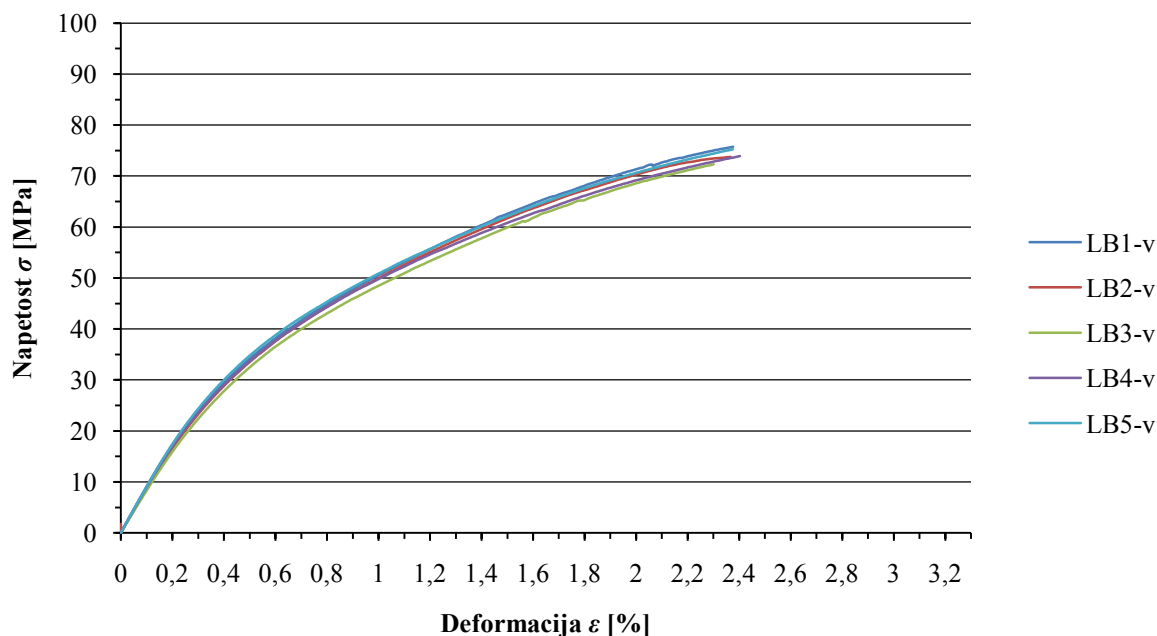


Diagram 7.7: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LB-v

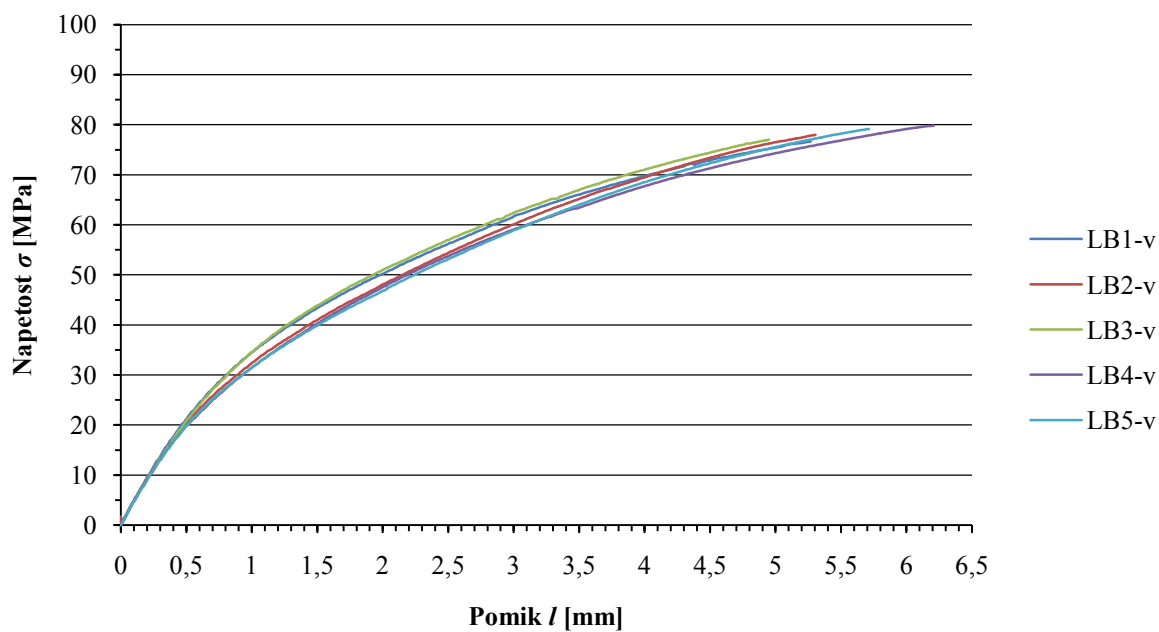


Diagram 7.8: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LB-v

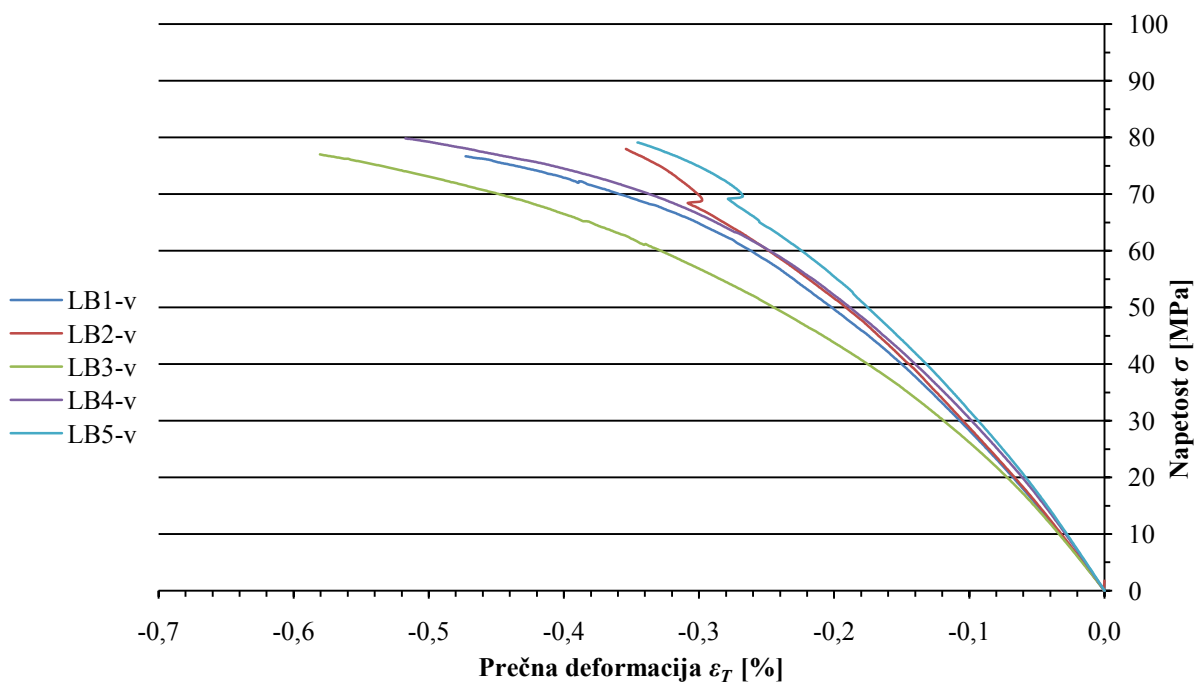


Diagram 7.9: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LB-v

#### 7.5.3.4 Skupina LB-p

Vzorci v tej skupini so imeli enako matrico in tkanino kot vzorci iz predhodne skupine, le da je obremenjevanje potekalo v šibkejši smeri nosilnosti tkanine.

Zaradi nižje nosilnosti tkanine v smeri votka so bile dosežene tudi nižje vrednosti porušnih sil, in sicer med 3,3 in 5,1 kN. Povprečna natezna trdnost skupine je bila 54,92 MPa, pri deformaciji 1,80 %. Prikazani  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagram je torej popoln, saj so merilni lističi zabeležili deformacije tekom celotnega postopka preiskave.

Do porušitev je prihajalo ob ploščicah za vpenjanje in tudi v sredinskem delu preizkušanca. Porušitve so bile vodoravne in pravilne.

Preglednica 7.12: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih

Oznaka preizkušanca	$\sigma_M$ (MPa)	$\varepsilon_M$ (%)	$E_t$ (GPa)	$\nu_b$
LB1-p	58,84	1,81	6,56	0,20
LB2-p	57,88	1,74	6,73	0,19
LB3-p	51,56	1,65	6,18	0,20
LB4-p	54,22	2,21	5,95	0,20
LB5-p	52,11	1,57	6,36	0,22
Povprečna vrednost ( $\bar{X}$ ):	<b>54,92</b>	<b>1,80</b>	<b>6,36</b>	<b>0,20</b>
Standardni odklon ( $s_{n-1}$ ):	3,31	0,25	0,31	0,01
Koeficient variacije ( $CV$ ):	6,03	13,76	4,82	4,19

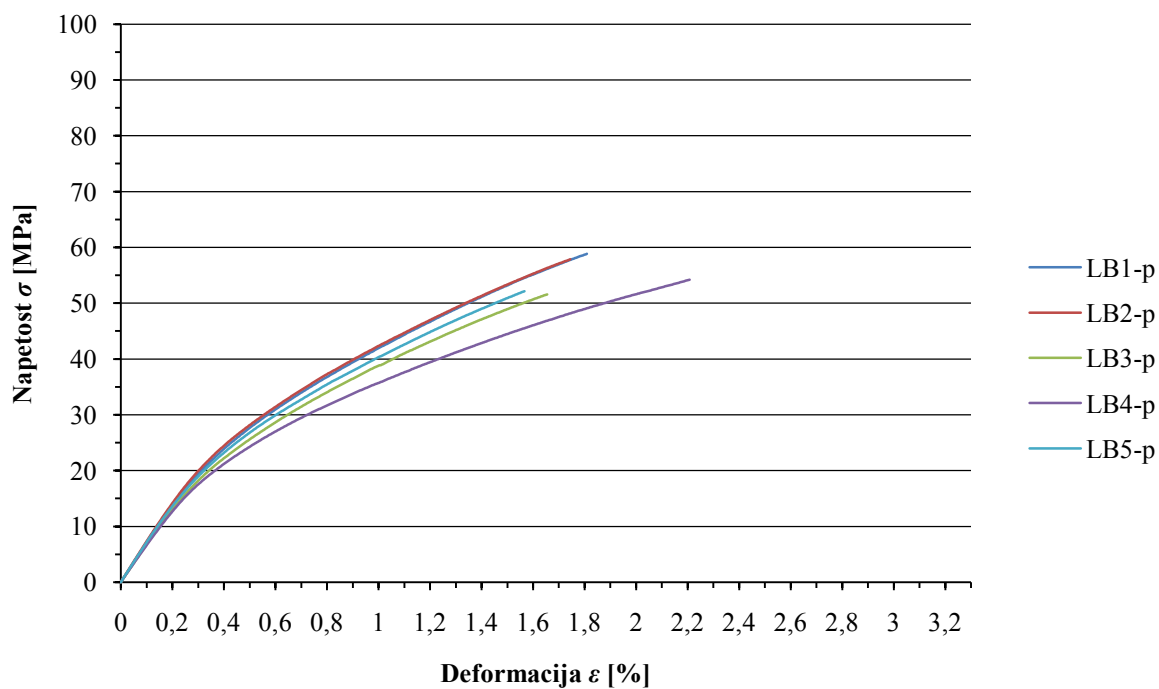


Diagram 7.10: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini LB-p

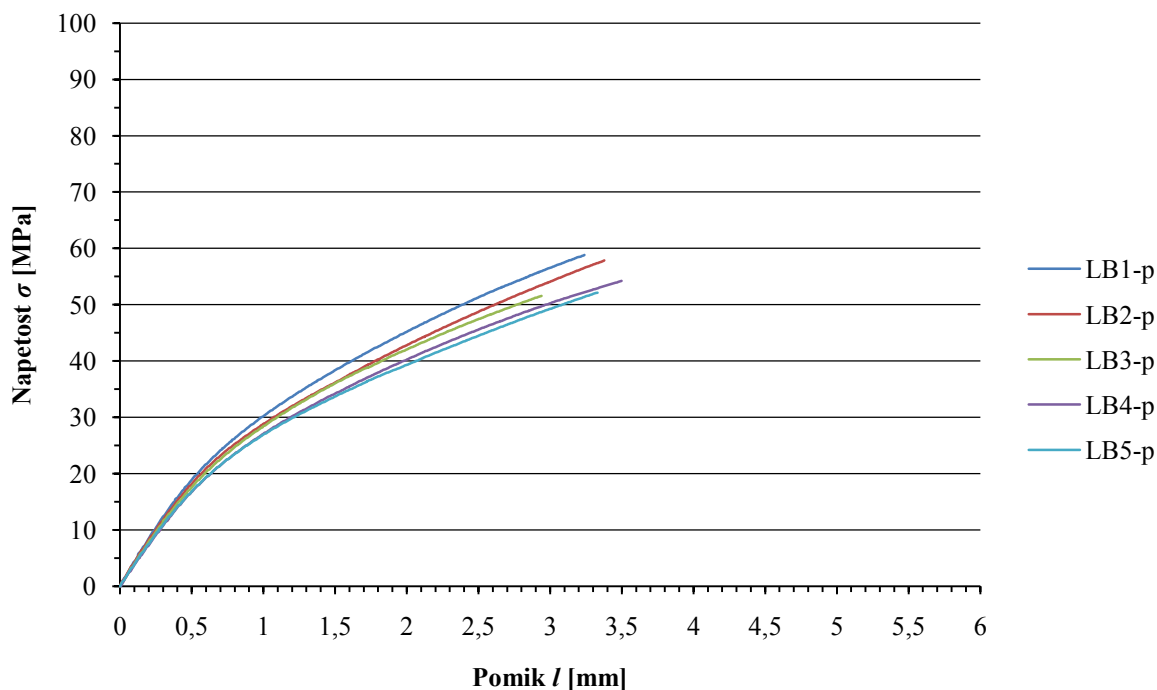


Diagram 7.11: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini LB-p

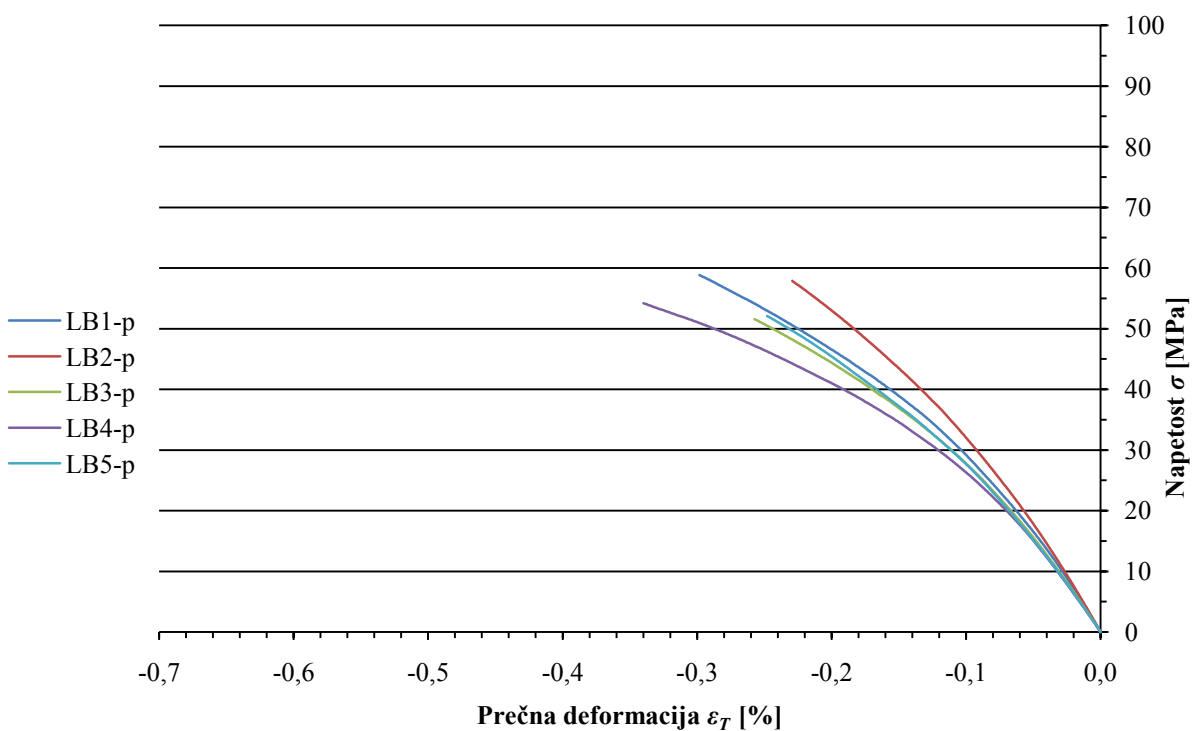


Diagram 7.12: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini LB-p

### 7.5.3.5 Skupina SA

V skupini SA so zajeti preizkušanci iz kompozitnega laminata, ojačenega s steklenimi vlakni, prepojenimi z matrico iz specialne epoksi smole za sanacije lesenih konstrukcij.

Druga vrsta ojačitvene tkanine se je močno odražala na rezultatih. Preizkušanci so se rušili pri silah med 10,9 in 12,4 kN in tako dosegali natezne trdnosti tudi do 339,40 MPa. Povprečna vrednost natezne trdnosti pa je znašala 318,77 MPa. Zaradi večje togosti materiala so bile deformacije bistveno manjše in niso povzročile odpovedi merilnih lističev.

Do porušitev je prihajalo znotraj celotnega območja med vpenjalnimi ploščicami, tip porušitve pa je bil v vseh primerih pravilen.

Preglednica 7.13: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih

Oznaka preizkušanca	$\sigma_M$ (MPa)	$\varepsilon_M$ (%)	$E_t$ (GPa)	$\nu_b$
SA	329,86	2,11	19,71	0,15
SA	317,92	1,89	19,96	0,12
SA	298,30	1,86	19,23	0,14
SA	308,38	1,91	19,87	0,12
SA	339,40	2,10	20,38	0,14
Povprečna vrednost ( $\bar{X}$ ):	<b>318,77</b>	<b>1,98</b>	<b>19,83</b>	<b>0,13</b>
Standardni odklon ( $s_{n-1}$ ):	16,40	0,12	0,42	0,02
Koeficient variacije (CV):	5,15	6,09	2,11	11,46



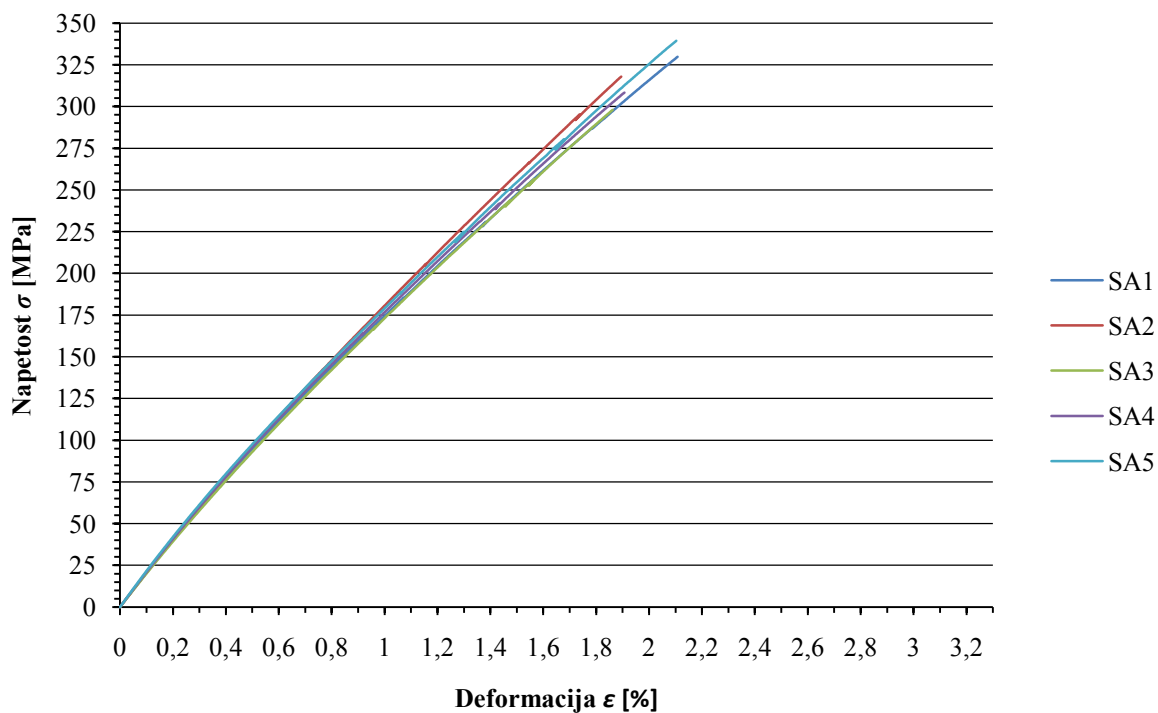


Diagram 7.13: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini SA

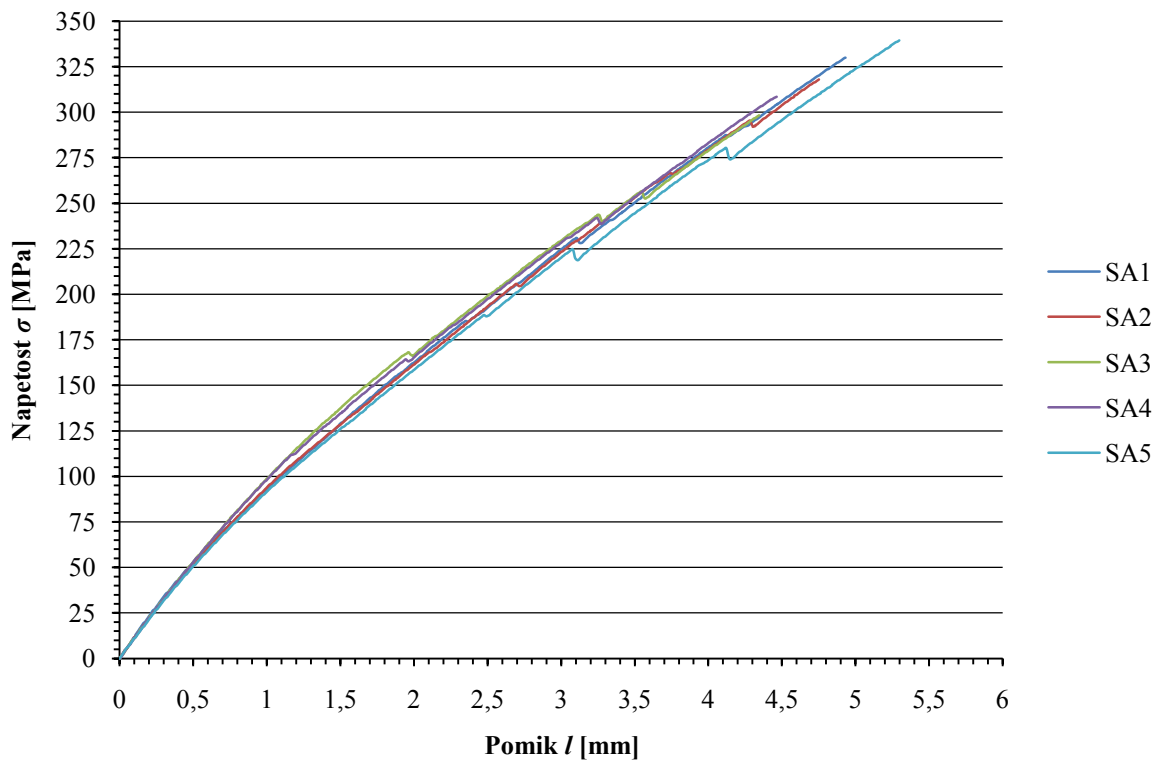


Diagram 7.14: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini SA

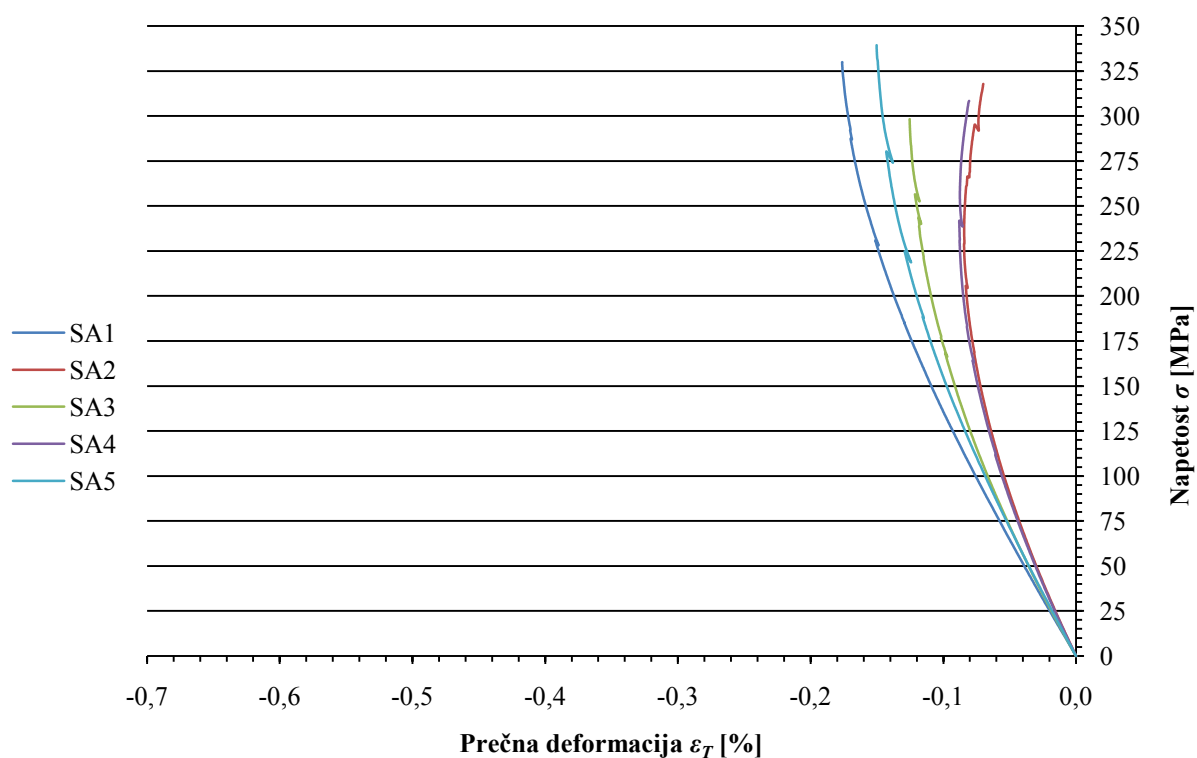


Diagram 7.15: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini SA

### 7.5.3.6 Skupina SB

V tej skupini preizkušancev so bila za ojačitev uporabljena enaka steklena vlakna kot pri prejšnji skupini, enaka je bila tudi orientacija vlaken, razlikoval se je le tip matrice. Uporabljena je bila specialna epoksi smola za sanacije betonskih konstrukcij, ki pa naj bi bila po svojih mehanskih lastnostih zelo podobna smoli za sanacije lesenih konstrukcij. Rezultati natezne preiskave so to podobnost tudi potrdili.

S pretržnimi silami med 10,9 in 12,7 kN ter povprečno natezno trdnostjo 318,73 MPa smo dobili praktično enake rezultate kot pri skupini preizkušancev SA.

Tudi v tej skupini so bile vse porušitve pravilne, deformacije pa znotraj dopustnega območja merilnih lističev.

Preglednica 7.14: Rezultati natezne preiskave po preizkušancih

Oznaka preizkušanca	$\sigma_M$ (MPa)	$\varepsilon_M$ (%)	$E_t$ (GPa)	$\nu_b$
SB	329,54	2,16	18,85	0,15
SB	333,19	2,19	19,03	0,14
SB	340,80	2,28	18,84	0,15
SB	290,83	1,87	18,80	0,15
SB	299,30	1,94	18,49	0,14
Povprečna vrednost ( $\bar{X}$ ):	<b>318,73</b>	<b>2,09</b>	<b>18,80</b>	<b>0,15</b>
Standardni odklon ( $s_{n-1}$ ):	22,19	0,17	0,19	0,01
Koeficient variacije (CV):	6,96	8,36	1,03	4,55

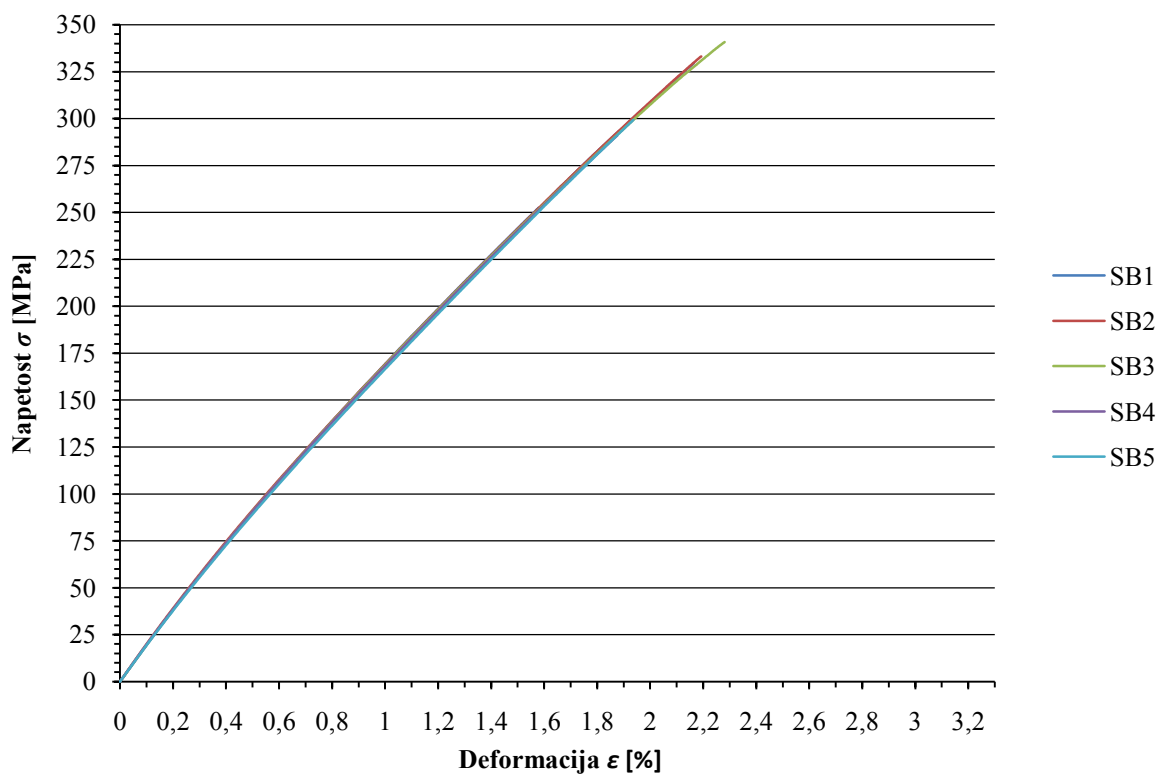


Diagram 7.16: Prirastek napetosti in deformacij preizkušancev v skupini SB

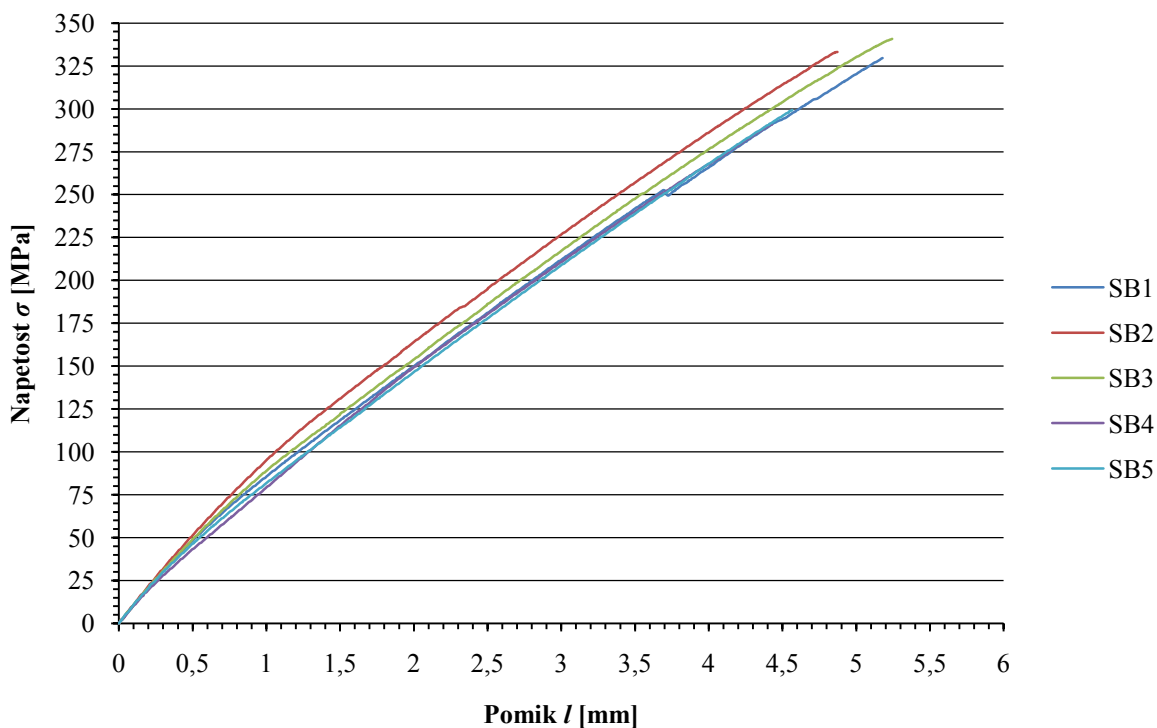


Diagram 7.17: Prirastek napetosti in izmerjen pomik preizkušancev v skupini SB

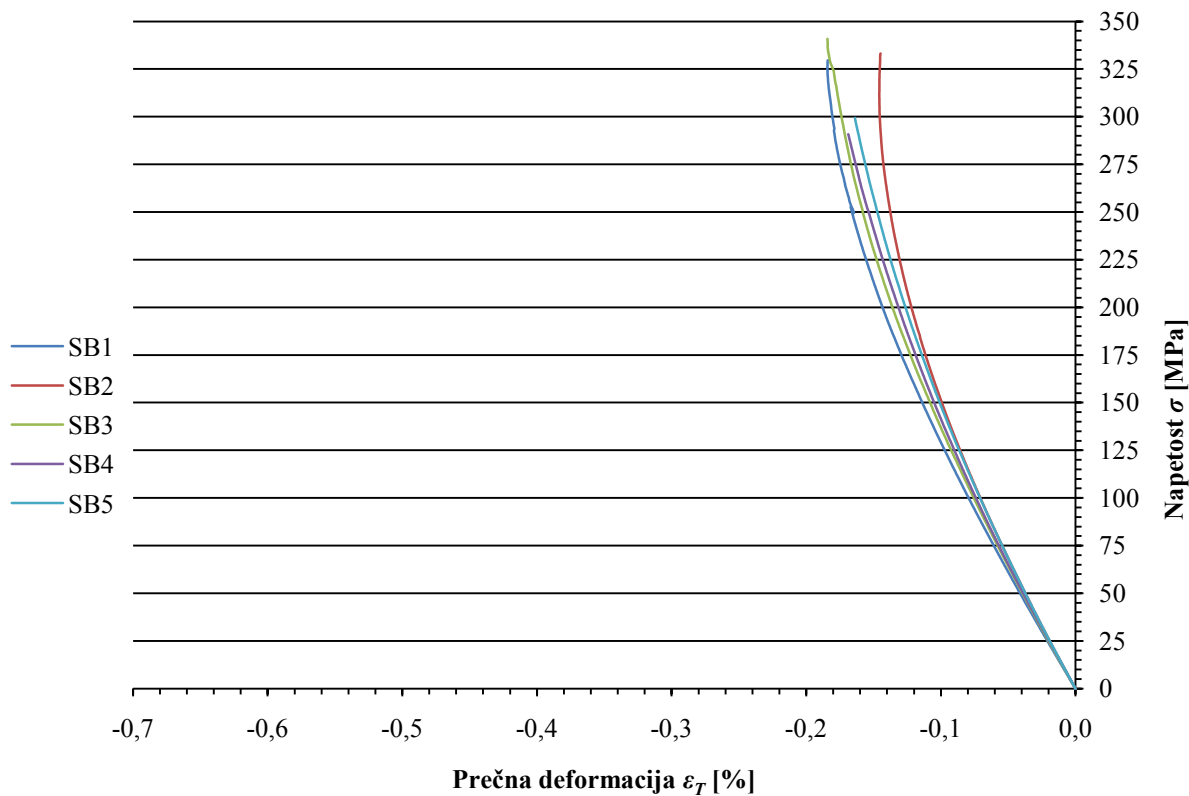
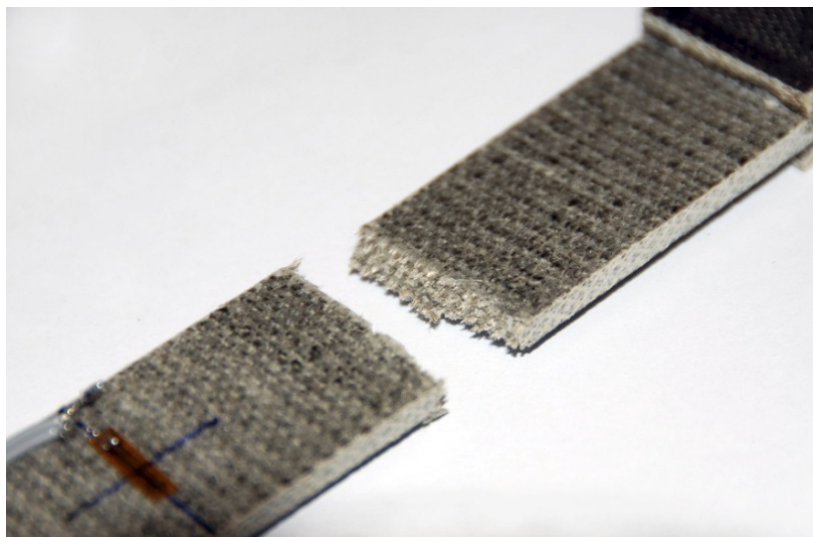


Diagram 7.18: Prirastek napetosti in prečnih deformacij preizkušancev v skupini SB

#### 7.5.4 Vrednotenje rezultatov in ugotovitve osnovnih preiskav

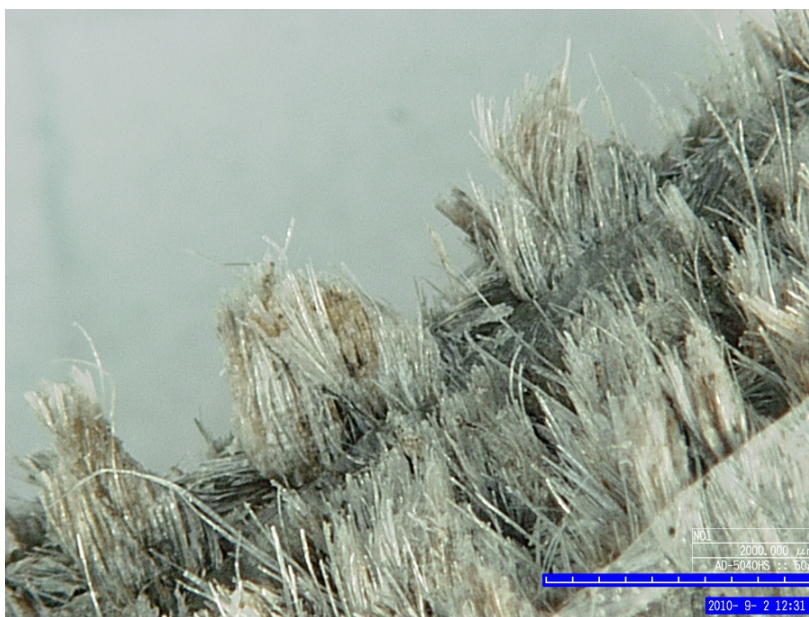
Preizkušeni sta bili dve sanacijski epoksi smoli in dve različni ojačitveni tkanini. Mehanske lastnosti lanenega kompozita so bile določene v šibkejši in močnejši smeri tkanine. Nosilnost tkanine iz steklenih vlaken pa je bila v obeh smereh enaka. Rezultati nateznih preizkusov so bili znotraj posameznih skupin zelo primerljivi, zato lahko sklepamo, da je preiskava reprezentativna. Poleg tega se rezultati natezne preiskave kompozitov, ojačenih s steklenimi vlakni, ujemajo z rezultati drugih preiskav steklenih kompozitov, kar potrjuje ustrezno kvaliteto postopka izdelave laminatov.



Slika 7.16: Porušitev lanenega preizkušanca

Izvedena preiskava žal ni prinesla pričakovanih pozitivnih rezultatov mehanskih lastnosti naravnega kompozita, ki bi bile primerljive z lastnostmi kompozita iz steklenih vlaken. Razlog za nizke vrednosti mehanskih lastnosti lanenega kompozita je slaba prepojitev lanenih vlaken, zaradi katere ni prišlo do popolnega spoja matrice z vlakni. Kot vemo, je lanena tkanina stkana iz predenih niti vlaken. Vlakna se s postopkom predenja med seboj prepletajo, kar zagotavlja trdnost in kontinuiranost niti. Da se aktivira polna nosilnost lanenih vlaken, mora matrica popolnoma oblititi in prepojititi vsa vlakna v niti, kar pa se v našem primeru ni zgodilo. Če primerjamo velikost porušne deformacije lanenega vlakna, ki znaša 1,5 %, z izmerjeno porušno deformacijo lanenega kompozita, ki je v močnejši smeri znašala približno 3,5 %, lahko sklepamo, da je pri porušitvi prišlo do mehanizma razpletanja vlaken. Nobena

izmed uporabljenih epoksi smol ni bila dovolj penetrabilna, da bi dovolj dobro prodrla v notranjost niti in mehansko povezala vsa vlakna. Slaba prepojenost tkanine je tudi posledica izbranega postopka izdelave kompozita z ročnim lameliranjem. Delež prepojenosti vlaken je sicer mogoče povečati tudi s kemijsko obdelavo vlaken pred izdelavo kompozita, kar je dokazano v referenčnih preiskavah. Celoten postopek kemijske obdelave tkanine pa podraži ceno tkanine in s tem zmanjša razliko v ceni naravnega kompozita proti kompozitu iz umetnih vlaken.



Slika 7.17: Detajl porušitve lanenega preizkušanca pri 50-kratni povečavi

V predmetnem diplomskem delu se je preučevala ustreznost naravnih kompozitov za ojačevanje gradbenih konstrukcij, pri čemer je poleg okoljske sprejemljivosti največja prednost naravnih vlaken pred umetnimi prav nižja cena. Iz tega razloga je bila uporabljena cenovno primerna tkanina z zadostno natezno trdnostjo vlaken, brez predhodnih kemijskih obdelav. Izbrani postopek izdelave laminata na način ročnega lameliranja je primeren za delo na terenu in se že sedaj uporablja pri ojačitvah betonskih konstrukcij s steklenimi in ogljikovimi tkaninami.

Za izdelavo kompozitov sta bili uporabljeni komercialno dostopni epoksi smoli za sanacije gradbenih konstrukcij, ki ustrezata vsem zahtevam standardov za gradbene konstrukcije.

Kljub temu da sta bili izbrani smoli z najnižjo viskoznostjo izmed konkurenčnih smol, pa očitno še vedno nista bili dovolj penetrabilni za kvalitetno prepojitev lanenih vlaken. Poleg tega pa lahko opazimo, da so rezultati kompozitov z enako ojačitveno tkanino in drugo epoksi smolo zelo podobni. Ti rezultati implicirajo, da viskoznost sama ni najpomembnejša karakteristika smole, kar zadeva prepojitev vlaken. V sklopu študija obstoječih znanj s področja naravnih kompozitov sem spoznal, da je najbolj uveljavljen postopek za izdelavo kompozitov iz naravnih vlaken vakuumiranje, ki z uporabo posebnih polimernih matric zagotavlja precej kvalitetnejšo prepojitev vlaken. Tak postopek pa je omejen na industrijsko proizvodnjo in ni primeren za delo na terenu in razpokanih lesenih nosilcih, ki ga zahteva predlagana aplikacija.

Za merodajno vrednotenje rezultatov so v nadaljevanju primerjane specifične mehanske lastnosti materialov, ki predstavljajo mehanske lastnosti, deljene s specifično težo. Na ta način namreč lahko enakovredno primerjamo lastnosti obeh materialov. Na podlagi povprečnih vrednosti rezultatov vsake skupine preizkušancev lahko ugotovimo, da je specifična natezna trdnost kompozitov, ojačenih s tkanino iz lanenih vlaken, z močnejšo osjo v smeri obtežbe, kar 3-krat manjša od kompozitov, ojačenih s tkanino iz steklenih vlaken. Izkaže se, da natezna trdnost ni odvisna od uporabljene smole, saj so razlike trdnosti kompozitov z enako ojačitvijo in različnimi matricami zelo majhne. Specifična natezna trdnost lanenega kompozita torej predstavlja 32,2 % natezne trdnosti kompozita, ojačenega s stekleno tkanino. V primeru orientacije lanenega kompozita s šibko osjo v smeri nanašanja obtežbe pa predstavlja natezna trdnost lanenega kompozita le 22,75 % natezne trdnosti kompozita, ojačenega s steklenimi vlakni.

Poleg razlike v napetostih je razvidna tudi velika razlika porušne deformacije. Kompozit s steklenimi vlakni se obnaša krhko, saj napetosti naraščajo skoraj linearno vse do porušitve, nasprotno pa kompozit z lanenimi vlakni izkazuje duktilno obnašanje in nizko togost. Temu ustrezne so deformacije, ki so pri steklenih kompozitih dosegle vrednosti okoli 2,0 % pri napetosti 318,0 MPa, pri lanenih kompozitih pa so bile deformacije večje že pri bistveno manjših napetostih, t.j. približno 3,5 % pri 78,0 MPa. Za primerjavo lahko odčitamo deformacijo steklenega kompozita pri 78,0 MPa, ki znaša 0,40 %. Nadalje lahko izračunamo tudi specifični elastični modul, ki pri lanenem kompozitu prav tako doseže bistveno nižje

vrednosti kot pri kompozitu s steklenimi vlakni. Specifični elastični modul lanenega kompozita v močnejši smeri predstavlja 52,8 %, v šibkejši pa 41,1 % specifičnega elastičnega modula steklenega kompozita. Merjene so bile tudi prečne deformacije, ki so pri lanenem kompozitu naraščale hitreje kot napetosti, kar se lepo vidi iz diagramov, ki se bistveno razlikujejo od diagramov prečnih deformacij kompozita s steklenimi vlakni. Hitrejše naraščanje deformacij v prečni kot v vzdolžni smeri se odraža na višjem Poissonovem količniku, ki je v primeru nanašanja obtežbe v smeri močnejše osi lanene tkanine enkrat višji od Poissonevega količnika, določenega na steklenih kompozitih.

Preglednica 7.15: Primerjava povprečnih rezultatov natezne preiskave posameznih skupin preizkušancev. Prikazane so specifične vrednosti nateznih trdnosti in elastičnih modulov.

Skupina preizkušancev	$\sigma_M$ [MPa/g/cm <sup>3</sup> ]	$E_t$ [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	$\varepsilon_M$ [%]	$\nu_b$
LA-v	66,74	6,80	3,46	0,27
LB-v	63,52	6,44	3,67	0,26
LA-p	47,10	5,29	1,88	0,20
LB-p	44,65	5,17	1,80	0,20
SA	207,00	12,88	1,98	0,13
SB	204,32	12,05	2,09	0,15

Za podatek vzdolžne deformacije, v preglednici 7.15 in izrisu primerjalnega diagrama 7.19, so pri skupinah LA-v in LB-v, kjer je prišlo do odpovedi merilnih lističev v vzdolžni smeri, upoštevane izračunane vrednosti deformacij iz meritve pomika vpenjalnih čeljusti. Tako določene deformacije so sicer le groba ocena dejanskih, saj opisujejo deformacijo celotnega preizkušanca, vključujejo minimalen zdrs v vpenjalnih čeljustih, ki ga ni mogoče izničiti, in napake v mehanizmu samega okvirja. Tako določene deformacije za skupini LA-v in LB-v so prikazane izključno z namenom boljše predstave razlike v deformacijskem obnašanju kompozita, armiranega z lanenimi vlakni, v primerjavi s kompozitom, armiranim s steklenimi vlakni.



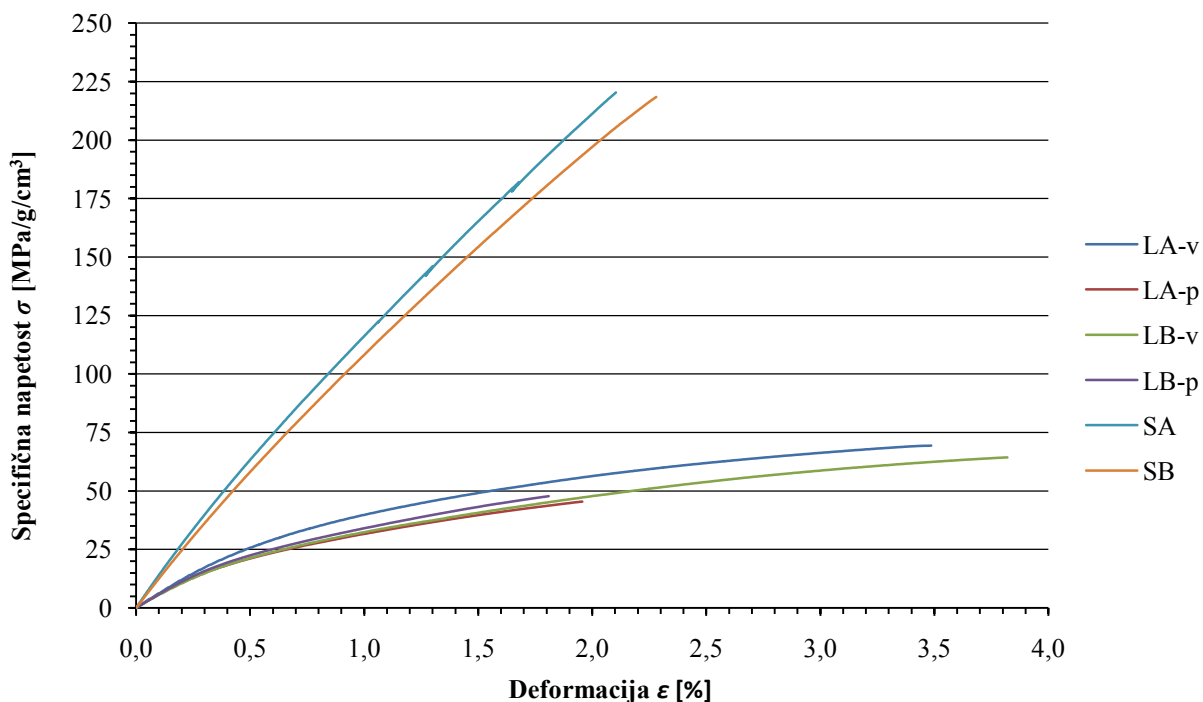


Diagram 7.19: Primerjava prirastka specifičnih napetosti in vzdolžnih deformacij posameznih skupin preizkušancev

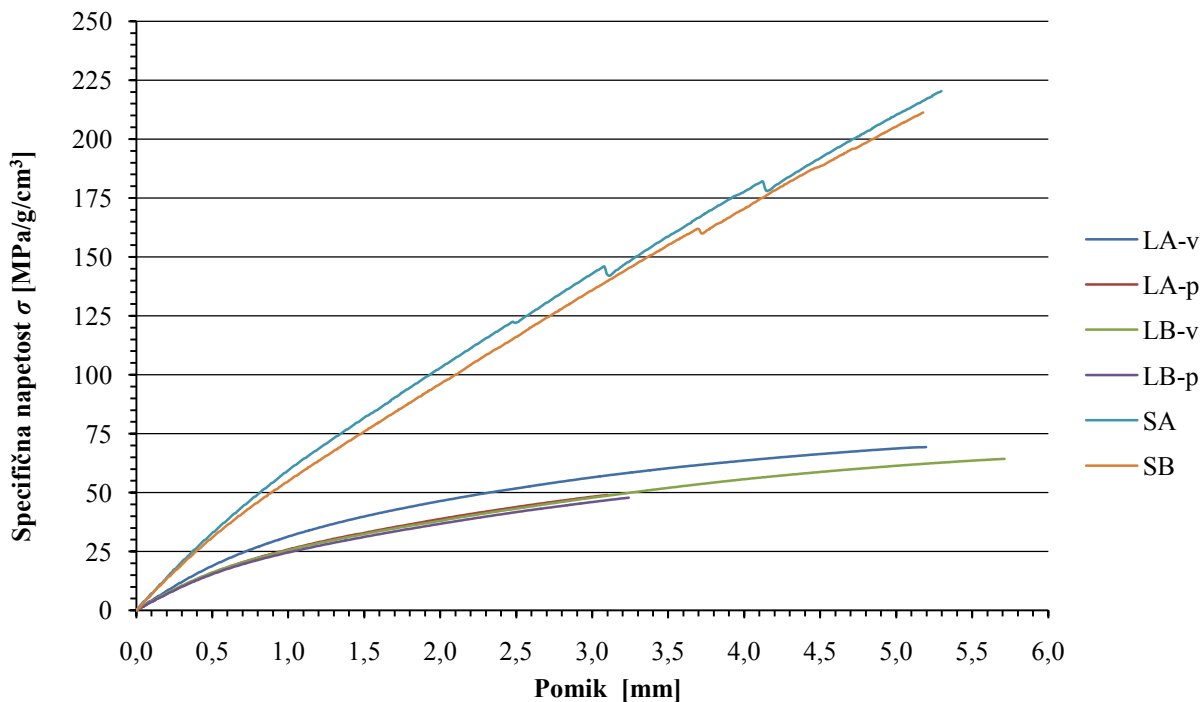


Diagram 7.20: Primerjava prirastka specifičnih napetosti posameznih skupin preizkušancev glede na pomik vpenjalnih čeljusti

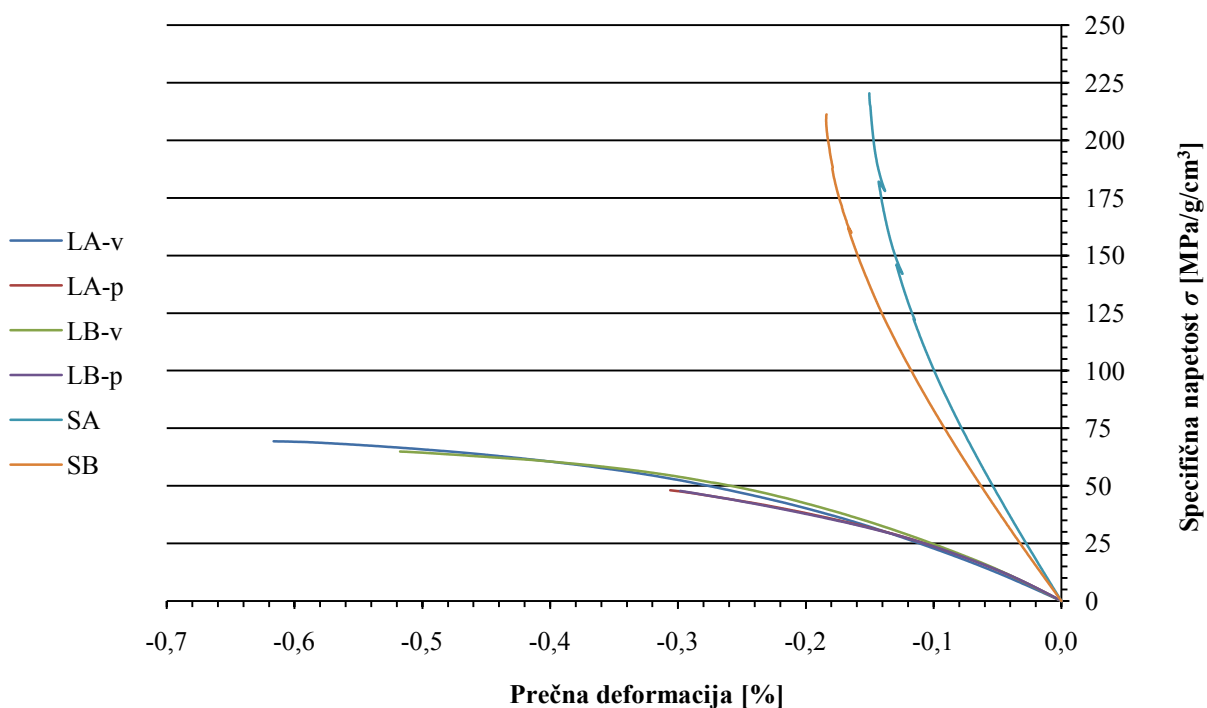
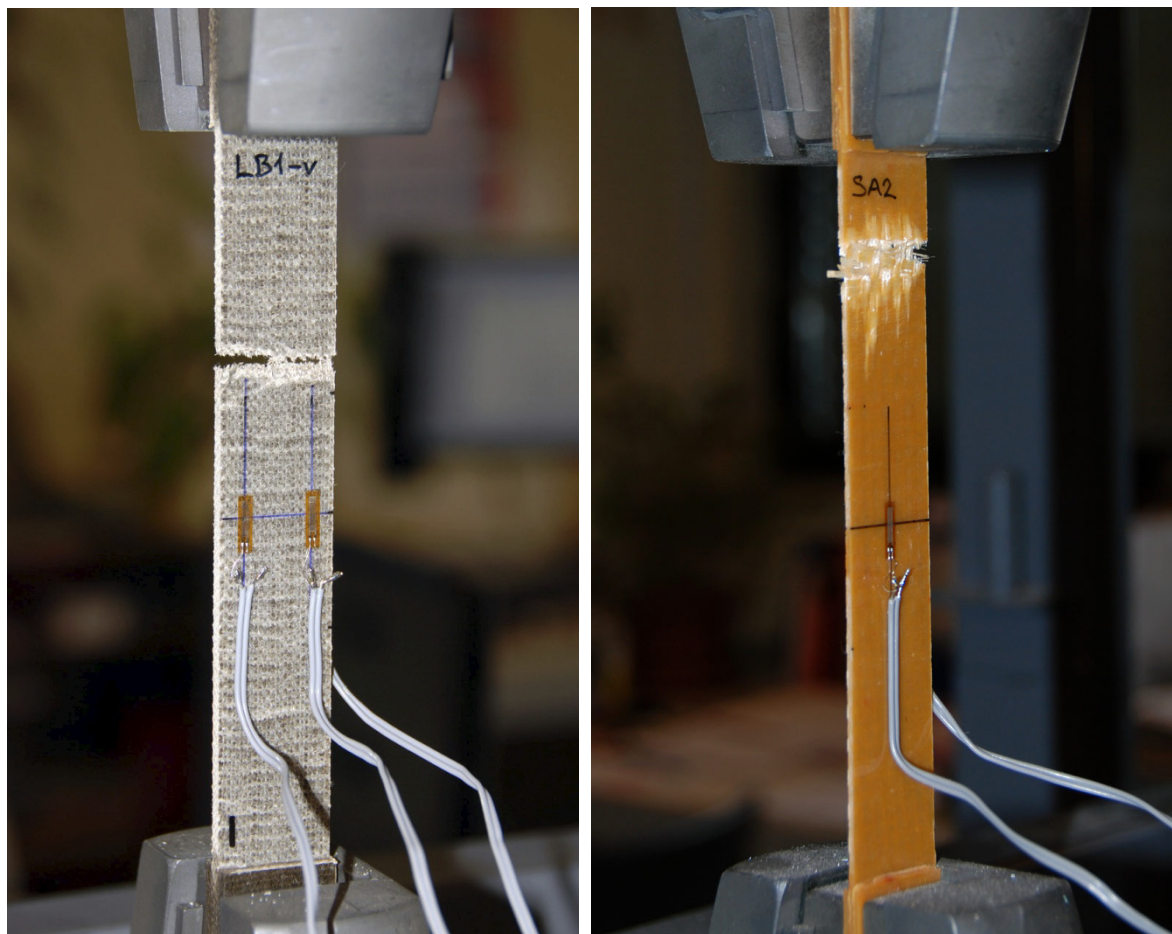


Diagram 7.21: Primerjava prirastka specifičnih napetosti in prečnih deformacij posameznih skupin preizkušancev

Primerjava specifičnih mehanskih lastnosti posameznih skupin preizkušancev na skupnih diagramih dobro prikaže različno obnašanje primerjanih materialov. Iz poteka diagrama napetosti in vzdolžnih deformacij lanenih kompozitov je razvidna sprememba togosti, do katere pride pri napetosti približno  $15,0 \text{ MPa/g/cm}^3$ . Na tem mestu so začeli popuščati prepleteni stiki med vlakni, ki jih matrica ni prepojila. Poledica formuliranja takega porušnega mehanizma so velike deformacije ob majhnem prirastku napetosti in s tem značilni položni diagrami napetosti lanenih preizkušancev.

Način porušitve vzorcev se razlikuje med preizkušanci, ojačenimi s stekleno oziroma laneno tkanino, saj je bila uporabljena steklena tkanina v obeh oseh enako nosilna, zaradi česar so bile porušitve rahlo diagonalne. Nosilnost lanene tkanine pa je v eni smeri bistveno večja od nosilnosti v drugi smeri, kar se odraža na značilnih horizontalnih poružitvah.



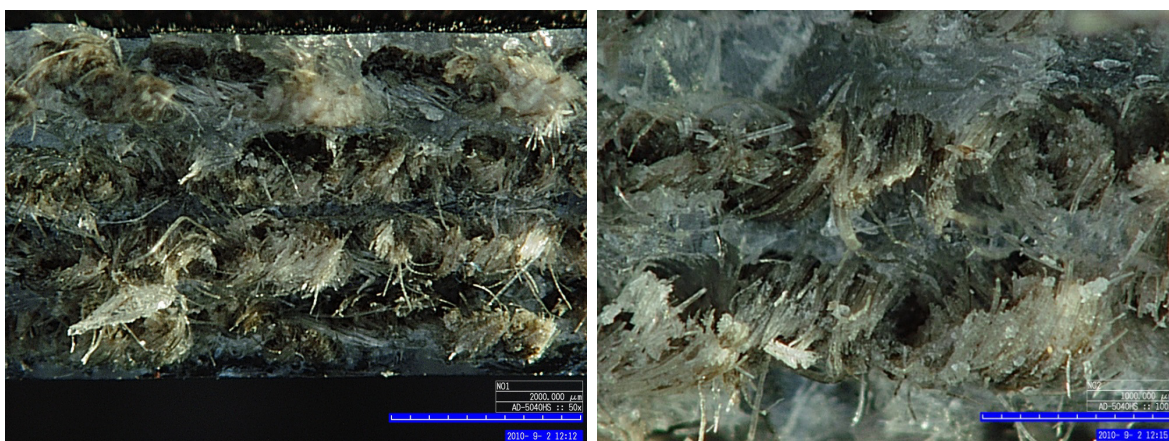
Slika 7.18 in 7.19: Primerjava porušitve preizkušanca, ojačenega z lanenimi vlakni (levo), in preizkušanca, ojačenega s steklenimi vlakni (desno)

### 7.5.5 Analiza porušitev

Za boljšo interpretacijo narave porušitev so bili vzorci pregledani z digitalno mikroskopsko kamero HIROX HI-Scope Advanced KH-3000 v laboratoriju Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani.

Že pri 50-kratni povečavi so dobro vidni sloji ojačitvene tkanine in matrice ter reliefna struktura porušne ploskve. Značilna odcepljena vlakna pri laneni tkanini so krajša kot pri tkanini iz steklenih vlaken, saj slednje sestavljajo kontinuirana vlakna z večjo sidrno dolžino. Površinsko oblivanje lanenih niti s polimerno matrico je dokaj dobro, kar se vidi s slike 7.22 pri 200-kratni povečavi, vendar je prepojenost vlaken, oziroma prodor matrice v notranjost

niti, vprašljiv. Poleg oblivanja tehničnih vlaken v notranjosti niti bi bil za popolno izkoriščenost nosilnosti potreben prodor matrice vse do elementarnih vlaken, ki predstavljajo najmočnejšo strukturo lanenega vlakna. Ker tkanina ni bila kemično obdelana, pektinske povezave med elementarnimi vlakni znotraj tehničnega vlakna niso bile odstranjene, kar onemogoča prodor smole globlje v tehnično vlakno. Posledica tega je, da pride do porušitev po pektinskih povezavah, ki so mnogo šibkejše od trdnosti posameznih elementarnih vlaken.



Slika 7.20 in 7.21: Prečni pogled porušitve vzorca lanenega kompozita s prikazom plasti vlaken in matrice. Levo: 50-kratna povečava, desno: 100-kratna povečava.



Slika 7.22: Detajl lanene niti pri 200-kratni povečavi, kjer se vidi oblitost tehničnih vlaken s polimerno matrico

Na sliki 7.22 je vidno, da epoksi matrica dokaj dobro obliva nit lanenih vlaken, vendar je ne prepoji popolnoma, saj ne prodre v globino do vseh tehničnih vlaken. Pri homogenih steklenih vlaknih pa oblivanje površine zadošča za dobro izkoriščenost mehanskih lastnosti vlaken. Slika 7.23 prikazuje detajl porušitve preizkušanca s stekleno tkanino, kjer so dobro vidna pretrgana steklena vlakna in nepretrgani snopi prečnih vlaken.



Slika 7.23: Pogled na porušitev steklenega kompozita: 50-kratna povečava

## 8 PRIPRAVA LESENIH NOSILCEV ZA PREISKAVO OJAČITEV Z NARAVNIMI KOMPOZITI

### 8.1 Pridobivanje ustreznih lesenih nosilcev

V cilju po čim boljšem približku realnega stanja nosilcev, potrebnih ojačitvene sanacije, sem skušal poiskati stare nosilce, ki ne ustrezajo novim statičnim zahtevam objekta, obenem pa so še dovolj ohranjeni, da so primerni za obnavljanje. Ob pomoči podjetja Saning sem uspel pridobiti dovoljenje za odvzem nosilcev s strehe objekta lovski dvorec, ki spada pod kompleks gradu Kieselstein v Kranju. Kompleks gradu Kieselstein je namreč v fazi obnove grajskega objekta z okolico, kamor spadata tudi grajsko obzidje in lovski dvorec (Ulrichova pristava). Kljub veliki historični vrednosti in zaščiteni kulturni dediščini objektov grajskega kompleksa je moral projektant zaradi zamenjave strešne kritine projektirati tudi novo strešno konstrukcijo na objektu lovski dvorec, saj se je stanje obstoječe izkazalo za nezadostno. Ker pa tako kot sam objekt tudi njegova strešna konstrukcija datira v drugo polovico 19. stoletja, bi bilo z vidika ohranjanja kulturne dediščine obstoječo konstrukcijo bolj zanimivo sanirati kot pa nadomestiti z novo. Prav za take in podobne namene pa bi lahko uporabili sistem sanacije, predlagan v tem diplomskem delu.



Slika 8.1 in 8.2: Lovski dvorec gradu Kieselstein. Stanje pred sanacijo (levo), odstranjevanje strešne konstrukcije (desno).

Fotografije, ki so bile narejene pred odstranitvijo ostrejša pričajo da so bili nosilci večinoma v dobrem stanju, z izjemo leg, ki so nalegale na obod zidovja. Na sliki 8.3 so razvidne oranžne

oznake – križi, ki označujejo, kateri nosilci so bili rezervirani za potrebe preiskav. Izbrane so bile grede in lege večjih prerezov, ki niso izkazovale povečane navlaženosti.



Slika 8.3 in 8.4: Ostrešje pred odstranitvijo. Severozahodna stran (levo), jugovzhodna stran (desno).

## 8.2 Priprava in obdelava lesenih preizkušancev

Nosilci so bili po dostavi v prostore mizarske delavnice podjetja Saning temeljito pregledani in razvrščeni glede na kvaliteto. Izbranih 19 nosilcev sem oštevilčil, jim izmeril dolžino in dimenzije prereza ter ocenil stanje na podlagi vizualnega pregleda. Nosilce sem nato razvrstil v tri kakovostne razrede glede na število zobov (zarez), morebitno poškodovanost zaradi zajedavcev in navlaženost lesa. Meritve in ocene so prikazane v preglednici 8.1.



Slika 8.5 in 8.6: Prenos nosilcev s strehe lovskega dvorca (levo), pregled in označevanje nosilcev pred mehansko obdelavo (desno)

Preglednica 8.1: Geometrijske karakteristike nosilcev in ocena kakovosti (1 - najbolj primeren, 2 - primeren, 3 - manj primeren)

Oznaka nosilca	Dolžina nosilca [cm]	Prečni prerez h/d [cm/cm]	Ocena kakovosti [1 – 3]
N1	249	19/17	1
N2	250	21/17,5	1
N3	253	22/15	3
N4	247	20,5/18	3
N5	259	19/14	3
N6	249	20/17	2
N7	220	19/18	3
N8	232	18/14	1
N9	251	19/13	3
N10	224	19/18	1
N11	225	18/17	3
N12	259	16/14	1
N13	259	21/17,5	1
N14	233	20/14,5	1
N15	250	20/18	1
N16	235	20/14	2
N17	252	18/16	2
N18	248	21/19	1
N19	200	21/18	2

Na razpolago je bilo tudi nekaj manjših vzorcev – razpor, namenjenih za morebitne dodatne preiskave materiala. Glede na oceno kakovosti sem nato izbral devet najkvalitetnejših nosilcev, ki bodo zadostovali potrebam preiskave.

Prvi korak pri izvedbi ojačevanja s kompoziti je priprava površine. V ta namen se je izvedlo oblanje nosilcev, saj bi z brušenjem nastalo veliko prašnih delcev, ki napolnijo razpoke in s tem onemogočijo kvaliteten oprijem epoksidne smole. Oblanje je bilo izvedeno v taki meri, da se je ohranil čim večji prečni prerez elementa. Končne dimenzije preizkušancev in njihova kvaliteta so prikazane v preglednici 8.2.





Slika 8.7: Nosilci po pripravi površine

Preglednica 8.2: Pregled izbranih nosilcev za preiskavo in njihove geometrijske karakteristike po pripravi površine

Oznaka nosilca	Dolžina nosilca [cm]	Novi prečni prerez h/d [cm/cm]	Ocena kakovosti [1 – 3]
N1	249	18/16	1
N2	250	18/16	1
N8	232	16/12	1
N10	224	18/16	1
N12	259	16/12	1
N13	259	18/16	1
N14	233	16/12,5	1
N15	250	18/16	1
N18	248	18/16	1

Tako pripravljene nosilci so primerni za ojačevanje z laneno tkanino. Izvedeno ojačitev se lahko ovrednoti z upogibnim ali strižnim preizkusom. Izbranih je 9 nosilcev, tako da so lahko trije ojačeni z laneno tkanino, trije s stekleno tkanino, trije neojačeni nosilci pa služijo kot kontrola efekta ojačitve. Območje obsega ojačevanja se določi glede na izbrano preiskavo – strižni oziroma upogibni preizkus. Količino potrebnih plasti ojačitvene tkanine pa se določi na podlagi mehanskih lastnosti kompozita, določenih s pomočjo nateznega preizkusa.

### **8.3 Izvedba ojačitvene sanacije**

Ojačitev s tkanino se lahko izvede v obliki ovoja ali pa z lepljenjem posameznih plasti tkanine v laminat. Zaradi praktične uporabe na gradbišču je primernejši postopek ovijanja tkanine, ki je na kratko opisan v nadaljevanju.

Za potrebe preiskav na lesenih nosilcih izberemo količino tkanine za ojačevanje tako, da s tehtanjem odmerimo enaki masi lanene in steklene tkanine. Pri tem morata biti širini tkanin enaki. Tkanino nato po postopku ročnega lameliranja impregniramo z epoksi smolo in jo ovijamo okrog lesenega elementa. Tako dobimo laminat v obliki rokava z več sloji tkanine. Ključnega pomena sta izvedba kompozita brez zračnih mehurčkov in kvalitetna prepojitev tkanine. Lameliranje izvajamo po enakem postopku kot je opisan pri izdelavi preizkušancev. Po doseženi končni trdnosti epoksi smole je element pripravljen za namestitev merilnih inštrumentov in izvedbo preiskave.

### **8.4 Preiskava ojačenih lesenih nosilcev**

Preiskava ojačitev na lesenih nosilcih ni bila izvedena zaradi nizkih mehanskih lastnosti izdelanega lanenega kompozita v sklopu osnovnih preiskav materialov. Preizkus ojačitve lesenih nosilcev z obstoječim materialom je sicer možen, vendar je bolj smotrno, da se na podlagi pridobljenih znanj izdelata kvalitetnejši laneni kompozit, ki bi prinesel večje izboljšanje mehanskih lastnosti saniranih elementov. Kvalitetnejši naravni kompozit se lahko izvede z uporabo boljše, kemično obdelane tkanine, izboljšanjem postopka impregnacije tkanine s smolo ali pa s poskusom uporabe drugega postopka za izdelavo kompozita.

## 9 ZAKLJUČEK

Preiskave v okviru diplomske naloge so zajemale primerjavo epoksidnih kompozitov, armiranih z lanenimi in steklenimi vlakni. Poleg vpliva vlaken se je vrednotil tudi vpliv polimerne matrice, saj sta bili neposredno primerjani dve različni epoksidni smoli za sanacije gradbenih konstrukcij.

Izdelava novega kompozitnega materiala je temeljila na detajlni analizi strukture naravnih vlaken in oceni ekonomske upravičenosti ter razpoložljivosti naravnih tkanin, primernih za armiranje polimerov. Izbrana je bila tkanina iz vlaken lanu, za primerjavo odziva in lastnosti pa so se izvajale vzporedne preiskave na kompozitu, ojačenem s tkanino iz steklenih vlaken. Kompozitni preizkušanci so bili izdelani po postopku ročnega lameliranja v skladu s standardom SIST EN ISO 527, v katerem je predpisan tudi potek natezne preiskave. Rezultati lanenega kompozita sicer niso prinesli želenih visokih vrednosti mehanskih lastnosti, vendar so bili v mejah pričakovanega, saj se je v postopku izdelave kompozitov iz razloga prilagoditve za uporabo v gradbeništvo opustilo oziroma prilagodilo nekaj pomembnih elementov, kot sta kemijska priprava vlaken in način izdelave kompozita. Na podlagi podobnih preiskav je bil namreč potrjen pozitiven vpliv kemijske obdelave vlaken, ki omogoči boljši prodor matrice v notranjost vlaken. Najboljše rezultate omogoča izdelava kompozita po postopku vakuumiranja, ki omogoča kvalitetno prepojitve vlaken in optimalno razmerje med vlakni in matrico, vendar pa ta postopek ni primeren za ojačevanje gradbenih konstrukcij na terenu. Ker je pomembna prednost naravnih tkanin tudi nizka cena, v preliminarnih preiskavah niso bile izbrane tkanine s kemijsko obdelanimi vlakni, ki so dražje od neobdelanih. Rezultati preiskav pa so pokazali, da je predhodna obdelava tkanine nujna za doseganje konkurenčnih lastnosti kompozitov iz naravnih vlaken.

Zaključimo lahko, da izdelava kompozitov, ojačenih s tkaninami iz naravnih vlaken, ni najbolj primerna za ojačevanje lesenih konstrukcij na terenu, v kolikor uporabimo kemijsko neobdelane tkanine. Za končno oceno pa bi bilo potrebno preveriti še mehanske lastnosti kompozita s kemijsko obdelanimi vlakni in uporabo boljšega postopka prepojitve tkanine.

Kot alternativa izvedbi kompozita na terenu je možna tudi izdelava lamel, kjer bi bila naravna vlakna predhodno prepojena v obliki preprega, iz katerega bi se pod kontroliranimi pogoji izdelale lamele za ojačevanje konstrukcij. Na gradbišču bi se take lamele lahko le lepile na ojačevani element po podobnem postopku kot se lepijo jeklene lamele ali lamele iz ogljikovih vlaken.

Zaradi naraščajočega zavedanja okoljske problematike kompoziti, ojačeni z naravnimi vlakni, izkazujejo velik potencial pri nadomestitvi umetnih kompozitov. Okoljska sprejemljivost naravnih kompozitov se odraža na sonaravnem pridobivanju surovin, proizvodnji, ki je prijazna zdravju in ni obremenjujoča za okolje, lažjih materialih, ki posledično pomenijo manjšo porabo energije, in nenazadnje možnosti biološke razgradnje s sežiganjem. Z nadaljnjim preiskavami in razvojem še kvalitetnejših postopkov obdelave in impregnacije vlaken bodo naravni kompoziti zagotovo pridobivali na uporabnosti in razširjenosti. Sčasoma lahko pričakujemo prodor kompozitov, ojačenih z naravnimi vlakni tudi na področje gradbeništva, podobno kot se je to zgodilo v primeru steklenih in ogljikovih kompozitov. Predhodne preiskave in študije pa predstavljajo dobre temelje za uvedbo novih materialov in s tem zagotavljajo pomembno konkurenčno prednost.

### **9.1 Predlog nadaljnjih preiskav**

Že pripravljene lesene nosilce je potrebno ojačiti po postopku, ki je bil uporabljen za izvedbo laminatov za natezne preizkušance. Mehanske lastnosti ojačenih nosilcev se nato preizkuša pod strižno ali upogibno obremenitvijo ter vrednoti učinek ojačitve z vzporedno preiskavo neojačenih elementov. Za zaključeno znanstveno raziskavo bi bilo potrebno narediti tudi ustrezen računski model, ki bi upošteval mehanske in geometrijske lastnosti starega lesa ter pravilno simuliral ojačitev s kompozitom, armiranim z laneno tkanino.

Pri računski analizi mehanskih lastnosti kompozitne ojačitve je ključnega pomena pravilna predpostavka porušnega mehanizma. Na področju kompozitov, armiranih z naravnimi vlakni, se odpira še popolnoma neraziskano področje porušnih kriterijev. Še zlasti pri projektiranju ojačitev je torej izjemnega pomena pravilen izbor porušnega kriterija za kompozitne materiale.

Druga veja nadaljnjih preiskav pa bi služila izboljšanju mehanskih lastnosti kompozita, armiranega s tkaninami iz naravnih vlaken. Na tem področju je še veliko neznank, v prvi vrsti pa je potrebno preučiti možnosti za izboljšanje stika med matrico in vlakni tkanine s pomočjo kemijske obdelave naravnih vlaken. Nadalje bi bilo potrebno preveriti sprijemno trdnost obdelanih vlaken in matrice ter ovrednotiti vpliv vlažnosti naravnih vlaken na mehanske lastnosti kompozita.

Spekter prilagajanja kompozitnih materialov je zelo velik, na področju naravnih kompozitov pa razpolagamo s sorazmerno malo eksperimentalnimi znanji. Zato so kakršnekoli ustrezno usmerjene preiskave dobrodošle tako za napredek znanosti kot so tudi korak naprej v uporabi okolju prijaznejših materialov.

## VIRI

Aicher S., Reinhardt H. W. 2001. Joints in Timber Structures. Stuttgart, Rilem Publications S.A.R.L.: 654 str.

André, A. 2006. Fibres for Strengthening of Timber Structures. Luleå, Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering: 106 str.

Antolinc, D. 2008. Analiza obnašanja mostu iz armirane plastike. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 120 str.

Bastioli, C. 2005. Handbook of Biodegradable Polymers. Shawbury, Rapra Technology Limited: 534 str.

Bjelanović, A., Rajčić, V. 2007. Drvene konstrukcije prema europskima normama. Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta: 458 str.

Blackburn, R. S. 2005. Biodegradable and sustainable fibres. Cambridge, Woodhead Publishing Limited: 456 str.

Blackwell, J., Kolpak F. J. 1975. The Cellulose Microfibril as an Imperfect Array of Elementary Fibrils. *Macromolecules*, May-June 8(3): 322-326.

Bos, H. L. 2004. The Potential of Flax Fibres as Reinforcement for Composite Materials. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven: 209 str.

Bunsell, A. R., Renard, A. 2005. Fundamentals of fibre reinforced composite materials. London, Institute of Physics Publishing: 398 str.

Chand, N., Fahim, M. 2008. Tribology of natural fiber polymer composites. Cambridge, Woodhead Publishing Limited: 205 str.

Chui, H. Y., Komatsu, K., Jung K. 2008. Reinforcement of Wood I-joists with Natural Fibers. *Engineered Wood Products Association* June 132: 18-26.

Dagher, H. J., Kimball, T. E., Shaler S. M., et al. 1996. Effect of FRP Reinforcement on Low Grade Eastern Hemlock Glulams. University of Maine, Department of Agriculture: 207-214.

Fakirov, S., Bhattacharyya D. 2007. Handbook of Engineering Biopolymers. Munich, Carl Hanser Verlag: 896 str.

Fiorelli, J., Dias, A. A. 2003. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Materials Research*, Vol. 6, No. 2: 193-202.

- Franck, R. R. (ur.). 2005. Bast and other plant fibres. Cambridge, Woodhead Publishing Limited: 397 str.
- Gibson, R. F. 2007. Principles of composite material mechanics. Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group: 579 str.
- Hollaway, L. C., Head, P. R. 2001. Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure. Oxford, Elsevier science Ltd: 322 str.
- Horrocks, A. R. (ur.), Anand S. C. (ur.). 2000. Handbook of technical textiles. Cambridge, Woodhead Publishing Limited: 542 str.
- Hyer, M. W. 1998. Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite materials. Boston, The McGraw-Hill Companies Inc.: 627 str.
- Jarc, M. 1998. Eksperimentalna študija ojačitve armiranobetonskih nosilcev in plošč z dolepljanjem jeklenih in karbonskih lamel. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 130 f.
- Jones, R. M. 1999. Mechanics of composite materials. Philadelphia, Taylor & Francis, Inc.: 519 str.
- Kalamkarov, A. L., Kolpakov, A. G. 1997. Analysis, Design and Optimization of Composite Structures. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd: 356 str.
- Kreševič, B. 1990. Tekstilne surovine. Maribor, Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta: 136 str.
- Malej-Kveder, S. 1985. Tekstilne surovine: vlakna 1. Ljubljana, Zavod SR Slovenije za šolstvo: 164 str.
- Mallick, P. K. 2008. Fiber-reinforced composites: Materials, Manufacturing and Design. Boca Raton, Taylor & Francis Group: 619 str.
- Matthews, F. L., Rawlings R. D. 1994. Composite materials: Engineering and science. Cambridge, Woodhead Publishing Limited: 470 str.
- McCrum, N. G., Buckley, C. P., Bucknall, C. B. 1997. Principles of polymer Engineering. New York, Oxford University Press: 447 str.
- Peters, S. T. (ur.) 1998. Handbook of Composites. Cambridge, Chapman & Hall: 1118 str.
- Poljanšek, M. 2003. Eksperimentalno podprta analiza obnašanja sandwich plošč. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 161 str.

Rijavec, T. 2000. Tekstilne surovine – osnove. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, oddelek za tekstilstvo: 145 str.

Smith, R. 2005. Biodegradable polymers for industrial applications. Cambridge, Woodhead Publishing Limited: 530 str.

Srinivasan, K. 2009. Composite materials: Production, properties, testing and applications. Oxford, Alpha science International Ltd.: 130 str.

Staab, G. H. 1999. Laminar Composites. Woburn, Butterworth - Heinemann: 314 str.  
Tomažević, M. 1991. Uvod v eksperimentalno analizo gradbenih konstrukcij. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo gradbeništvo in geodezijo: 224 str.

Vinson, J. R. 1999. The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials. Lancaster, Technomic Publishing Company, Inc.: 378 str.

Vasiliev, V. V., Morozov, E. V. 2007. Advanced mechanics of composite materials. Oxford, Elsevier: 491 str.

Voyiadjis, G. Z., Kattan, P. I. 2005. Mechanics of composite materials with MATLAB. Berlin, Springer – Verlag Berlin Heidelberg: 327 str.

Wool, R. P., Sun, X. S. 2005. Bio-based polymers and composites. Burlington, Elsevier Academic Press: 620 str.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

## **Spletni viri:**

Biocomp Project:  
<http://www.biocomp.eu.com/> (18.04.2010)

Car Scoop 2008. Lotus Eco Elise Concept with Hemp Body Panels.  
<http://carscoop.blogspot.com/2008/07/lotus-eco-elise-concept-with-hemp-body.html>  
(05.03.2010)

Elliott-Sink S. 2005. Special Report: Cars Made of Plants?  
<http://www.edmunds.com/advice/alternativefuels/articles/105341/article.html> (05.03.2010)

FAO Corporate document repository:  
<http://www.fao.org/DOCREP/004/Y1873E/y1873e0a.htm> (08.04.2010)

Gurit  
<http://www.gurit.com/> (27.05.2010)



International Year of Natural Fibres:

<http://www.naturalfibres2009.org/en/fibres/index.html> (10.05.2010)

Lightweight Structures B.V.:

<http://www.lightweight-structures.com/index.html?Ite=&task=view> (23.04.2010)

Louis P. 2009. Natural News: Car parts made from hemp.

[http://www.naturalnews.com/027498\\_car\\_parts\\_hemp.html](http://www.naturalnews.com/027498_car_parts_hemp.html) (19.03.2010)

NATEX Project:

<http://www.natex.eu/> (21.04.2010)

NetComposites:

<http://www.netcomposites.com/default.asp> (10.03.2010)

Network Group for Composites in Construction:

<http://www.ngcc.org.uk/DesktopDefault.aspx?tabindex=0&tabid=15> (18.06.2010)

## PRILOGE

### PRILOGA A

### Pregled relevantnih EN ISO standardov

Oznaka standarda	Naslov standarda
SIST EN ISO 527-1:2000 (ISO 527-1:1993)	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali - Določanje nateznih lastnosti - 1. del: Splošna načela (ISO 527-1:1993 vključno s popravkom 1:1994) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles (ISO 527-1:1993 including Corr 1:1994)
ISO 527-1:2000 AMENDMENT 1 (ISO 527-1:1994 CORRIGENDUM 1)	Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles
SIST EN ISO 527-2:1999 (ISO 527-2:1993)	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali – Določevanje nateznih lastnosti – 2. del: Preskusni pogoji za polimerne materiale za oblikovanje in ekstrudiranje (ISO 527-2:1993, vključno s tehničnim popravkom 1:1994) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics (ISO 527-2:1993, including Technical Corr. 1:1994)
SIST EN ISO 527-3:2000 (ISO 527-3:1995)	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali - Določanje nateznih lastnosti - 3. del: Preskusni pogoji za filme in plošče (ISO 527-3:1995) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Determination of tensile properties - Part 3: Test conditions for films and sheets (ISO 527-3:1995)
SIST EN ISO 527-3:1995/AC:2003	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali - Določanje nateznih lastnosti - 3. del: Preskusni pogoji za filme in plošče (ISO 527-3:1995/Cor. 1:2001)) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Determination of tensile properties - Part 3: Test conditions for films and sheets (ISO 527-3:1995/Cor.1:2001)
ISO 527-3 Technical Corrigendum 2	Plastics - Determination of tensile properties - Part 3: Test conditions for films and sheets; Technical Corrigendum 2
SIST EN ISO 527-4:1999 (ISO 527-4:1997)	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali – Določevanje nateznih lastnosti – 4. del: Preskusni pogoji za izotropne in ortotropne z vlakni ojačene polimerne kompozite (ISO 527-4:1997) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites (ISO 527-4:1997)
SIST EN ISO 527-5:2009 (ISO 527-5:2009)	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali - Določevanje nateznih lastnosti - 5. del: Preskusni pogoji za enosmerno z vlakni ojačene polimerne kompozite (ISO 527-5:2009) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites (ISO 527-5:2009)
ISO 5893:2002	Rubber and plastics test equipment -- Tensile, flexural and compression types (constant rate of traverse) -- Specification (available in English only)
ISO 1268-1:2001	Fibre-reinforced plastics -- Methods of producing test plates -- Part 1: General conditions

ISO 1268-2:2001	Fibre-reinforced plastics -- Methods of producing test plates -- Part 2: Contact and spray-up moulding
SIST EN ISO 1172:2000 (ISO 1172:1996)	<b>Naslov (sl):</b> S stekleno tkanino ojačeni polimerni materiali - Prepregi, zmesi za oblikovanje in laminati - Določevanje steklene tkanine in mineralnih polnil - Metoda s sežigom (ISO 1172:1996) <b>Naslov osnove:</b> Textile-glass-reinforced plastics - Prepregs, moulding compounds and laminates - Determination of the textile-glass and mineral-filler content - Calcination methods (ISO 1172:1996)
SIST EN ISO 10724-2:2001 (ISO 10724-2:1998)	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali - Vbrizgavanje duromernih preskušancev iz praškastih snovi za oblikovanje (PMC) -2. del: Ploščice (ISO 10724-2:1998) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Injection moulding of test specimens of thermosetting powder moulding compounds (PMCs) - Part 2: Small plates (ISO 10724-2:1998)
SIST EN ISO 7822:2000 (ISO 7822:1990)	<b>Naslov (sl):</b> S stekleno tkanino ojačeni polimerni materiali - Določanje praznin v materialu - Žaroizguba, mehansko drobljenje in statistična števna metoda (ISO 7822:1990) <b>Naslov osnove:</b> Textile glass reinforced plastics - Determination of void content - Loss on ignition, mechanical disintegration and statistical counting methods (ISO 7822:1990)
SIST EN ISO 1183-1:2004 (ISO 1183-1:2004)	<b>Naslov (sl):</b> Polimerni materiali - Metode za določanje gostote nepenjenih polimernih materialov - 1. del: Metoda s potapljanjem, metoda s tekočinskim piknometrom in titracijska metoda (ISO 1183-1:2004) <b>Naslov osnove:</b> Plastics - Methods for determining the density of non-cellular plastics - Part 1: Immersion method, liquid pyknometer method and titration method (ISO 1183-1:2004)

## PRILOGA B

## Pregled relevantnih ASTM standardov

<b>Oznaka standarda</b>	<b>Naslov standarda</b>
D3039/D3039M - 08	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
D2734	Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics
D3171	Test Methods for Constituent Content of Composite Materials
D3878	Terminology for Composite Materials
D5229/D5229M	Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials
D792	Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
D883	Terminology Relating to Plastics
E1012	Practice for Verification of Test Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application
E122	Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process
E1237	Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages
E132	Test Method for Poissons Ratio at Room Temperature
E177	Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods
E251	Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages
E83	Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems