

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2020

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Diplomska naloga št.:

Graduation thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.04+624.07(497.4)(043.2)
Avtor:	Darjan Grudnik
Mentor:	prof. dr. Vlatko Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	asist. dr. David Antolinc, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Eksperimentalno podprta numerična analiza vijačenih spojev iz armirane plastike
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	40 str., 5 pregl., 37 sl., 10 en.
Ključne besede:	kompoziti, armirana plastika, vijačeni spoji, numerična analiza, natezna obremenitev

Izvleček:

Namen diplomske naloge je predstaviti kompozitne materiale ter izvesti numerično analizo enojnih vijačenih spojev iz armirane plastike. Prednosti kompozitov, natančneje armirane plastike, se kažejo v visoki trdnosti v kombinaciji z majhno prostorninsko težo. Numerični model, izdelan v okviru te diplomske naloge, v programskem okolju Abaqus, je nekoliko preveč poenostavljen za kompleksno analizo, ki bi lahko opisala porušitev spoja. Model nam omogoča opis linearnega dela deformacij obravnavanega spoja od začetka obremenjevanja do točke, kjer je dosežena trdnost materiala. Za celoten opis obnašanja spoja bi bilo potrebno v nadaljevanju upoštevati še mehaniko loma. Med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati je prišlo do odstopanja zaradi poenostavitve geometrije vijaka in definirane popolne vpetosti, ki v realnosti ni mogoča. Največja pomanjkljivost modela pa je definicija materiala, v kateri ni zajeta mehanika loma, ki je tudi glavni razlog za večje odstopanje rezultatov. V primerih preizkušancev, pri katerih sta bili obremenitev in deformacija večji, oziroma je bil odmik vijaka od roba preizkušanca velik, je prišlo do večjega odstopanja rezultatov. Primeri preizkušancev z manjšimi obremenitvami in deformacijami oziroma manjšimi robnimi razdaljami pa so dajali rezultate, ki so bili v inženirskem smislu popolnoma skladni z linearnim delom rezultatov eksperimentalne analize. Armirana plastika je material z ogromno potenciala, ki bo v polni meri izkoriščen, ko bodo na voljo tudi standardi, ki bodo inženirju nudili podporo pri izbiri in uporabi tega materiala.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.04+624.07(497.4)(043.2)
Author: Darjan Grudnik
Supervisor: prof. dr. Vlatko Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.
Co-advisor: asist. dr. David Antolinc, univ. dipl. inž. grad.
Title: Experimentally supported numerical modelling of single bolt lap FRP plate connection
Document type: Graduation thesis – University Studies
Notes: 40 p., 5 tab., 37 fig., 10 eq.
Keywords: composites, FRP, single bolted lap joint, numerical analysis, tension load

Abstract:

The purpose of this paper is to present composite materials, specifically fiber reinforced polymers or FRP and to carry out a numerical analysis on a single bolt FRP lap joint. The main advantage of FRP elements comes from their high strength with a combination of low mass. Numerical model that was prepared in software Abaqus proved itself to be valid when trying to simulate linear behaviour of experiments where strains, stresses and distances between the bolt and the edge are not too large. Some simplifications regarding the geometry and boundary conditions of the model were made during the experiment conduction. The numerical model is completely valid only until the appearance of the first smallest fracture or until the ultimate strength of an individual fiber is achieved. To improve the accuracy of the model within the linear range or to even describe the nonlinear behaviour, the model would need to be upgraded with finite elements which can consider fracture mechanics theory of the material. As this upgrade exceeds the level of the present thesis, I did not continue the extended studying and research into the fracture mechanics of the considered lap joint. FRP elements have a great potential in the future which will only be achieved when there are valid standards and guidelines with simplified expressions for their design.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč in usmerjanje pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju, prof. dr. Vlatku Bosiljkovu, univ. dipl. inž. grad., ter somentorju, asist. dr. Davidu Antolincu, univ. dipl. inž. grad. Zahvala gre tudi Mateju Toporišu, univ. dipl. inž. grad., za dodatne razlage, predloge in svetovanja.

Zahvaljujem se tudi družini, ki mi je omogočila študij in me ves čas podpirala, ter vsem drugim, ki so me spremljali na tej poti in mi stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	II
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	III
ZAHVALA.....	IV
1 UVOD.....	1
2 ARMIRANA PLASTIKA.....	2
2.1 Splošno o kompozitih in armirani plastiki	2
2.2 Sestavni elementi armiranih plastik	3
2.3 Proizvodne metode kompozitov	4
2.3.1 Pultruzija	4
2.3.2 Ročno lameliranje	4
2.3.3 Ostale proizvodne metode.....	5
3 OBSTOJEČE STANJE ANALIZE VIJAČENIH SPOJEV.....	6
3.1 Porušni mehanizmi vijačenih spojev.....	6
3.2 Obstoječi standardi za analizo in dimenzioniranje.....	11
3.3 Numerični modeli za opis obnašanja FRP elementov.....	12
3.3.1 Programi za numerično analizo.....	13
3.3.2 Tipi končnih elementov.....	13
3.3.3 Material, geometrija, obtežba in robni pogoji	14
4 NUMERIČNA ANALIZA	16
4.1 Namen analize	16
4.2 Material	16
4.3 Geometrija.....	17
4.4 Numerični model.....	18
4.4.1 Geometrija modela	19
4.4.2 Definiranje materiala.....	21
4.4.3 Definiranje kontaktov.....	22

4.4.4	Robni pogoji in obtežba.....	22
4.4.5	Končni elementi in potek računa	23
5	ANALIZA NUMERIČNIH REZULTATOV IN PRIMERJAVA Z EKSPERIMENTALNIMI REZULTATI.....	25
5.1	Preizkušanec P1	25
5.2	Preizkušanec P2	29
5.3	Preizkušanec P3	31
5.4	Primerjava rezultatov vseh preizkušancev ter kritični komentarji.....	33
6	ZAKLJUČEK	37
7	VIRI IN LITERATURA	39
7.1	Uporabljeni viri	39
7.2	Ostali viri	40

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Minimalne zahtevane lastnosti materialov v razredih E17 in E23. [1]	12
Preglednica 2: Nekaj končnih elementov, ki jih ponujata ANSYS in ABAQUS. [10].....	14
Preglednica 3: Togost materiala v različnih smereh. [1]	16
Preglednica 4: Geometrija posameznih preizkušancev v eksperimentalni analizi. [1]	17
Preglednica 5: Geometrija posameznih preizkušancev v numerični analizi.	19

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer plošč, narejenih iz FRP kompozitov. [3]	2
Slika 2: Shematski prikaz sestavnih elementov FRP kompozita. [1]	3
Slika 3: Prikaz pultruzijskega procesa. [1]	4
Slika 4: Ojačitev stebrov s FRP elementi (ročno lameliranje). [7]	5
Slika 5: Različni tipi porušnih mehanizmov vijčenih spojev iz armirane plastike. [1]	7
Slika 6: Minimalne razdalje med vijaki ter med vijaki in robovi elementa (d = premer vijaka). [4]	7
Slika 7: Aproksimacija porazdelitve napetosti v laminatu okoli vijaka. [4]	8
Slika 8: Natezna porušitev vlaken po neto prerezu. [4]	9
Slika 9: Cepilna porušitev kompozita pred vijakom v vzdolžni smeri. [4]	9
Slika 10: Strižna porušitev v strižnih ravninah pred vijakom. [4]	10
Slika 11: Strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom. [4]	10
Slika 12: Tlačna porušitev zaradi bočnih pritiskov, ovalizacija luknje. [4]	11
Slika 13: Skica eksperimentalne geometrije. [1]	18
Slika 14: Celoten pregled preizkušanca: a - vijak z matico in podložko, b - jeklene vilice, c - epoksi lepilo, d - preizkušanec, e - jeklene vilice, f - sestavljen preizkušanec. [1]	18
Slika 15: Skica numerične geometrije.	20
Slika 16: Geometrijska osnova vijaka.	20
Slika 17: Geometrijska osnova FRP elementa (primer P1).	21
Slika 18: Določitev robnih pogojev, potrebnih za vpetje FRP elementa (primer P1).	23
Slika 19: Prikaz končnega modela z vidnimi končnimi elementi v ravnini XZ (primer P1).	24
Slika 20: Prikaz končnega modela z vidnimi končnimi elementi v izometričnem pogledu (primer P1).	24
Slika 21: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušanec P1.	25
Slika 22: Pomiki ploščice P1 v smeri X (enota: mm)	26
Slika 23: Potek minimalnih (tlačnih) napetosti v ploščici P1 (enota: MPa).	27
Slika 24: Potek napetosti S_{11} v ploščici P1 (enota: MPa).	27
Slika 25: Strižne napetosti na levem zgornjem delu luknje za vijak.	28
Slika 26: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušanec P2.	29
Slika 27: Pomiki ploščice P2 v smeri X (enota: mm)	30
Slika 28: Potek napetosti S_{11} v ploščici P2 pri sili ≈ 20 kN (enota: MPa).	30
Slika 29: Potek napetosti S_{22} v ploščici P2 pri sili ≈ 20 kN (enota: MPa).	31
Slika 30: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušanec P3.	32
Slika 31: Pomiki ploščice P3 v smeri X (enota: mm)	32
Slika 32: Potek napetosti S_{11} v ploščici P3 pri sili ≈ 20 kN (enota: MPa).	33
Slika 33: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušance P1, P2, P3.	34
Slika 34: Diagram pomika in sile za preizkušance v eksperimentalni in numerični analizi. [1]	35

Slika 35: Diagram pomika in sile za preizkušance P1 v eksperimentalni in numerični analizi.	35
Slika 36: Diagram pomika in sile za preizkušance P2 v eksperimentalni in numerični analizi.	36
Slika 37: Diagram pomika in sile za preizkušance P3 v eksperimentalni in numerični analizi.	36

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Umetni kompoziti so materiali, ki so v panogi gradbeništva relativno novi. Odpirajo številne nove poglede na reševanje problemov, a zavedati se je potrebno, da se o njih še vedno učimo. Na področju analiz pa se že nekaj časa uveljavljajo vse bolj priljubljene numerične metode. Običajno nam v gradbeništvu zanimiv problem predstavljajo spoji različnih elementov in ravno numerične analize in simulacije omogočajo lažjo interpretacijo njihovih porušnih mehanizmov.

Namen diplomske naloge je predstaviti kompozitne materiale ter izvesti numerično analizo enojnih vijačenih spojev iz armirane plastike. Z izdelavo numerične analize želim simulirati že izvedeno eksperimentalno analizo, ki jo je leta 2016 na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v okviru zaključnega dela izvedel Robi Ponjavić. [1] Diplomska naloga združuje predstavitev novejšega materiala in pristopa k reševanju problemov, hkrati pa ponuja primerjavo enakega materiala, analiziranega na dva različna načina.

Cilji diplomske naloge so: predstaviti nekaj splošnih informacij o kompozitnih materialih in armirani plastiki, predstaviti sestavne elemente takšnega materiala ter na kratko opisati različne možne proizvodne metode, raziskati obstoječe stanje na področju analize vijačenih spojev iz armirane plastike, ustvariti kratek pregled nad nekaterimi deli numerične analize ter izdelati poenostavljen numerični model za opis eksperimentalne analize in doseči vsaj približno ujemanje linearnega dela rezultatov. Numerični model omogoča ponovljivost, analiza rezultatov pa kritično primerja rezultate obeh analiz. Analiza je omejena na tri različne geometrijske modele spojev in izvedena v programskem okolju Abaqus.

2 ARMIRANA PLASTIKA

2.1 Splošno o kompozitih in armirani plastiki

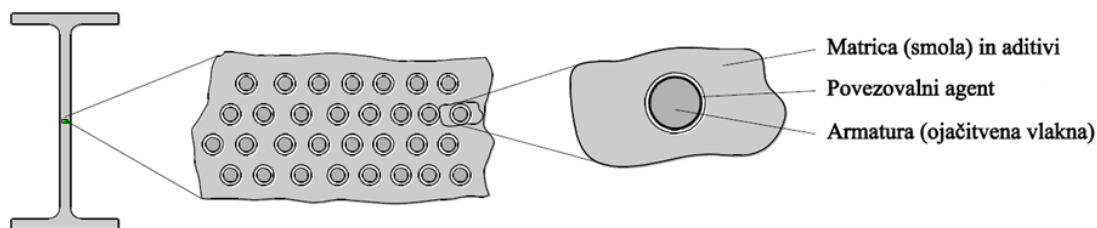
Kompozit je material, ki je sestavljen iz dveh ali več različnih materialov. Združevanje materialov z različnimi mehanskimi in kemijskimi lastnostmi nam mogoča, da v posameznem elementu izkoristimo njegove izrazito dobre lastnosti, pri tem pa njegove slabše lastnosti izboljšamo oziroma nadomestimo z dobrimi lastnostmi drugega sestavnega materiala. Posamezni sestavni elementi kompozitov samostojno niso nujno primerni za konstrukcijske namene, a kadar lahko dosežemo, da posamezni elementi delujejo skupaj kot celota, dobimo material, ki ima zelo posebne in napredne lastnosti, ki jih lahko do določene mere, glede na konstrukcijske zahteve in z uporabo ustreznih sestavnih elementov, določamo »sami«. Slika 1 prikazuje primere plošč, ki so narejene iz FRP (fiber reinforced polymer) kompozitov. Uporabo polimernih kompozitov lahko zasledimo že v letu 1940, ko so se večinoma uporabljali v vojaški industriji. Približno 40 let pozneje pa se je začela intenzivna uporaba tudi v gradbeništvu, predvsem za gradnjo začasnih objektov in pa obnovo oziroma rekonstrukcijo starejših objektov. FRP (fiber reinforced polymer) kompoziti so se izkazali kot material, ki odlično prenaša agresivna okolja, lahko prenaša velike obremenitve, je odporen na utrujanje, je izjemno obstojen, je zmožen sipanja energije ter zato primeren za potresno aktivna območja in ima relativno majhno prostorninsko težo v primerjavi z ostalimi materiali, ki se uporabljajo v gradbeništvu. [1], [2]



Slika 1: Primer plošč, narejenih iz FRP kompozitov. [3]

2.2 Sestavni elementi armiranih plastik

Armirana plastika je kompozit in kot že zgoraj omenjeno, je kompozit sestavljen iz več posameznih materialov. V primeru armirane plastike so to matrica, armatura, povezovalni agent, razni dodatki in polnila. Slika 2 prikazuje shematski prikaz sestave FRP kompozita.



Slika 2: Shematski prikaz sestavnih elementov FRP kompozita. [1]

Matrica je sestavljena iz smol, dodatkov in polnil. Matrica je pomemben sestavni element, ki zagotavlja povezavo med posameznimi vlakni (armaturo) ter drži vlakna v ustrezni predvideni geometrijski obliki. Poskrbi za prenos obtežbe na vlakna, hkrati pa tudi matrica sama prenaša strižne napetosti. V primeru tlačno obremenjenih vlaken poskrbi za neke vrste bočno podpiranje vlaken in s tem preprečuje njihovo izbočenje. V splošnem tudi ščiti vlakna pred zunanjimi vplivi, ki bi lahko vlakna poškodovali.

Armatura je glavni element, ki poskrbi za prevzem obtežbe. Na armaturo v armirani plastiki lahko gledamo podobno kakor na armaturo v betonu, s pomembno razliko v deležu armature, ki pri betonu redko preseže 5 %, pri armirani plastiki pa lahko govorimo tudi o 75 % deležu armature. Poznamo več različnih vrst armature oziroma vlaken, kot so karbonska, aramidna (kevlar) in E-steklena vlakna. Vlakna so velikostnega reda od 3 do 24 mikrometrov. Aramidna vlakna so za običajne gradbene projekte predraga, zato se v gradbeništvu večinoma uporabljajo E-steklena in karbonska vlakna.

Polnila v armirani plastiki uporabljamo s podobnim namenom, kakor agregat v betonu. Z uporabo polnil zmanjšamo delež drage matrice in s tem znižamo ceno elementa. Poleg tega lahko z uporabo posebnih polnil povečamo odpornost zunanje površine na obrabo.

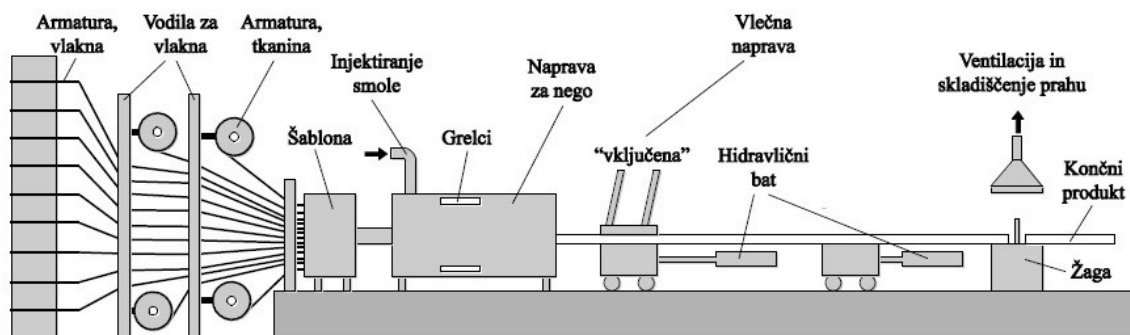
Naloga povezovalnega agenta je zagotoviti ustrezno povezavo med vlakni in matrico. Ta povezava je ključna (podobno, kakor povezava betona z jekleno armaturo), saj brez te povezave vlakna in matrica ne morejo ustrezno sodelovati pri prevzemu obremenitev. [1], [4], [5]

2.3 Proizvodne metode kompozitov

Izdelava elementov iz armirane plastike lahko poteka na več različnih načinov. Kateri način je najboljši, je odvisno od tega, kaj želimo izdelati, kakšne so zahtevane lastnosti izdelka, koliko časa in denarja imamo na voljo itd. Za področje gradbeništva sta najbolj zanimivi metodi: pultruzija in ročno lameliranje. [5]

2.3.1 Pultruzija

Pultruzija (pultrusion) je najbolj razširjena metoda, s katero se za potrebe v gradbeništvu izdelujejo elementi iz armirane plastike (prikaz pultruzijskega procesa na sliki 3). Gre za avtomatizirano proizvodnjo izdelave kompozitov, katera se je prvič pojavila že v 50-ih letih prejšnjega stoletja. Metoda omogoča izdelavo elementov različnih prečnih prereзов (z možnostjo spremenljivih debelin) in poljubnih dolžin. Proces zagotavlja izjemno dobro nadzorovano oziroma kontrolirano izdelavo elementov, to pa omogoča reprodukcijo profilov s praktično enakimi lastnostmi. Proces izdelave je hiter, ekonomičen in enostaven, sama proizvodna linija pa precej draga. Pri izračunih se lastnosti elementov v smeri pultruzije označujejo z indeksom 0° , v smeri pravokotno na smer pultruzije pa z indeksom 90° . [2], [4], [5], [6]



Slika 3: Prikaz pultruzijskega procesa. [1]

2.3.2 Ročno lameliranje

Ročno lameliranje (hand layup) je najstarejša metoda za izdelavo FRP elementov. Prikaz ročnega lameliranja lahko vidimo na sliki 4. Ta metoda je nekoliko bolj razširjena v nekaterih drugih inženirskih vejah, kot je recimo strojništvo, kjer se večkrat proizvajajo elementi, ki so različnih nepravilnih oblik in je zato ta metoda veliko primernejša. Kljub temu pa se ta metoda uporablja tudi v gradbeništvu, običajno, kadar nastane potreba po ojačitvi obstoječih konstrukcij. Elementi iz armirane

plastike tako nastajajo v stiku z neko drugo površino, s katero mora biti zagotovljena dobra povezava. Za zagotavljanje ustreznega stika je potrebno izbrati ustrezno smolo (vezivo), ki bo, glede na material elementa, ki ga poskušamo ojačiti, zagotovila ustrezen stik ter hkrati ustrezno povezala tudi posamezna vlakna. Čeprav obstaja veliko primerov dobre prakse in priporočil, kako ojačiti takšne elemente, pa evropski standard za takšno utrjevanje s FRP elementi še ne obstaja. [1], [5]



Slika 4: Ojačitev stebrov s FRP elementi (ročno lameliranje). [7]

2.3.3 Ostale proizvodne metode

Poleg zgoraj omenjenih tehnik obstajajo še številne druge metode za proizvodnjo FRP elementov. V veliki večini teh primerov gre za proizvodnjo posameznih enkratnih izdelkov in ne za kontinuirano proizvodnjo elementov. Ena izmed teh metod je navijanje vlaken na valje (filament winding). Pri tej metodi gre za navijanje vlaken na posebne valje, na katere so vlakna lahko navita v različnih smereh. Valji se po končanem postopku lahko zložijo in odstranijo. Številne druge metode omogočajo proizvodnjo FRP elementov s pomočjo različnih odprtih ali zaprtih kalupov. [1], [5]

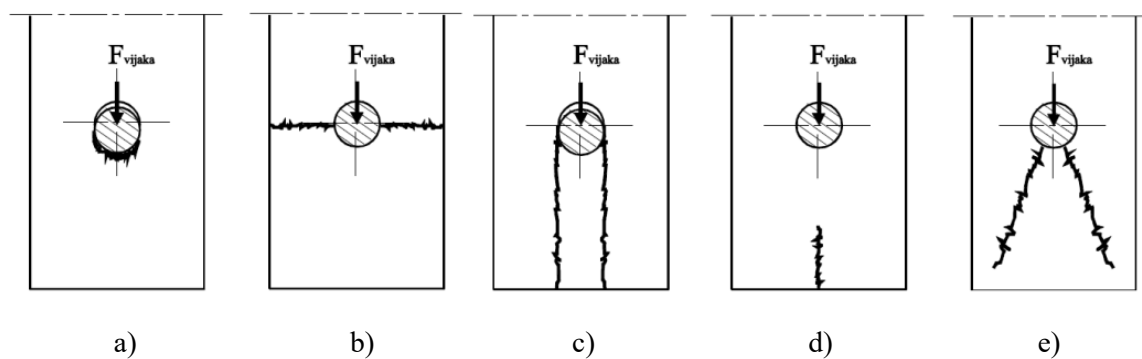
3 OBSTOJEČE STANJE ANALIZE VIJAČENIH SPOJEV

FRP (fiber reinforced polymer) elementi so danes zelo priljubljeni, predvsem zaradi svojih superiornih lastnosti v primerjavi z ostalimi tradicionalnimi gradbenimi materiali, poleg tega pa nove tehnologije omogočajo vse cenejšo proizvodnjo FRP elementov. Ne glede na material pa je v vsaki konstrukciji vedno potrebno posebno pozornost nameniti detajlom ter spojem, podobno velja tudi za FRP elemente. Analiza takšnih spojev z modeli, sestavljenimi iz 3D končnih elementov, je tako rekoč nujna za napredno numerično analizo vijčnih spojev iz armirane plastike zaradi raznolikega poteka napetosti in deformacij v različnih smereh. Pri analizi je pomembno upoštevati čim bolj točno geometrijo ter vplive velikosti vijakov, števila vijakov, prednapetja vijakov itd. Natančna analiza je v prvi vrsti seveda pomembna, saj so spoji v konstrukcijah eni izmed najbolj pomembnih in obremenjenih elementov, poleg tega pa že majhne poškodbe vlaken ali matrice v FRP elementu lahko povzročijo porušitev spoja. Do porušitve materiala običajno ne pride že ob prvem nanosu obtežbe, ampak šele čez nekaj časa, ko se mikroskopske poškodbe sčasoma povečajo do te mere, da spoj odpove. [9]

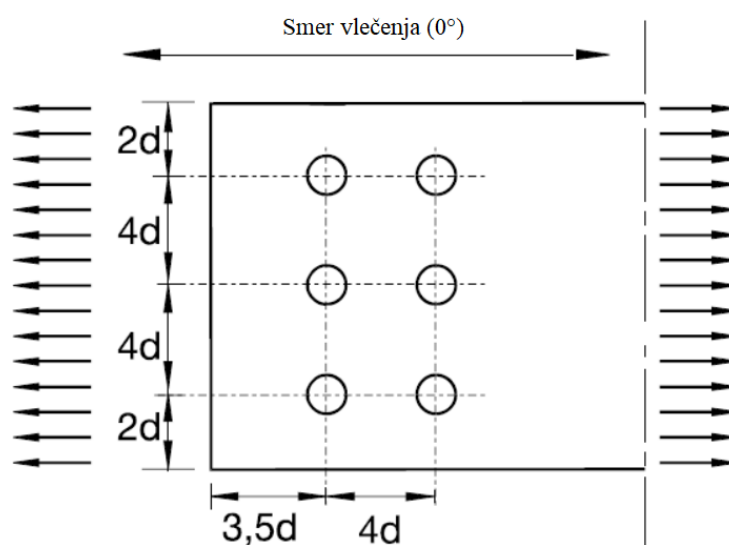
3.1 Porušni mehanizmi vijčenih spojev

Vijačeni spoji zagotavljajo povezavo med elementi s pomočjo vijakov. Dobra lastnost vijčenih spojev je ta, da so pravila za izdelavo zelo dobro definirana (nekateri večji proizvajalci imajo patentirana celo svoja pravila za dimenzioniranje spojev iz njihovih izdelkov), poleg tega pa vijačeni spoji omogočajo, da lahko konstrukcijo razstavimo in ponovno sestavimo. Glavna slabost vijčenih spojev pa je ta, da zaradi lukenj v priključnem elementu tega oslabimo. Dodatno pa v material, prav zaradi načina izvedbe spojev, vnašamo tudi relativno velike koncentracije napetosti. Pri dimenzioniranju vijčenih spojev je potrebno preveriti vse porušne mehanizme, ki se lahko zgodijo. Porušni mehanizem, ki ponudi najmanjšo odpornost, je mehanizem, ki je merodajen za dimenzioniranje. [1], [4], [8]

Na sliki 5 so prikazani različni možni porušni mehanizmi. Slika 5 a prikazuje tlačno porušitev kompozita na stiku z vijakom, slika 5 b prikazuje strižno porušitev neto preseka kompozita, slika 5 c prikazuje strižno porušitev z iztrgom vijaka, slika 5 d prikazuje cepilno porušitev kompozita pred vijakom in slika 5 e prikazuje diagonalno strižno porušitev kompozita. Zavedati se je potrebno, da se te porušitve lahko zgodijo v različnih smereh glede na potek vlaken v kompozitu oziroma glede na obremenitev. Fiberline Design Manual tako analizira porušitve v dveh glavnih smereh, in sicer pod kotom 0° in 90° , glede na potek pultruzije. Na sliki 6 pa lahko vidimo predpisane minimalne razdalje med vijaki in robovi elementa. [1], [4]



Slika 5: Različni tipi porušnih mehanizmov vijčenih spojev iz armirane plastike. [1]



Slika 6: Minimalne razdalje med vijaki ter med vijaki in robovi elementa (d = premer vijaka). [4]

Razlaga pomena spremenljivk uporabljenih v enačbah:

f_{cB} – trdnost na steblo vijaka

$f_{c,v}$ – tlačna trdnost v izbrani diagonalni smeri

d – premer vijaka

t – debelina laminata

γ_m – varnostni faktor

a – razdalja med središčno linijo vijaka in robom laminata, v smeri sile

b – širina območja pred vijakom, kjer se pojavijo medplastne strižne sile

c – razdalja med središčno linijo vijaka in robom laminata v smeri pravokotno na smer sile

v – kot, pod katerim deluje sila P_2 na vijak

$F_{vijaka,d} = P_{Bolt,d}$ – oznaka za projektno strižno silo, ki deluje na vijak

Enačbe za opis porušnih mehanizmov:

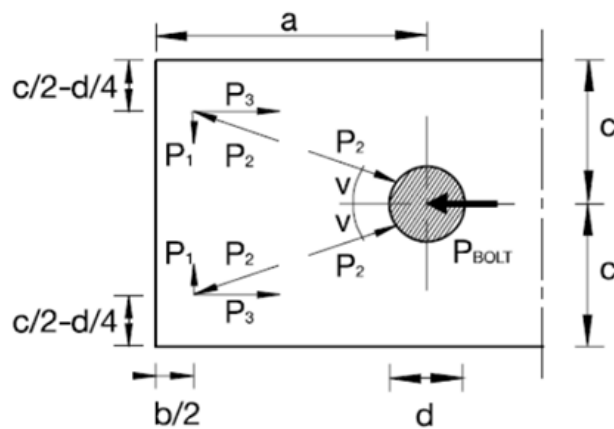
$$F_{vijaka,d} = P_{Bolt,d} = \frac{d \times t \times f_{cB}}{\gamma_m} \quad (1)$$

$$\tan(v) = \frac{[c/2 + d/4]}{[a - b/2]} \quad (2)$$

$$P1 = \frac{1}{2} \times P_{Bolt} \times \tan(v) \quad (3)$$

$$P2 = \frac{P_{Bolt}}{2 \times \cos(v)} \quad (4)$$

$$P3 = \frac{1}{2} \times P_{Bolt} \quad (5)$$



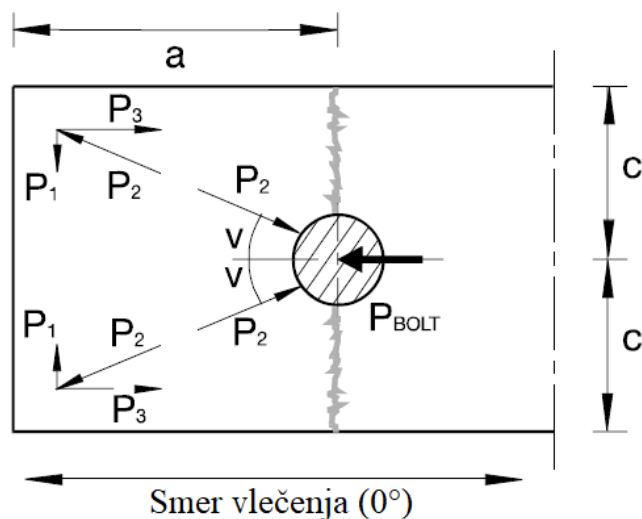
Slika 7: Aproksimacija porazdelitve napetosti v laminatu okoli vijaka. [4]

Slika 7 prikazuje predviden razpored napetosti oziroma sil v okolici vijaka. Skice (slike 8–12) in enačbe (6–10) pa opisujejo na sliki 5 prikazane porušne mehanizme, povzete po priročniku Fiberline Design Manual. [4]

Porušni mehanizmi:

Stanje 1 – Natezna porušitev vlaken po neto prerezu (slika 8).

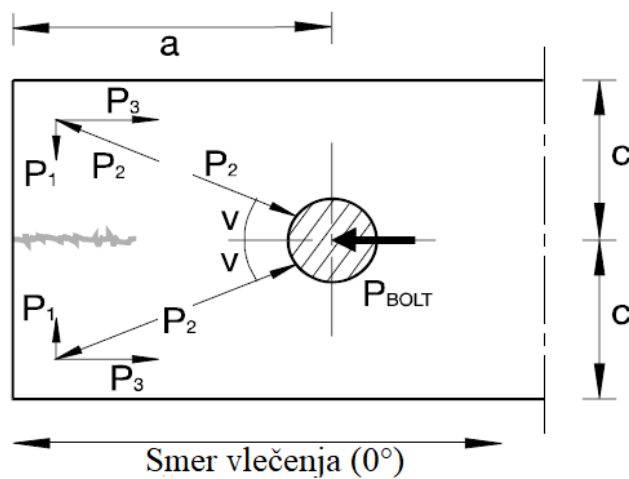
$$\frac{P_3}{(c - \frac{d}{2}) \times t} \leq f_{t,0} \quad (6)$$



Slika 8: Natezna porušitev vlaken po neto prerezu. [4]

Stanje 2 – Cepilna porušitev kompozita pred vijakom v vzdolžni smeri (slika 9).

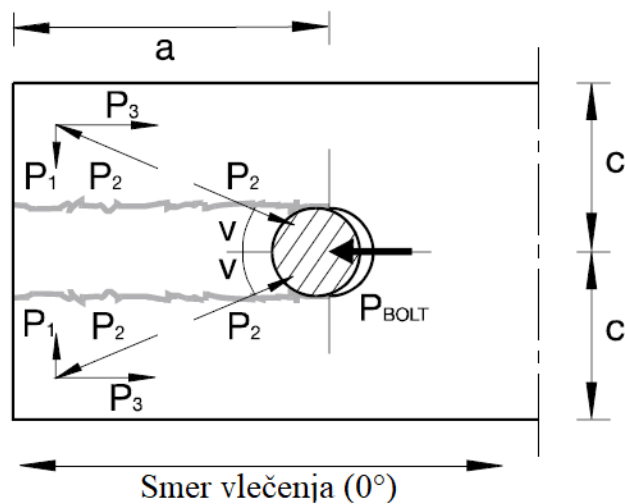
$$\frac{P_1}{b \times t} \leq f_{t,90} \quad (7)$$



Slika 9: Cepilna porušitev kompozita pred vijakom v vzdolžni smeri. [4]

Stanje 3 – Strižna porušitev v strižnih ravninah pred vijakom (slika 10).

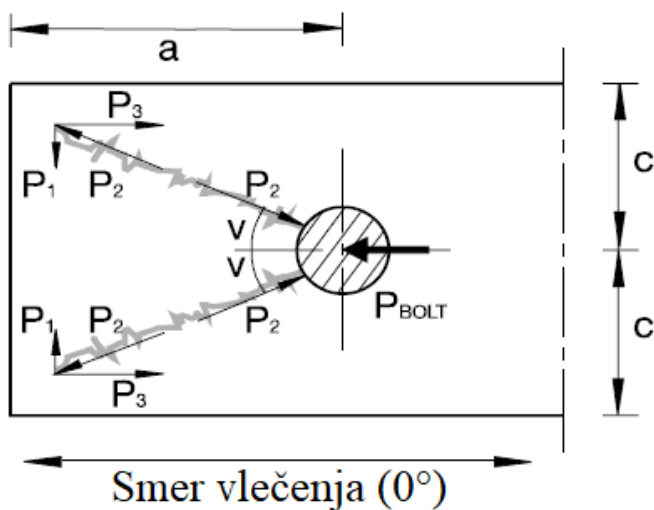
$$\frac{P_{Bolt}}{2 \times \left(a - \frac{d}{2}\right) \times t} \leq f_{\tau} \quad (8)$$



Slika 10: Strižna porušitev v strižnih ravninah pred vijakom. [4]

Stanje 4 – Strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom (slika 11).

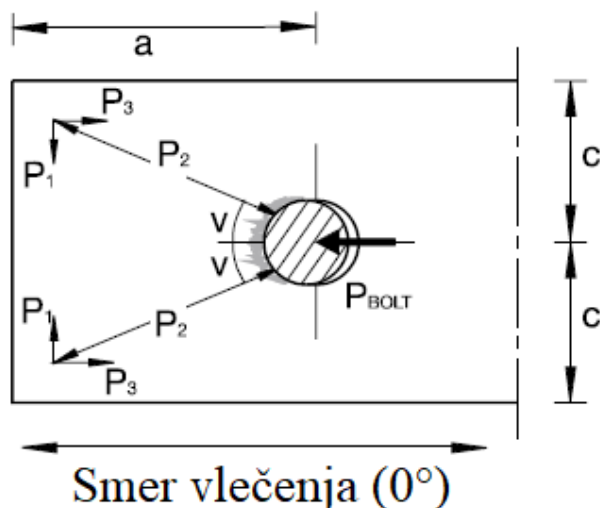
$$\frac{P_2}{d \times t} \leq f_{c,v} \quad (9)$$



Slika 11: Strižna porušitev diagonalno na vlakna pred vijakom. [4]

Stanje 5 – Tlačna porušitev zaradi bočnih pritiskov, ovalizacija luknje (slika 12).

$$\frac{P_{Bolt}}{d \times t} \leq f_{c,0} \quad (10)$$



Slika 12: Tlačna porušitev zaradi bočnih pritiskov, ovalizacija luknje. [4]

3.2 Obstoječi standardi za analizo in dimenzioniranje

Evrokod standardi za projektiranje kompozitnih konstrukcij v Evropi še ne obstajajo. Trenutno je na voljo le standard EN 13706, ki se nanaša izključno na vlečene (pultruzijske) profile in velja le za elemente, ki so v skladu s standardi, definirani kot primeri, »kjer je nosilna lastnost glavni kriterij oblikovanja in kjer je produkt sam del sistema nosilne konstrukcije« [6]. Omenjeni standard podaja osnovne minimalne zahteve o kvaliteti, tolerancah, trdnosti in togosti nosilnih elementov ter vlečene profile razdeljuje v dve osnovni skupini E17 in E23 (glej preglednico 1). Razred E23 ima najbolj stroge zahteve glede kvalitete elementov, medtem ko ima razred E17 zahteve, ki so nekoliko bolj prizanesljive. Structural Design of Polymer Composites – Eurocomp Design Code and Handbook [8] je priročnik, ki ponuja izjemno dobro in detajlno obdelano snov s področja analize in dimenzioniranja kompozitov in je osnova za mnoge priročnike, ki jih izdajajo proizvajalci kompozitov posebej za svoje produkte. Primer takšnega priročnika je Fiberline Design Manual [4] danskega podjetja Fiberline. V večji meri so si strokovne literature o projektiranju kompozitov precej podobne, glavne razlike med različnimi priročniki pa so v določanju materialnih varnostnih faktorjev. [1], [4], [6]

V splošnem lahko standard EN 13706 razdelimo na tri dele: [6]

- EN 13706-1: določa sistem imenovanja in označevanja konstrukcijskih elementov glede na materiale, matrico, tip armiranja, površinske obdelave itd.;
- EN 13706-2: podaja metode, s katerimi testiramo profile, pridobljene s procesom vlečenja (pultruzije) ter podaja smernice za zagotavljanje kvalitete elementov;
- EN 13706-3: podaja minimalne zahtevane tehnične lastnosti različnih vrst konstrukcijskih profilov v povezavi z razredom kvalitete glede na standard (E17 in E23).

Preglednica 1: Minimalne zahtevane lastnosti materialov v razredih E17 in E23. [1]

Lastnosti materiala	Minimalne zahteve		Enote	Metoda testiranja
	E17	E23		
Modul elastičnosti	17	23	GPa	Aneks D, EN 13706-2:2002
Natezni modul - vzporedno z vlakni, 0°	17	23	GPa	EN ISO 527-4
Natezni modul - prečno na vlakna, 90°	5	7	GPa	EN ISO 527-4
Natezna trdnost - vzporedno z vlakni, 0°	170	240	MPa	EN ISO 527-4
Natezna trdnost - prečno na vlakna, 90°	30	50	MPa	EN ISO 527-4
Trdnost na steblo vijaka, vzporedno z vlakni, 0°	90	150	MPa	Aneks E, EN 13706-2:2002
Trdnost na steblo vijaka, prečno na vlakna, 90°	50	70	MPa	Aneks E, EN 13706-2:2002
Upogibna trdnost, 0°	170	240	MPa	EN ISO 14125
Upogibna trdnost, 90°	70	100	MPa	EN ISO 14125
Strižna trdnost	15	25	MPa	EN ISO 14130

3.3 Numerični modeli za opis obnašanja FRP elementov

Za analizo vijačenih spojev iz armirane plastike imamo več različnih možnosti. Vedno lahko uporabimo eksperimentalne preiskave, a smo s temi precej omejeni, saj z njimi običajno težko pridobimo detajlni vpogled v dogajanje ob porušitvi. Kljub temu pa so potrebne, saj lahko z njimi preverimo naše ugotovitve, pridobljene iz drugih raziskav, kot so analitične in numerične. Analitični modeli so dobri, a žal je z njimi dogajanje tik ob porušitvi težko opisati. Tu na vrsto pridejo numerični modeli z že omenjenimi končnimi elementi. Takšen način analize nam edini lahko omogoči globlji vpogled v material v neposredni bližini vijakov ob porušitvi. [9]

3.3.1 Programi za numerično analizo

Najbolj poznana, izjemno napredna in vsesplošno uporabna programa za analizo inženirskih problemov z metodo končnih elementov sta programa ABAQUS in ANSYS, ki, poleg linearne analize, omogočata tudi kompleksno nelinearno analizo. Algoritma ABAQUSTM in ANSYSTM omogočata tudi posebne možnosti pri analizi kompozitnih materialov, saj uporabniku omogočata samostojno formulacijo elementov in oblikovanje oziroma urejanje konstitutivnih enačb. Delovanje programov, pri katerih je uporabljena metoda končnih elementov, lahko razdelimo na tri dele. V prvem delu je potrebno narediti model, v katerem se določijo vsi parametri, ki so potrebni za nadaljnjo obdelavo problema. Podati je potrebno geometrijo modela, materialne lastnosti, določiti končne elemente, določiti obtežbo ter podpiranje modela oziroma robne pogoje. V drugi fazi sledi izračun togostne matrike modela in pa obtežnega vektorja. S programom lahko te enačbe rešimo ter v zadnji fazi rezultate analiziramo, običajno s pomočjo grafičnih orodij. Uporaba takšnih programov za numerično modeliranje od uporabnika zahteva dobro inženirsko in tudi računalniško znanje. [10]

3.3.2 Tipi končnih elementov

Končni element je območje med določenimi posameznimi vozlišči. Pri numeričnih analizah so vrednosti vedno izračunane v vozliščih, za rezultate v prostoru med vozlišči pa se uporabljajo različne interpolacijske funkcije. Programi, ki uporabljajo metodo končnih elementov, imajo običajno v svojih knjižnicah definirane različne tipe končnih elementov. Izbira tipa končnega elementa je odvisna od geometrije modela, zahtevane natančnosti ter želenih rezultatov analize. Glavne razlike med različnimi tipi končnih elementov se kažejo v številu vozlišč, v številu prostostnih stopenj v posameznem vozlišču ter v številu dimenzij končnega elementa, ki je lahko linijski, dvo- ali tridimenzionalen. Preglednica 2 prikazuje običajno izbiro končnih elementov v programih ANSYS in ABAQUS. [10]

Preglednica 2: Nekaj končnih elementov, ki jih ponujata ANSYS in ABAQUS. [10]

Ime KE v programu ANSYS	Ime KE v programu ABAQUS	Vozlišča	Prostostne stopnje	Opis končnega elementa
LINK1	T2D2	2	$u_x u_y$	Linijski element v 2D prostoru
LINK3	T3D2	2	$u_x u_y u_z$	Linijski element v 3D prostoru
BEAM3	B21	2	$u_x u_y$ $\phi_x \phi_y$	Linijski element v 2D prostoru
BEAM4	B31	2	$u_x u_y u_z$ $\phi_x \phi_y \phi_z$	Linijski element v 3D prostoru
PLANE42	CPE4	4	$u_x u_y$	Ploskovni 4-voziščni quadrilateral v 2D prostoru
PLANE82	CPE8	8	$u_x u_y$	8-voziščni quadrilateral v 2D prostoru
SOLID45	C3D8	8	$u_x u_y u_z$	3D element z 8 vozišči hexahedra v 3D prostoru
SHELL63	S4	4	$u_x u_y u_z$ $\phi_x \phi_y \phi_z$	Ploskovni (shell) 4 voziščni quadrilateral v 3D prostoru

3.3.3 Material, geometrija, obtežba in robni pogoji

Vsak končni element mora vsebovati podatke o materialu, iz katerega je narejen. Bolj kompleksen kot je naš material, večja bo zahtevana natančnost opisa tega materiala. V primeru kompozitov iz armirane plastike se je pri analizah potrebno zavedati, da imamo opravka z materialom, ki je nehomogen ter anizotropen, poleg tega pa lahko v najbolj naprednih analizah na mikro nivoju upoštevamo lastnosti posameznih sestavnih elementov (matrice in vlaken).

Geometrijo modela predstavlja točno definirana pozicija vsakega končnega elementa. Mreža končnih elementov oziroma pozicije elementov so lahko podane na dva različna načina. V prvem načinu uporabnik definira vozlišča, jih med seboj poveže, vsakemu izmed vozlišč pripiše obtežbo ter robne pogoje. V drugem načinu pa uporabnik ustvari model z uporabo črt, ploskev in točk, mrežo vozlišč s

končnimi elementi pa program ustvari sam. Robne pogoje in obtežbe je možno pripisati že ploskvam, črtam in točkam pred mreženjem modela, to pa omogoča, da gostoto mreže lahko spreminjamo tudi kasneje, ne da bi ob tem izgubili podatke o robnih pogojih, obtežbah itd. Kasnejše spreminjanje mreže pa je zelo uporabno, saj lahko natančnost rezultatov do neke mere precej enostavno povečamo s preprostim pripisom bolj goste mreže končnih elementov.

Robni pogoji so znane vrednosti prostostnih stopenj (DOF – degrees of freedom) v posameznih vozliščih. Z določitvijo teh vrednosti v program vnašamo podatke o podpiranju modela. V vozliščih tako predpisujemo pomike v posameznih smereh ter zasuke okoli posameznih osi. V primeru računanja kompleksnih modelov bi se lahko zgodilo, da bi kljub izjemno zmogljivim računalnikom takšni izračuni trajali predolgo. V tem primeru lahko s pomočjo robnih pogojev v simetrijskih modelih modeliramo le del modela, ki ga ustrezno podpremo (pripišemo ustrezne simetrijske robne pogoje) in s tem prihranimo veliko časa. [10]

4 NUMERIČNA ANALIZA

4.1 Namen analize

Namen numerične analize je simulacija eksperimentalno dobljenih rezultatov. Eksperimentalno analizo vijčenih spojev iz armirane plastike je leta 2016 izvedel Robi Ponjavič, v okviru svojega zaključnega dela na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Sam je z eksperimentalno analizo želel določiti mejno nosilnost ter načine porušitev kompozitnih spojev (z enim vijakom), obremenjenih v nategu. Z mojo numerično analizo pa je bil namen validirati numerični model z eksperimentalnimi rezultati in jih med seboj kritično primerjati. Glavni cilj je doseči ujemanje linearnega dela pomikov v odvisnosti od sile v vijaku. Z numeričnim modelom v programskem okolju Abaqus sem želel preveriti, ali lahko na takšen način zagotovimo primerljive in predvsem merodajne rezultate, ki bi se lahko uporabili za dimenzioniranje, ne da bi pri tem obstajala potreba po eksperimentalni analizi.

4.2 Material

Material, ki je bil uporabljen v numerični analizi, se sklada z materialom, ki je bil uporabljen v eksperimentalni analizi. Gre za FRP elemente iz danskega podjetja Fiberline Composites A/S, ki so bili proizvedeni s proizvodno metodo pultruzije. Uporabljen material dosega zahteve standarda in spada v razred kvalitete E17. Računska natezna, tlačna in strižna trdnost materiala je za namene izračunov torej enaka minimalnim zahtevam razreda E17 iz standarda (preglednica 1). V preglednici 3 so podani moduli elastičnosti materiala v dveh glavnih smereh. Prva glavna smer (indeks: 0°) je smer vlečenja (pultruzije) v postopku izdelave, druga glavna smer (indeks: 90°) pa je smer pravokotno na smer vlečenja. Vse podane vrednosti veljajo za suhe pogoje, kjer se temperatura nahaja v območju med -20°C in $+60^\circ\text{C}$. [1]

Preglednica 3: Togost materiala v različnih smereh. [1]

Vrednosti različnih togosti v suhih pogojih za material E17		E17	Enota
Modul elastičnosti	E_{0°	17 000	MPa
Modul elastičnosti	E_{90°	5 000	MPa
Strižni modul	G	3 000	MPa

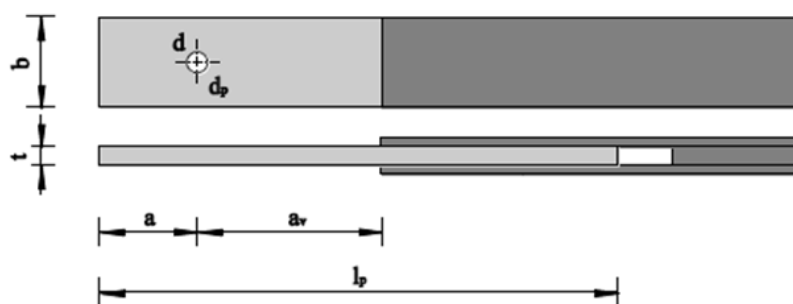
Preizkušane je sestavljen iz steklenih vlaken E-glass. Delež armaturnih vlaken je kar 72,5 %, od tega 79,4 % v smeri 0° in 8,1 % v smeri 90°, preostala vlakna pa so razporejena v drugih, ne glavnih smereh. Matrica je poliestrska, z dodatki, ki preprečujejo razvoj ognja. Površinski sloj vsebuje UV zaščito, zaščito pred korozivnim okoljem in poseben premaz kot dodatno mehansko zaščito za varovanje površine pred obrabo. V eksperimentalni analizi je bil spoj izveden s pomočjo jeklenega vijaka kvalitete 8.8 s kratkim navojem, kar pomeni, da navoj vijaka ni segal v sam FRP element (takšno izvedbo spoja zahteva tudi Fiberlinov priročnik). Vijak je bil izbran tako, da je njegova strižna nosilnost bistveno večja od nosilnosti oslabljenega prereza FRP elementa. [1], [4]

4.3 Geometrija

Geometrija preizkušancev v dejanski eksperimentalni analizi se nekoliko razlikuje od geometrije v numeričnem modelu, predvsem zaradi razlik podpiranja preizkušanca v realnosti in v računalniškem modelu (bolj podrobno je numerični model opisan v poglavju 4.4). V eksperimentalni analizi so bili uporabljeni preizkušanci z geometrijskimi podatki, ki so prikazani v preglednici 4 in na sliki 13. Testi so bili izvedeni na geometrijsko treh različnih serijah preizkušancev, vsaka serija pa je imela po štiri preizkušance (z namenom zmanjšanja možnih napak pri testiranju). Za vijachen spoj je bil uporabljen vijak M24 s premerom $d = 24$ mm. Premer luknje v laminatu je bil zaradi konstruktivnih pogojev 2 mm večji ($d_p = 26$ mm). Celotno sestavo eksperimentalnega preizkušanca lahko vidimo na sliki 14.

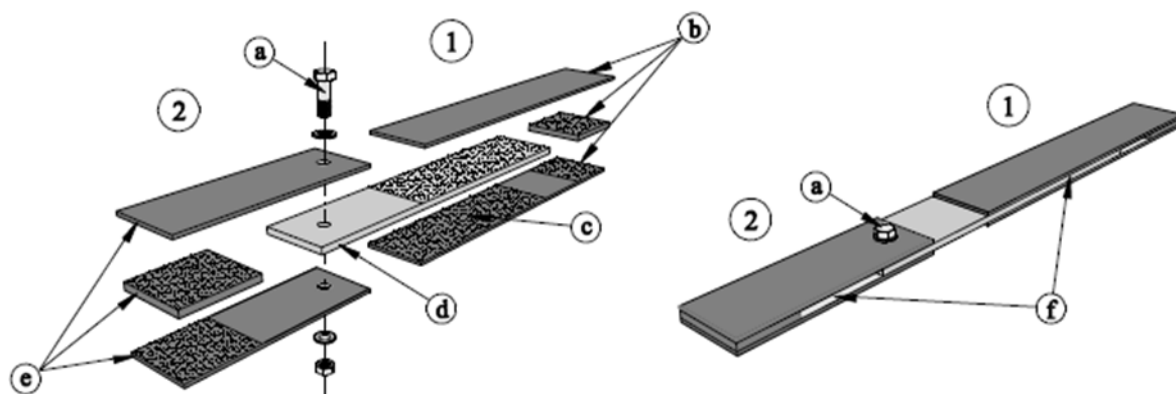
Preglednica 4: Geometrija posameznih preizkušancev v eksperimentalni analizi. [1]

Oznaka preizkušanca	Debelina	Dolžina	Širina	Razdalja od roba do središčne linije luknje	Premer vijaka	Premer luknje za vijak	Razdalja do togega vpetja
	t [mm]	l_p [mm]	b [mm]	a [mm]	d [mm]	d_p [mm]	a_v [mm]
P1	10	342	100	36	24	26	107
P2	10	391	100	84	24	26	107
P3	10	475	100	168	24	26	107



Slika 13: Skica eksperimentalne geometrije. [1]

Dimenzije preizkušancev (po dolžini) so povečane zaradi pogojev vpetja oziroma zaradi varnosti testov. Preizkušanec je bil iz obeh strani prilepljen na jeklene vilice (jeklo S235) z dvokomponentnim epoksi lepilom. Točna velikost potrebne površine je bila izračunana z bistveno nižjo sprejemno trdnostjo (6 N/mm^2 namesto 30 N/mm^2) zaradi varnosti in nepoznavanja metode vgrajevanja. Preizkušanec je bil na koncih vpet v hidravlično napravo, katera je vnašala silo na preizkušance.



Slika 14: Celoten pregled preizkušanca: a - vijak z matico in podložko, b - jeklene vilice, c - epoksi lepilo, d - preizkušanec, e - jeklene vilice, f - sestavljen preizkušanec. [1]

4.4 Numerični model

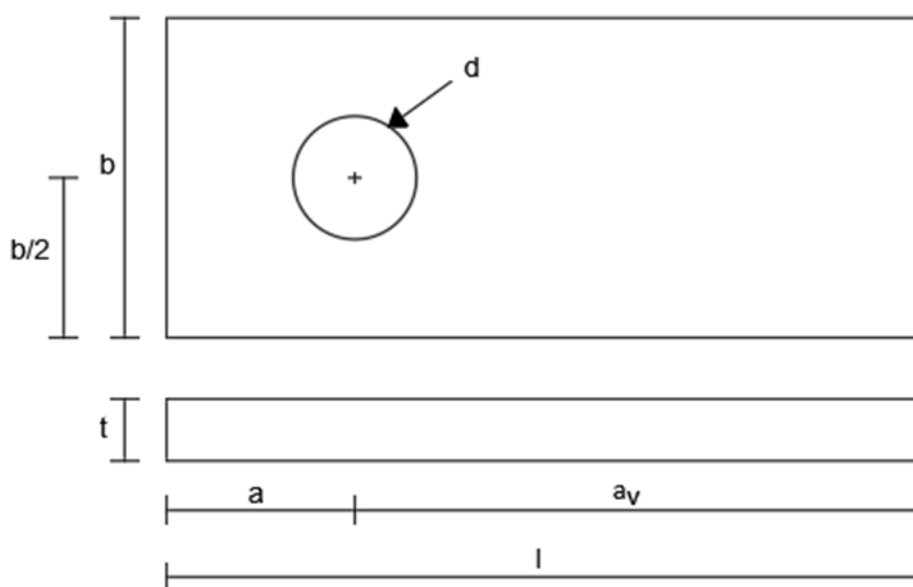
Model za numerično analizo sem izdelal s pomočjo programa Abaqus, ki omogoča preproste linearne in zelo kompleksne nelinearne analize. Zaradi nepoznavanja programa sem se odločil izdelati preprostejši model, ki pa je kljub temu dovolj dober, da vrne merodajne in eksperimentalno primerljive rezultate. Model temelji na preprosti plošči z luknjo, ki predstavlja FRP element, ter togega valja, ki predstavlja vijak. Natančneje je model opisan v nadaljevanju.

4.4.1 Geometrija modela

Kot že omenjeno, je geometrija v numeričnem modelu nekoliko drugačna od realnega modela. Dimenzije, kot so debelina, širina, razdalja od roba do središčne linije vijaka in razdalja do togega vpetja v vilice, ostajajo enake, dodatna dolžina, ki je bila v eksperimentalnem delu potrebna za zagotavljanje vpetja, pa v numeričnem modelu ni potrebna. Robne pogoje v računalniški analizi le preprosto predpišemo na predvideni razdalji od luknje oziroma na robu modela. Prav tako v numeričnem modelu niso potrebne jeklene vilice, ki bi vpenjale model. Posebnost ali pa poenostavitev v numeričnem modelu je tudi velikost luknje, ki je enaka velikosti vijaka. Če bi želeli popolnoma identično geometrijo, bi v programu Abaqus lahko izdelali tudi natančnejši model, pri katerem bi lahko upoštevali toleranco enega milimetra, a, kot že omenjeno, sem želel izdelati preprostejši model, zato tolerance enega milimetra v numeričnem modelu nisem upošteval. Vijak je predstavljen le z geometrijo valja, na katerega sem kasneje nanesele obtežbo. Vijak za vnašanje sile prav tako ne potrebuje jeklenih vilic, zaradi že zgoraj omenjenih razlogov. Vijak je v vseh primerih geometrije postavljen točno na sredino (po širini preizkušanca). Ostali geometrijski podatki preizkušancev za numerično analizo pa so predstavljeni v preglednici 5 ter na sliki 15.

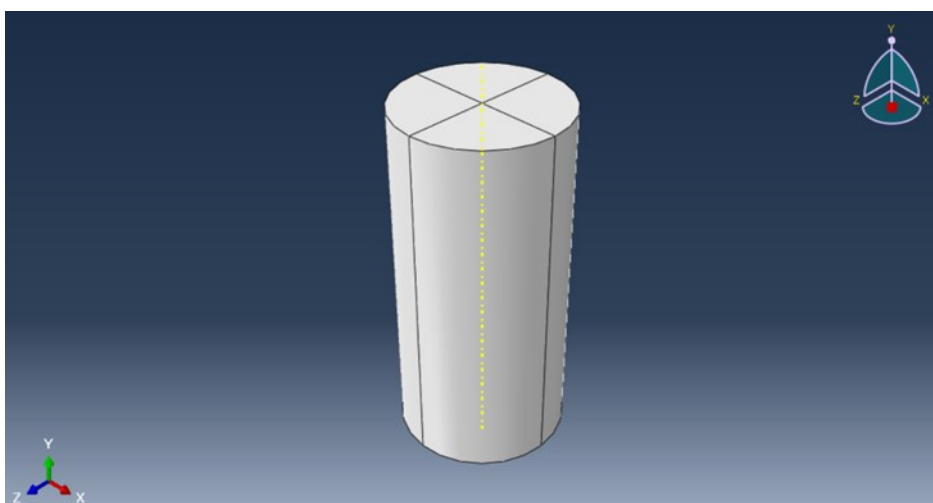
Preglednica 5: Geometrija posameznih preizkušancev v numerični analizi.

Oznaka preizkušanca	Debelina	Dolžina	Širina	Razdalja od roba do središčne linije luknje	Premer vijaka	Premer luknje za vijak	Razdalja do togega vpetja
	t [mm]	l [mm]	b [mm]	a [mm]	d [mm]	$d_p=d$ [mm]	a_v [mm]
P1	10	143	100	36	24	24	107
P2	10	191	100	84	24	24	107
P3	10	275	100	168	24	24	107

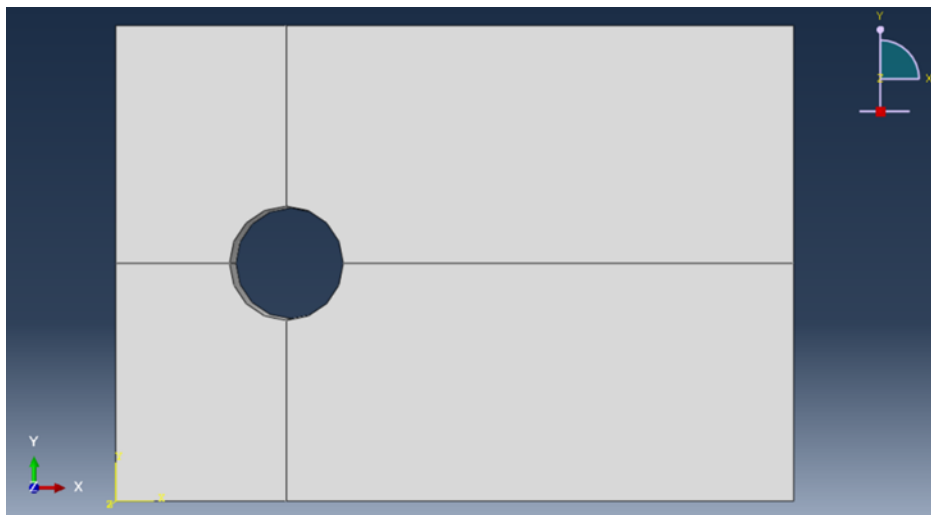


Slika 15: Skica numerične geometrije.

V programu Abaqus sem najprej definiral geometrijo posameznega modela FRP elementa (plošče). V naslednjem koraku pa sem geometrijsko izdelal še model vijaka, ki ga predstavlja preprost valj s premerom 24 mm in višino 50mm. Zaradi metode izračuna ter geometrije modela (luknje za vijak) je bilo potrebno FRP element kakor tudi vijak razdeliti na štiri posamezne dele (particije). Če tega ne bi naredili, bi v kasnejšem postopku določanja mreže končnih elementov naleteli na težave. Zaradi načina delovanja modela oziroma obtežbe sem na modelu vijaka definiral tudi referenčno točko RP-1, katere delovanje oziroma pomen je opisan kasneje. Na slikah 16 in 17 je prikazana geometrijska osnova modela.



Slika 16: Geometrijska osnova vijaka.



Slika 17: Geometrijska osnova FRP elementa (primer P1).

4.4.2 Definiranje materiala

V numerični analizi je bilo potrebno material za ploščico definirati tako, da so se lastnosti materiala iz eksperimentalne analize čim boljše ujemale z lastnostmi materiala iz numerične analize. Zaradi želje po preprostem modelu ter rezultatih, ki zajemajo le linearni del deformacij elementa, je v definiciji materiala zadoščalo le definiranje elastičnega modula, strižnega modula ter Poissonovega števila. Material sem definiral kot elastičen material s podatki iz preglednice 3. Elastični modul $E_1 = 17 \text{ GPa}$ (smer pultruzije), $E_2 = 5 \text{ MPa}$ (pravokotno na smer pultruzije) in strižni modul $G = 3000 \text{ Mpa}$. Za način vnašanja podatkov (oziroma tip elastičnega materiala) sem izbral rubriko inženirske konstante (engineering constants), kjer sem definiral zgoraj opisane podatke. Dodatno sem upošteval, da $E_2 = E_3$, Poissonovo število $= 0,3$ za vse smeri ter $G_{12} = G_{23} = G_{13} = G$. Zaradi različnih lastnosti materiala v različnih smereh (ortotropen material) je potrebno na modelu definirati tudi lokalni koordinatni sistem, na podlagi katerega programu določimo, v kateri smeri elementa upoštevati katere lastnosti. Lokalni koordinatni sistem sem definiral tako, da se ujema z globalnim koordinatnim sistemom. Če bi želel bolj natančen model, bi lahko modeliral celo posamezne sloje oziroma sestavne elemente FRP plošče ter vsakemu izmed slojev določil svoje lastnosti. Posamezne sloje bi nato sestavil skupaj ter predpisal še povezavo med njimi. Model bi lahko še dodatno nadgradil tako, da bi omogočal analizo oziroma prikaz porušnega mehanizma FRP elementa. Takšen model bi bil sicer bistveno boljši od modela, ki sem ga ustvaril in za analizo uporabil sam, a takšna kompleksnost modela presega okvire te diplomske naloge.

Modelu vijaka sem sicer predpisal lastnosti izotropnega materiala (jekla), a sem vijak kasneje definiral kot togo telo (Rigid Body). Definicija materiala za model vijaka je bila pomembna le zaradi pogojev delovanja programa in ne zaradi analize same (program analize ni želel pognati, dokler na vijaku ni bil

definiran material, čeprav je kasneje vijak definiran kot togo telo). Na vijaku sem dodatno definiral referenčno točko poimenovano RP-1, ki predstavlja celoten vijak. S pomočjo te točke sem lahko na vijak podal obtežbo in podpiranje ter v tej isti točki kasneje tudi odčital pomike vijaka.

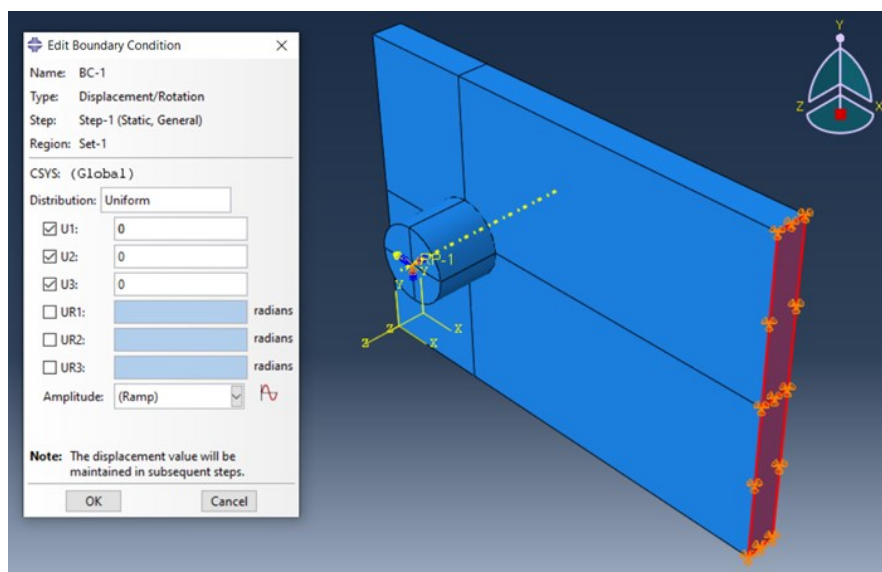
4.4.3 Definiranje kontaktov

Za razliko od eksperimentalne analize je v numerični obravnavi potrebno kontakte med posameznimi ploskvami točno definirati. Definirati je bilo potrebno kontakt med vijakom in med notranjo ploskvijo luknje za vijak. Program omogoča, da kontaktu predpišemo različne lastnosti, npr. lastnosti o trenju med ploskvami, dovoljene zdrse med ploskvami itd. V numerični analizi sem kontakt definiral z vsemi privzetimi vrednostmi programa (kontakt: Surface to surface), torej brez posebnega definiranja lastnosti posameznih površin. Na tak način sem izdelavo modela precej poenostavil.

Kontakti v programu Abaqus delujejo na podlagi algoritma, ki poišče »sosednja« vozlišča na površinah, za katere določimo, da so oziroma bodo v kontaktu ter izračuna razdalje in odnose med njimi. Uporabljen tip kontakta »Surface to surface«, s pomočjo omenjenega algoritma na površini določi vozlišča, ki so najbolj primerna za definiranje stične površine posameznih končnih elementov. Kot že samo ime pove, omenjen tip kontakta združuje posamezne ploskve in ne vozlišča. Prednost tega kontakta so zmanjšane možnosti za velike lokalne penetracije vijaka v preizkušane ter natančnejši izračun napetosti tudi v primeru, ko mreži končnih elementov na dveh stičnih površinah nista enaki. [11]

4.4.4 Robni pogoji in obtežba

Kot že omenjeno, je v numeričnem modelu zelo pomembno, kje in kako predpišemo robne pogoje in obtežbo. Robni pogoji so definirani na robu (glej sliko 18), kjer je bilo vpetje elementa zagotovljeno tudi v eksperimentalni analizi. Na robni ploskvi sem definiral robne pogoje, ki omejujejo pomike v vseh treh smereh ($U_1 = U_2 = U_3 = 0$). S predpisanimi pomiki sem model ustrezno vpel. Zavedati se je potrebno, da v realnosti popolnega vpetja ni mogoče doseči, zato so takšni robni pogoji le približek realnim pogojem in predstavljajo vir napake.



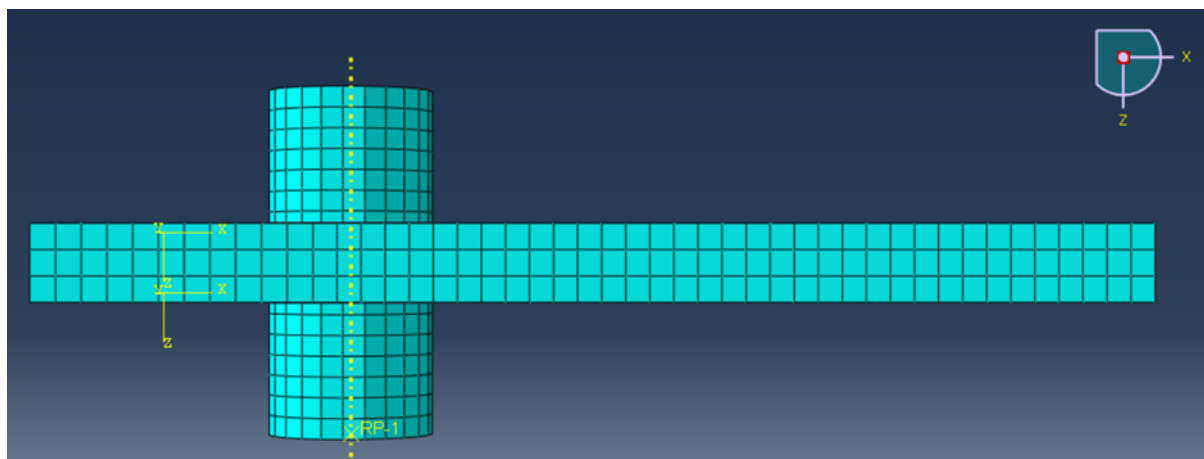
Slika 18: Določitev robnih pogojev, potrebnih za vpetje FRP elementa (primer P1).

Poleg omenjenih robnih pogojev je bilo zaradi načina delovanja modela oziroma obtežbe potrebno predpisati tudi robne pogoje v referenčni točki RP-1. Robni pogoji v referenčni točki dovoljujejo pomike le v smeri delovanja obtežbe, vsi ostali pomiki in zasuki pa so preprečeni ($U1 \neq 0$, $U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$).

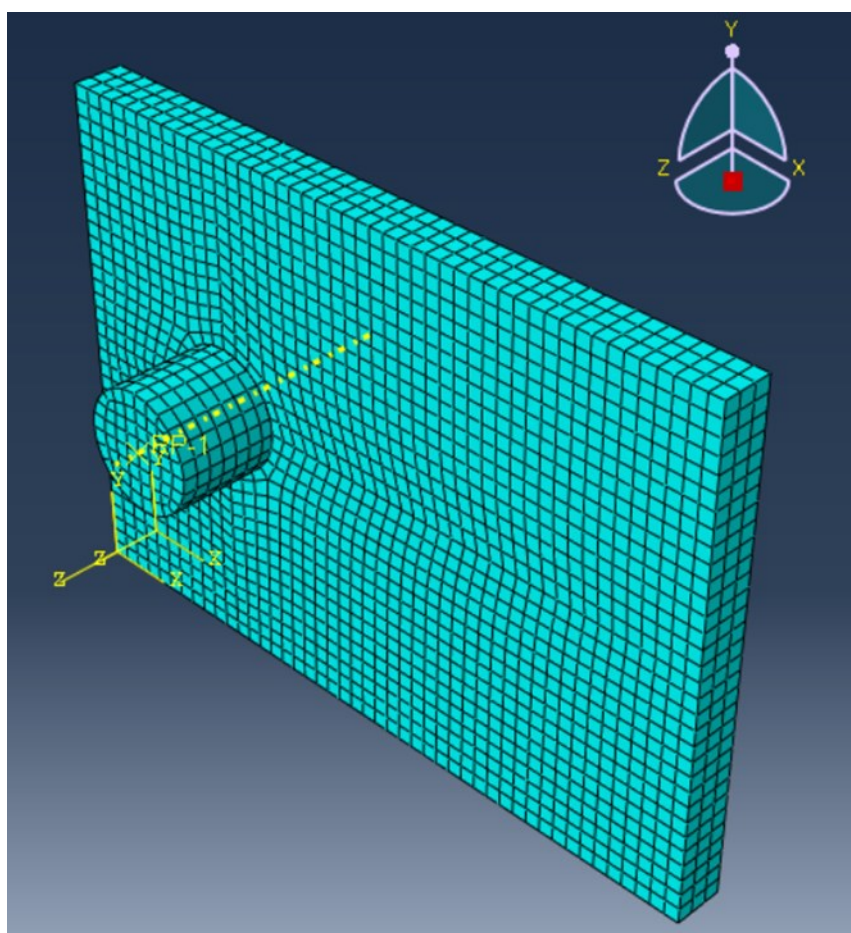
Obtežbo sem predpisal v referenčni točki RP-,1 in sicer v smeri $-X$, globalnega koordinatnega sistema. Za določitev velikosti obtežbe sem si pomagal s podatki iz eksperimentalne analize. Pri preizkušancu P1 sem tako uporabil obtežbo 20,16 kN, pri preizkušancu P2 61,6 kN in pri preizkušancu P3 80 kN.

4.4.5 Končni elementi in potek računa

Za izvedbo analize je potrebno vsakemu elementu predpisati ustrezno mrežo končnih elementov in tudi izbrati vrsto končnega elementa, ki bo uporabljen v analizi. Na podlagi pregleda nekaterih obstoječih analiz vijčenih spojev sem izbral končni element z oznako C3D8R, ki mi ga je program ponudil tudi kot privzeti končni element (končni element C3D8R je predstavljen v preglednici 2). Ostalih parametrov glede izbire končnega elementa nisem spreminjal. Tako na vijaku kot na FRP elementu sem predpisal mrežo končnih elementov z največjo dimenzijo 3 mm, ki se je za pridobitev zelenih rezultatov po preverjanju ustreznosti gostote mreže izkazala kot primerno velika. Končen izgled numeričnega modela z vidnimi končnimi elementi je prikazan na slikah 19 in 20. Skupno sem na modelu P1 definiral 5767 končnih elementov z 8219 vozlišči (trajanje analize: 120 s), na modelu P2 8695 končnih elementov ter 13071 vozlišč (trajanje analize: 157 s) in na modelu P3 11899 končnih elementov ter 17619 vozlišč (trajanje analize: 240 s).



Slika 19: Prikaz končnega modela z vidnimi končnimi elementi v ravnini XZ (primer P1).



Slika 20: Prikaz končnega modela z vidnimi končnimi elementi v izometričnem pogledu (primer P1).

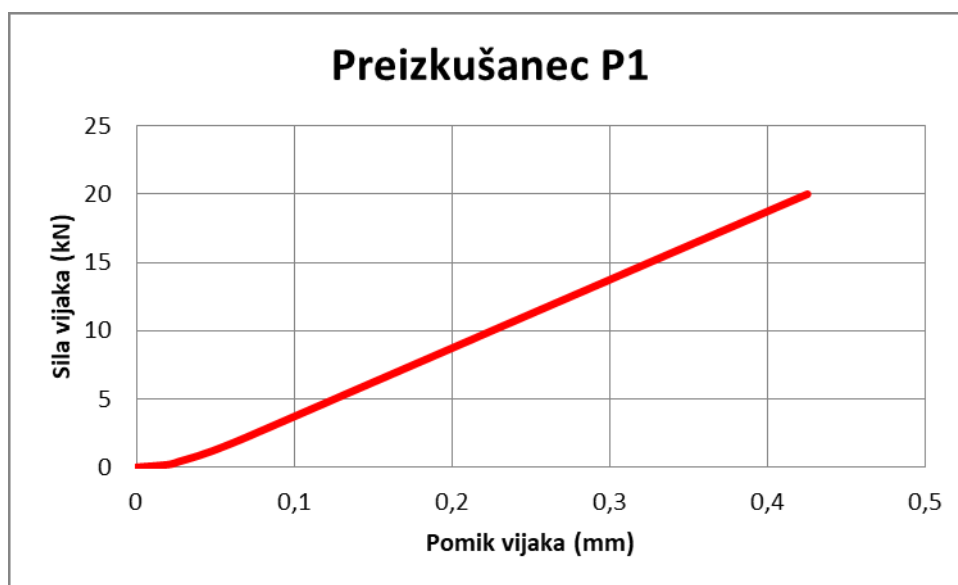
Pred zagonom analize je bilo potrebno določiti tudi ustrezno velik korak računa (inkrement). V rubriki step sem izbral fiksiran korak izračuna z maksimalnim številom korakov 100 ter velikostjo posameznega koraka 0,01 (s privzetimi vrednostmi inkrementa je program namreč javil napako).

Numerično analizo sem kontroliral s silo.

5 ANALIZA NUMERIČNIH REZULTATOV IN PRIMERJAVA Z EKSPERIMENTALNIMI REZULTATI

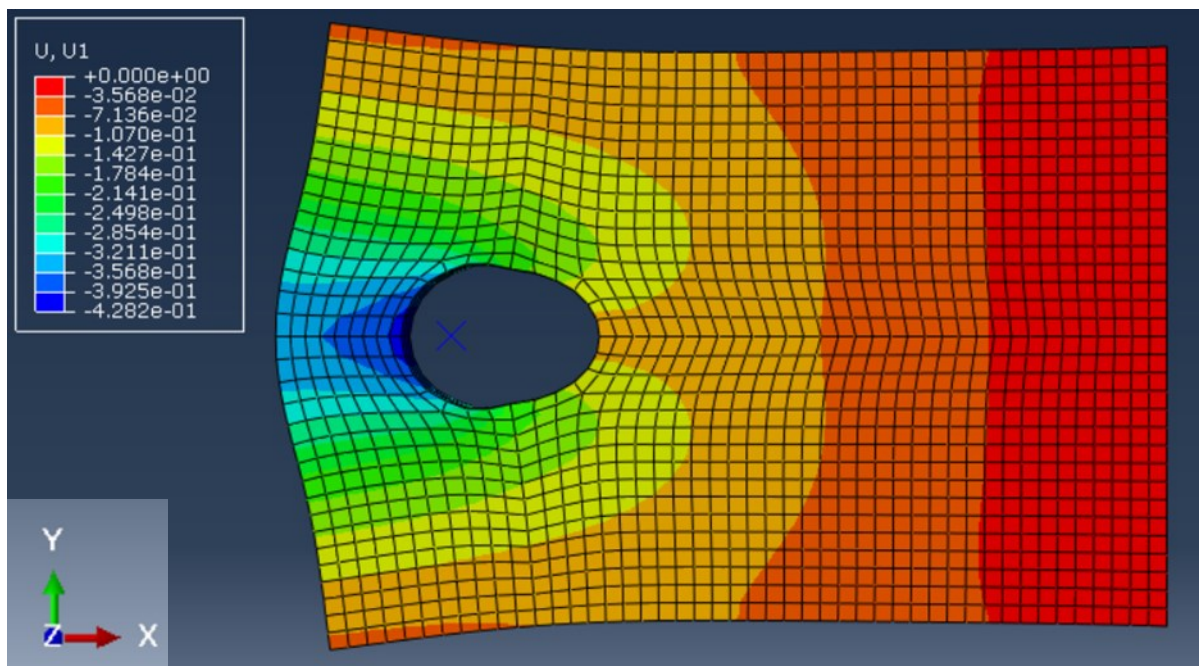
5.1 Preizkušane P1

Diagram na sliki 21 prikazuje razvoj pomikov togega vijaka v odvisnosti od sile v vijaku. Na opazovanem grafu je prikazan linearni del obnašanja materiala, ki se približno sklada z rezultati linearnega dela eksperimentalne analize. V numerični analizi sem pri sili 20,16 kN odčitaval pomik 0,43 mm, v eksperimentalni analizi pa je bil za tak primer obtežbe zabeležen pomik 0,56 mm. Do razlike v odčitkih je verjetno prišlo zaradi več različnih razlogov, eden izmed njih pa je tudi dejstvo, da se je v numerični analizi vijak »popolnoma« prilegal odprtini, kar seveda v praksi ni možno in je zato v eksperimentalnem preizkusu odprtina za vijak imela toleranco 1mm. Rezultati v posamezni seriji eksperimentalne analize so se med seboj seveda tudi nekoliko razlikovali, a v širšem pogledu so kazali enako sliko, ki je podobna numeričnim rezultatom. Na diagramu je vidno tudi »popačenje« rezultatov v prvih korakih analize, ki pa nato postopoma izgine. Razlog za »popačenje« sicer linearnega dela rezultatov verjetno izhaja iz začetnega prilagajanja vijaka na luknjo. Do povečanja togosti spoja tako pride šele, ko pride do polnega razvoja kontaktnih napetosti po celotni naležni površini. Ta del rezultatov lahko ignoriramo in upoštevamo preostali del diagrama.



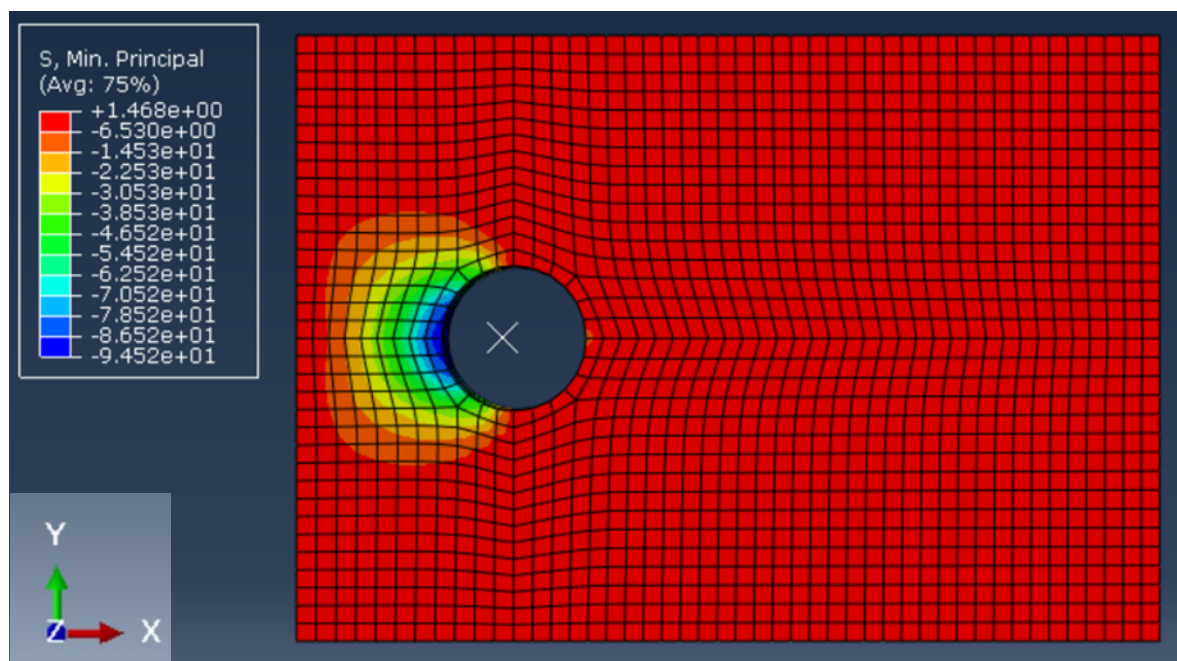
Slika 21: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušane P1.

Na sliki 22 so s konturami prikazani pomiki posameznih delov ploščice v smeri X (U1) globalnega koordinatnega sistema. Pomiki na stiku z vijakom so, kot pričakovano, največji, pomiki tik ob podporah pa so enaki 0.



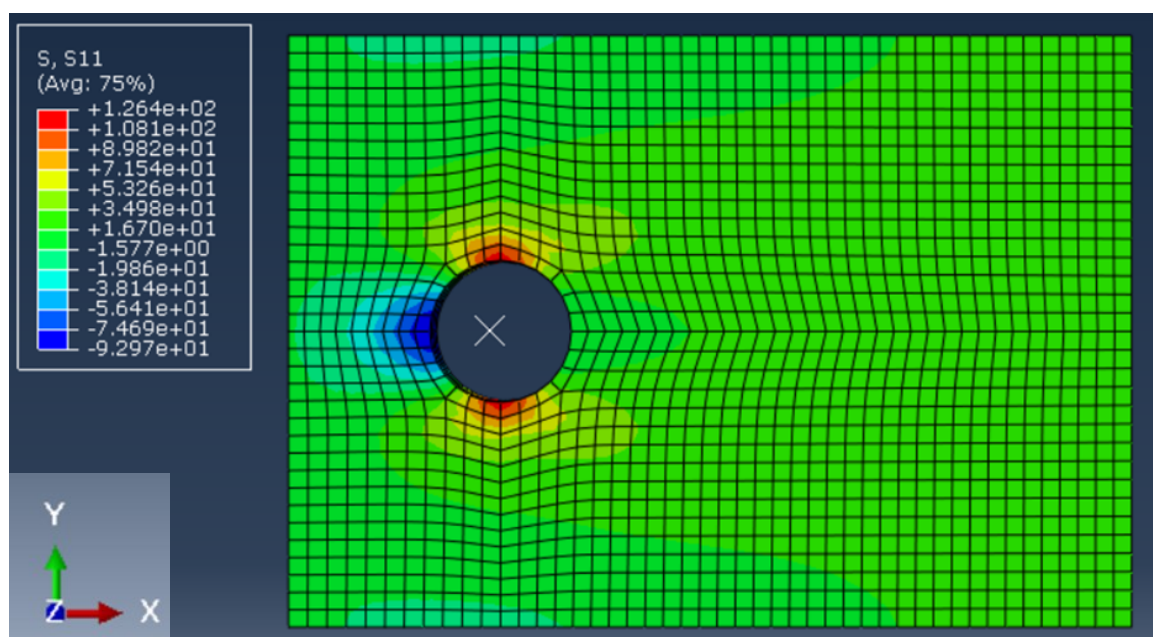
Slika 22: Pomiki ploščice P1 v smeri X (enota: mm)

Poenostavljen model, ki sem ga izdelal za numerično analizo, nam ne more pokazati poteka porušitve vijčenega spoja, saj v modelu ni predpisano, kdaj bo material odpovedal, oziroma v modelu niso definirani parametri mehanike loma materiala. Lahko pa s poenostavljenim modelom (linearnega obnašanja) preverimo ugotovitve, ki so bile pridobljene iz eksperimentalne analize. Do prve poškodbe je v eksperimentalni analizi prišlo z ovalizacijo luknje oziroma s tlačno porušitvijo materiala v stiku z vijakom, nato je sledila strižna porušitev elementa. Z numerično analizo lahko s pomočjo poteka napetosti preverimo nekatere ugotovitve iz eksperimentalne analize. Slika 23 prikazuje minimalne napetosti v času predvidenega prvega padca sile (po eksperimentalni analizi) in nakazuje, da se minimalne napetosti (tlačne napetosti) res pojavijo pred vijakom. Material naj bi po navedenih podatkih imel trdnost na steblo vijaka 90 MPa, v numerični analizi pa lahko vidimo, da rezultati prikazujejo podobno sliko. Napetosti pred vijakom so v tej fazi obremenitve (predviden čas prve poškodbe) namreč ravno v območju trdnosti materiala. Če na rezultate pogledamo s perspektive inženirske natančnosti, lahko rečemo, da se rezultati dobro ujemajo z eksperimentom.



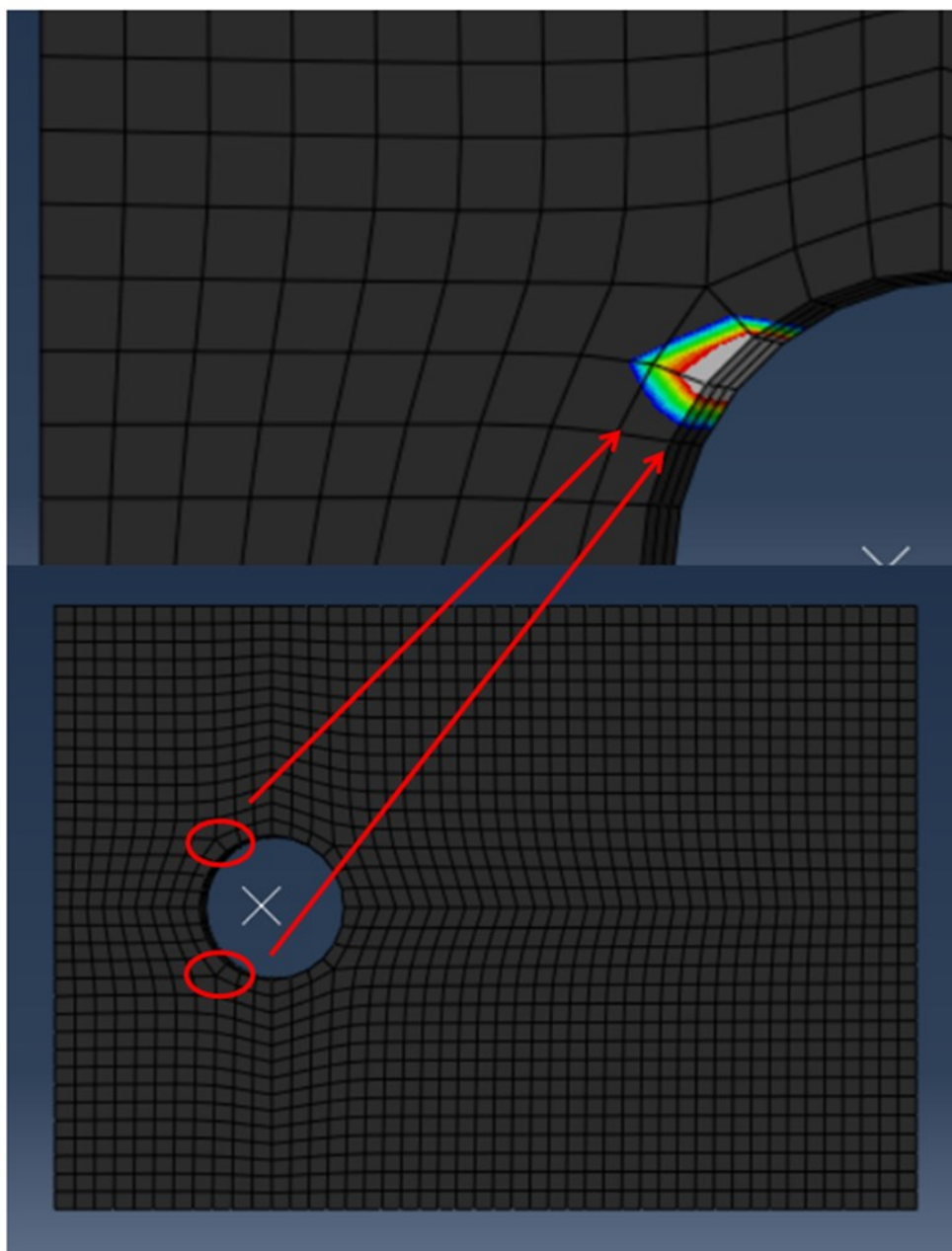
Slika 23: Potek minimalnih (tlačnih) napetosti v plošči P1 (enota: MPa).

Slika 24 prikazuje potek napetosti v smeri X (S11) globalnega koordinatnega sistema, na kateri se lepo vidijo povečane (koncentrirane) natezne napetosti ob robovih luknje za vijak. Napetosti na tej sliki delujejo v smeri, v kateri ima material 170 MPa natezne trdnosti. Kakor lahko razberemo s slike, napetosti v tej smeri niso presežene, saj znašajo le okoli 126 MPa. Na podlagi vseh pridobljenih rezultatov lahko vsekakor sklepamo, da se material ni porušil po neto prerezu ob vijaku, niti se ni porušil s cepilno porušitvijo v prečni smeri pred vijakom. Porušil se je zaradi preseženih strižnih napetosti (slika 25).



Slika 24: Potek napetosti S11 v plošči P1 (enota: MPa).

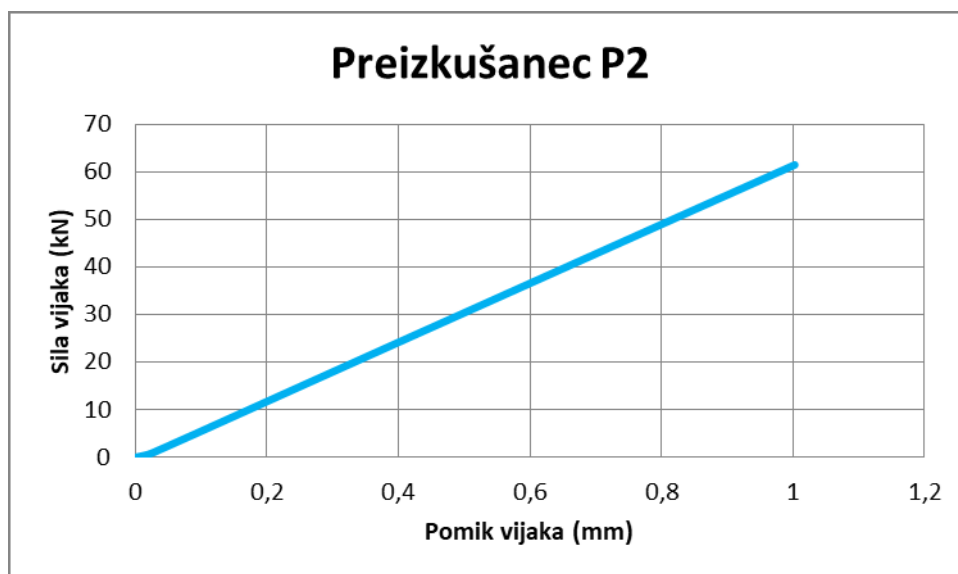
Slika 25 prikazuje zgornji levi rob luknje (na spodnjem robu luknje je situacija enaka), kjer ob sili v vijaku okoli 7 kN nastane prva majhna poškodba, ki je posledica dosežene strižne trdnosti ploščice. Zaradi poenostavljenosti modela nimamo točne slike, kako material na tej točki odpove ter kako se napetosti prenesejo na preostali del ploščice. S pomočjo eksperimentalne analize pa vemo, da se ob nadaljnjem povečevanju sile poškodbe zaradi doseženih strižnih napetosti povečujejo do prvega večjega padca sile. Na sliki je s sivo prikazan del elementa, kjer so strižne napetosti že presežene, s črno pa del, kjer niso.



Slika 25: Strižne napetosti na levem zgornjem delu luknje za vijak.

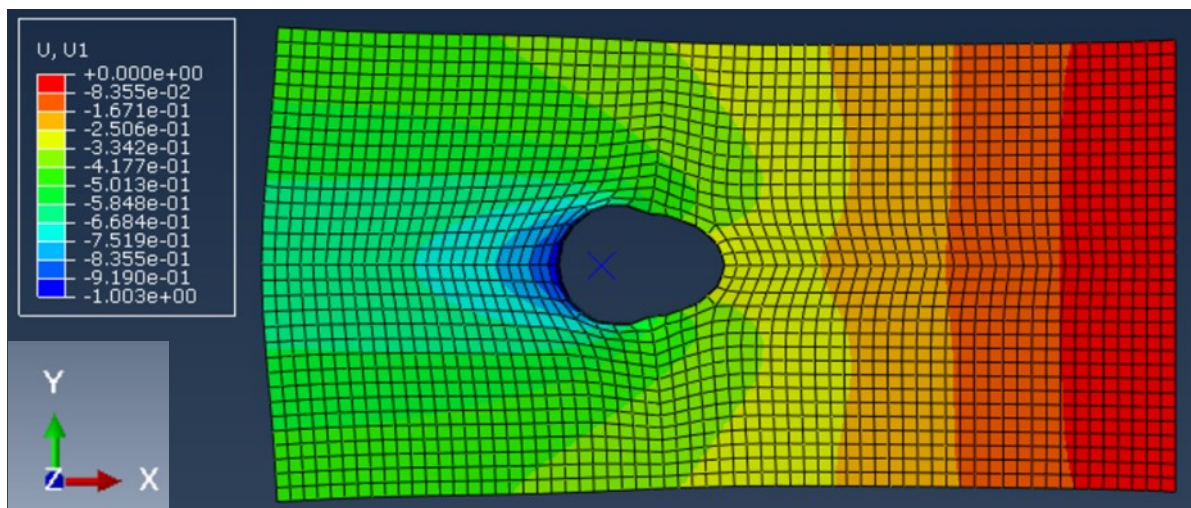
5.2 Preizkušane P2

Diagram na sliki 26 prikazuje razvoj pomikov v preizkušancu v odvisnosti od sile v vijaku. Podobno, kakor v prejšnjem primeru, tudi na tem grafu lahko opazujemo le linearni del obnašanja materiala. Pri sili 61,6 kN (ki je bila dosežena tik pred prvim padcem sile) je bil v eksperimentalni analizi zabeležen pomik vijaka 1,09 mm, v numerični analizi pa sem ob enaki sili odčital pomik 1,0 mm. Ponovno je prišlo do manjšega odstopanja rezultatov, a glede na enostavnost modela so rezultati primerljivi. Kakor že prej, je potrebno ponovno omeniti nenatančnost pri modeliranju vijaka, ki se v modelu točno prilega odprtini. Potrebno se je zavedati, da je v eksperimentalni analizi prav tako prišlo do precejšnjega raztrosa rezultatov in zato ima tudi sama primerjava rezultatov omejen pogled v dogajanje. Ponovno pa lahko trdimo, da so rezultati iz inženirskega pogleda »enaki«. Tudi v primeru preizkušanca P2 je prišlo do začetnega odstopanja sicer linearnega dela rezultatov zaradi prileganja vijaka na luknjo, kakor pri primeru P1, le da se popačenje na grafičnem prikazu bolje »skrije« zaradi večje skale na diagramu, ki prikazuje rezultate.



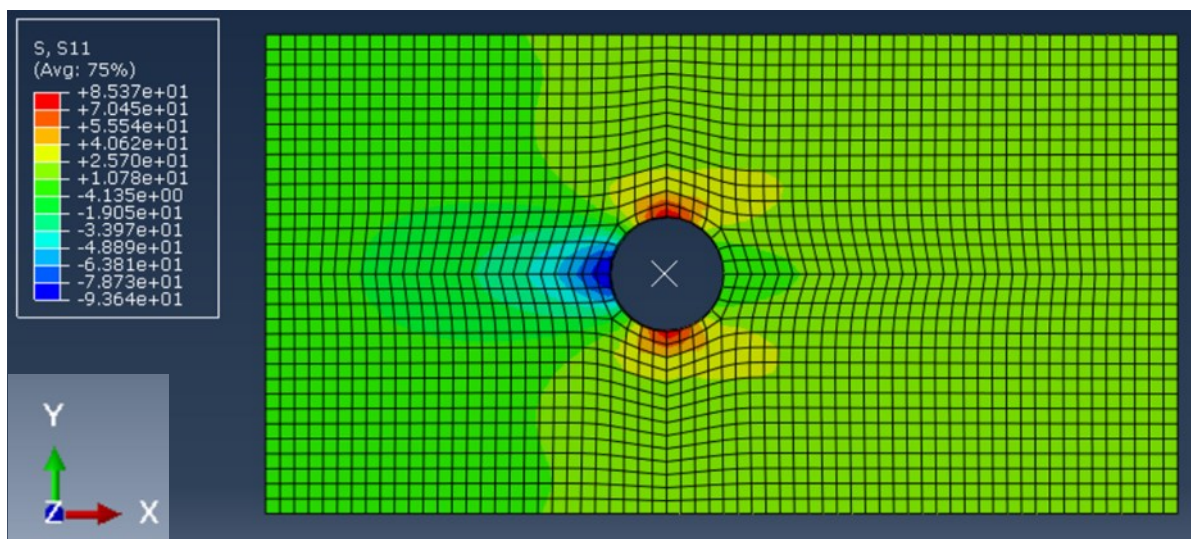
Slika 26: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušane P2.

Na sliki 27 lahko vidimo prikaz pomikov (v globalni smeri X) v času največje sile na preizkušancu. Pomiki tik ob vijaku so, kakor prikazuje slika, največji, pomiki ob podpori pa so enaki 0.



Slika 27: Pomiki ploščice P2 v smeri X (enota: mm).

Podobno, kakor prej, s poenostavljenim numeričnim modelom ne moremo prikazati poteka porušitve, lahko pa zopet opazujemo napetosti v ploščici in poskusimo potrditi in opisati ugotovitve, pridobljene z eksperimentalno analizo. Eksperiment je pokazal, da je do prve poškodbe prišlo z ovalizacijo luknje oziroma s tlačno porušitvijo materiala v stiku z vijakom, nato pa je prišlo do cepilne porušitve spoja. Na sliki 28 lahko vidimo, kako napetosti S11 na stiku s stebлом vijaka dosežejo trdnost materiala in povzročijo zgoraj omenjeno prvo poškodbo (gre za enak začetek poškodb, kakor v primeru P1, le da je pri tej sili v primeru P1 že prišlo do prvega večjega padca sile). V primeru P2 enaka obtežba (okoli 20 kN) ne povzroči večjega padca sile, ampak le deformacijo luknje.

Slika 28: Potek napetosti S11 v ploščici P2 pri sili ≈ 20 kN (enota: MPa).

S, S22
(Avg: 75%)

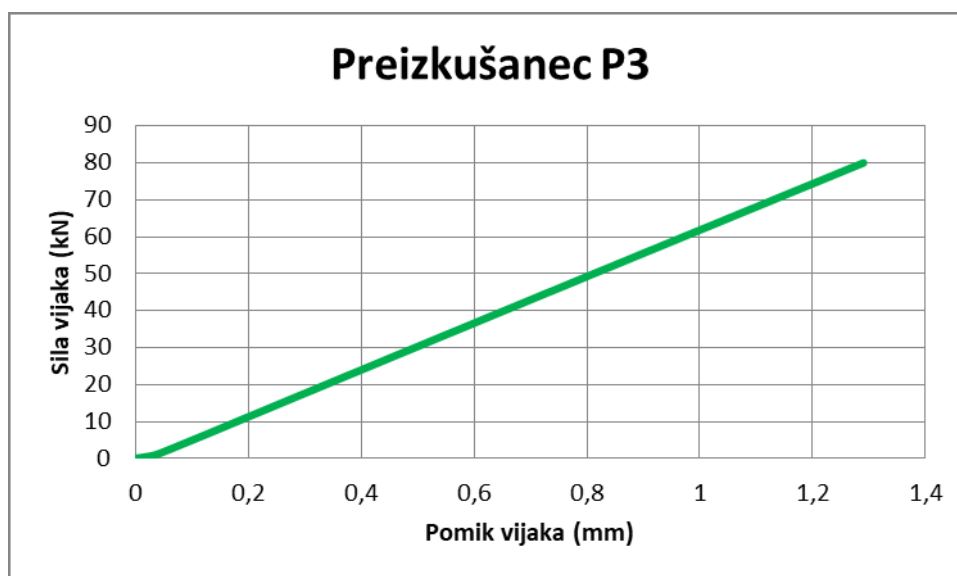
+	3.035e+01
+	2.564e+01
+	2.093e+01
+	1.621e+01
+	1.150e+01
+	6.792e+00
+	2.080e+00
-	2.631e+00
-	7.343e+00
-	1.205e+01
-	1.677e+01
-	2.148e+01
-	2.619e+01

Y
X

5.3 Preizkušanec P3

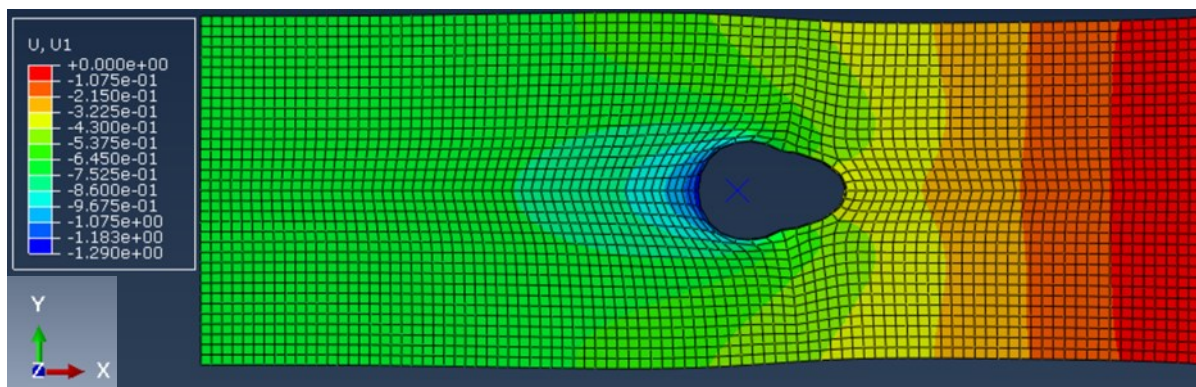
V primeru preizkušanca P3 v numerični analizi naletimo na večje težave, prav zaradi preveč poenostavljenega modela, ki ni sposoben upoštevati odpovedi materiala, ko je dosežena njegova trdnost. Zaradi te pomanjkljivosti se rezultati iz numerične in eksperimentalne analize ne skladajo popolnoma. Primerjavo med numeričnimi in eksperimentalnimi rezultati te serije preizkušancev je bilo posebej težko izvesti tudi zaradi precejšnjega raztrosa rezultatov eksperimentalne analize. Diagram na sliki 30 prikazuje razvoj pomikov v preizkušancu v odvisnosti od sile v vijaku. Podobno, kakor v primerih P1 in P2, pride do začetnega »popačenja« sicer linearnega dela rezultatov, ki pa je na diagramu zaradi skale diagrama slabo vidno. V eksperimentalni analizi pride pri sili 54,84 kN do

pomika vijaka za 1,24 mm, medtem ko numerični podatki za isto obremenitev navajajo pomik vijaka le za 0,9 mm. Del napake lahko zopet pripišemo nenatančnosti pri modeliranju vijaka, ta pa sama po sebi še ne razloži tako velikega odstopanja rezultatov. V numerični analizi sem preizkušane obremenjeval vse do sile 80 kN, saj je eden izmed preizkušancev v eksperimentalni analizi pokazal linearno obnašanje vse do tega območja obremenitve. Ostali preizkušanci pa so se linearno obnašali do precej nižjih vrednosti obremenitve, ki so se nahajale v območju 60 kN. Do večje napake pri analizi pomikov je prišlo prav zaradi majhnih poškodb v materialu pri povečanju sile in s tem prenosa napetosti na nepoškodovane dele elementa. Takšnega obnašanja pa poenostavljen model ni zmožen upoštevati.



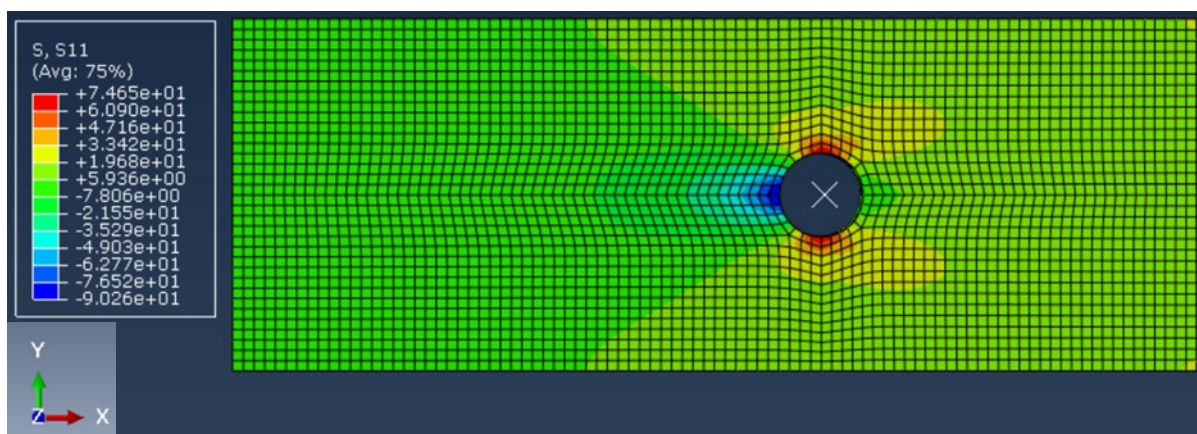
Slika 30: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušane P3.

Na sliki 31 lahko vidimo prikaz pomikov (v globalni smeri X) v času največje sile na preizkušancu (80 kN). Pomiki tik ob vijaku so, kakor prikazuje slika, največji, pomiki ob podpori pa so enaki 0.



Slika 31: Pomiki ploščice P3 v smeri X (enota: mm).

Kakor v primerih P1 in P2, tudi v tem primeru težko opišemo potek porušitve, lahko pa s pomočjo razvoja napetosti v ploščici poskušamo opisati dogajanje, ki ga je pokazala eksperimentalna analiza. Najprej naj bi prišlo do pojava ovalizacije luknje (kar relativno lahko preverimo in dokažemo), v nadaljevanju preizkusa pa naj bi sledila strižna porušitev materiala. Slika 32 prikazuje stanje napetosti ob obremenitvi okoli 20 kN, ko je dosežena tlačna trdnost na steblo vijaka. Razvoj napetosti po tej točki je, kakor v prejšnjih primerih, le še približek, saj točne razporeditve napetosti po odpovedi materiala (ki ga numerični model ne more opisati) ne poznamo. S pomočjo eksperimentalne analize lahko sklepamo, kako so se napetosti razvijale v naslednjih korakih obremenitve. Prav zaradi nezmožnosti upoštevanja prerazporeditve napetosti z večanjem obremenitve pride do večjih napak pri odčitku pomikov vijaka.



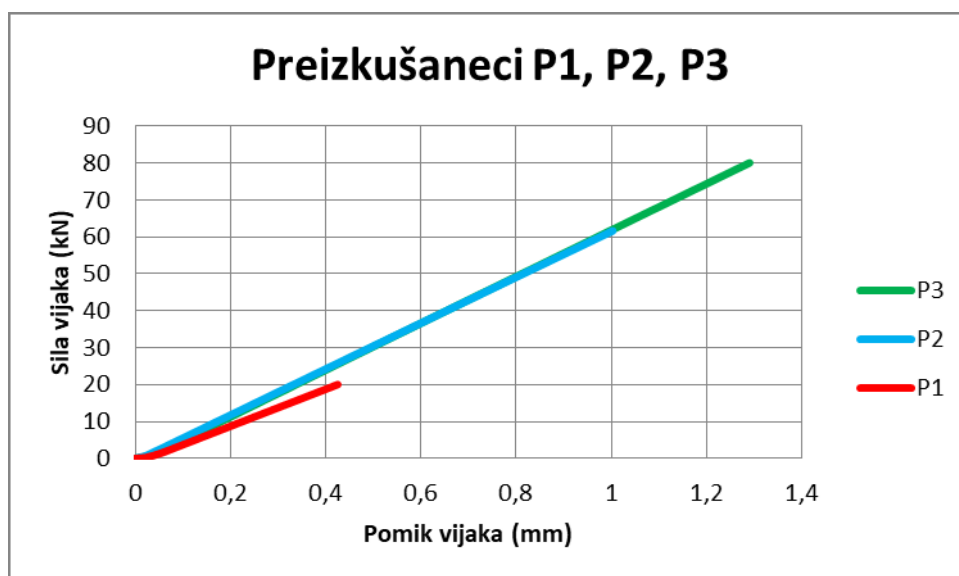
Slika 32: Potek napetosti S11 v ploščici P3 pri sili ≈ 20 kN (enota: MPa).

5.4 Primerjava rezultatov vseh preizkušancev ter kritični komentarji

Pri analizi preizkušancev se v posameznih primerih pokažejo pomanjkljivosti numeričnega modela, ki ni zmožen prerazporediti obtežbe na dele spoja, kjer trdnost še ni bila presežena. Analiza je tako »merodajna« le do točke, ko je dosežena napetost, ki doseže prvo trdnost materiala v katerikoli smeri, žal pa so nekatere trdnosti dosežene že v zgodnjih fazah obremenjevanja. V primeru takšnega numeričnega modela je eksperimentalna analiza nujno potrebna, saj bi bila razlaga numeričnih rezultatov sicer precej negotova, oziroma bi omogočila le opis dogajanja v zgodnjih fazah obremenjevanja.

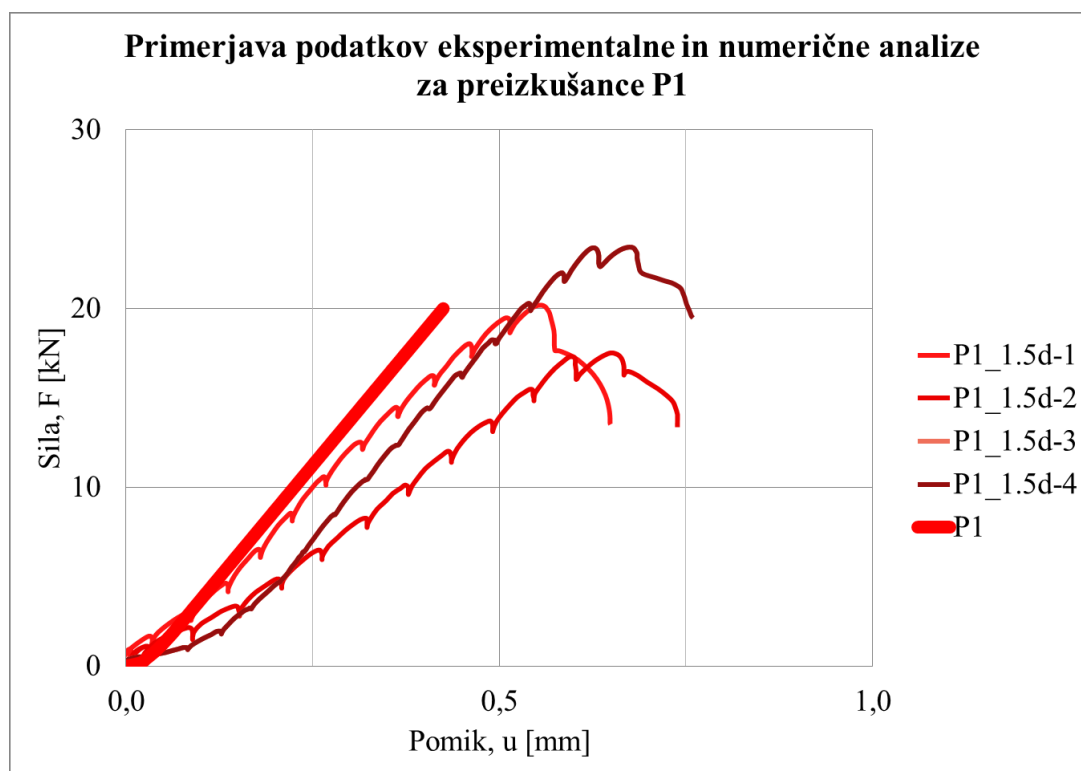
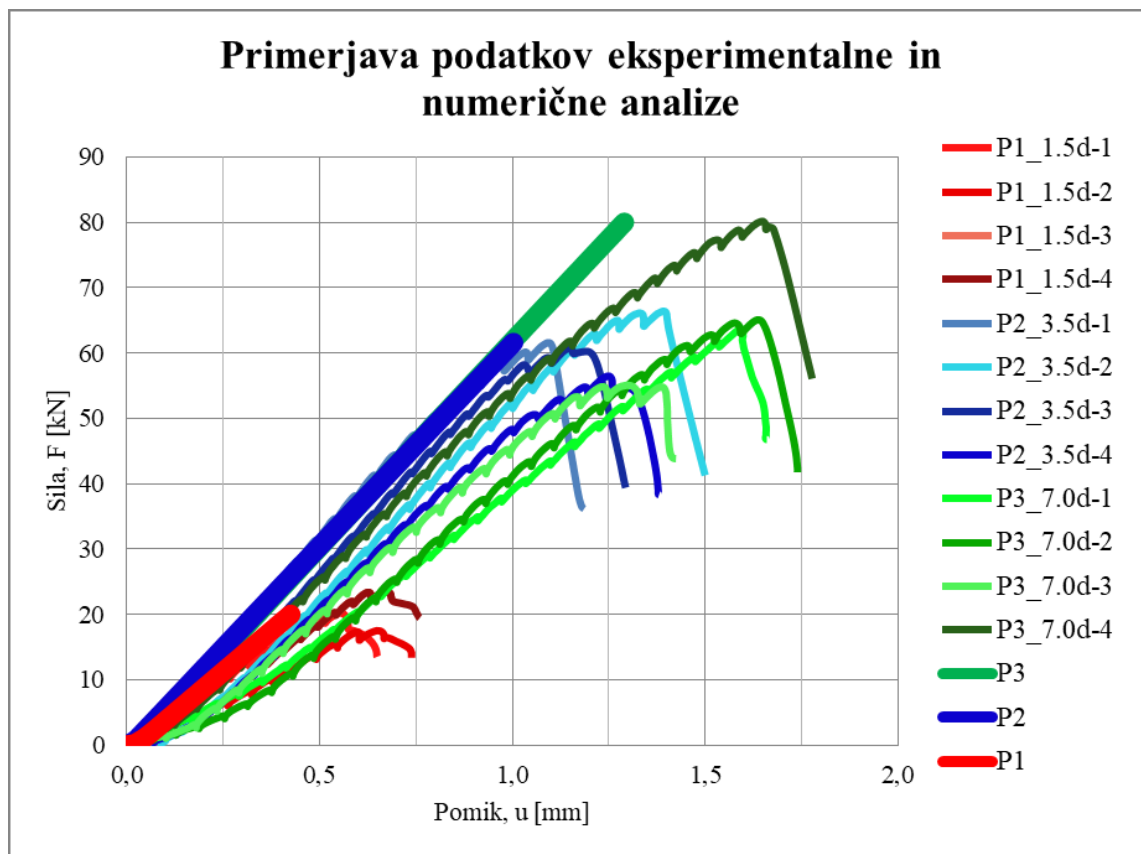
Na sliki 33 lahko vidimo obnašanje vseh treh preizkušancev. S slike lahko razberemo, da sta preizkušanca P2 in P3 nekoliko bolj toga kot preizkušanec P1. Preizkušanca P2 in P3 dosežeta tudi večjo končno nosilnost, kar je z inženirskim razmislekom lahko ugotoviti, a s poenostavljenim modelom bi takšno izjavo težje podprli. Opazimo lahko tudi, da je obnašanje preizkušancev P2 in P3

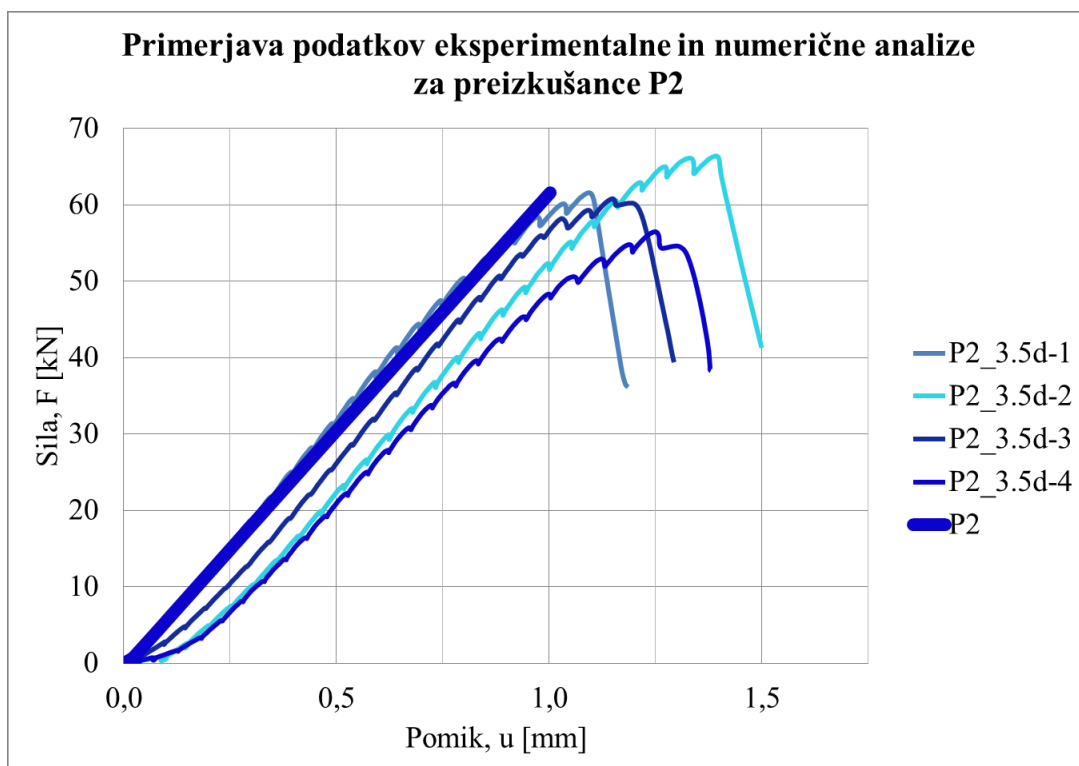
zelo podobno, zavedati pa se je potrebno napak, ki so opisane v točki 5.3. Če bi lahko te napake upoštevali, bi do nekoliko večjih razlik prišlo tudi med preizkušancema P2 in P3. Za praktično uporabo bi bila vrsta preizkušancev P2 in P3 veliko bolj primerna, saj do prvega večjega padca sile (oziroma kasneje porušitve same) pride pri bistveno večjih pomikih, ki bi nas na »nevarno« dogajanje v spoju opozorili. Ta trditev je izjemno lepo prikazana na grafu eksperimentalnih rezultatov, s pomočjo katerega je takšno izjavo možno podati takoj po hitrem pregledu rezultatov. S pomočjo poenostavljene numerične analize pa bi za potrditev takšne izjave potrebovali veliko več časa in razmisleka. Glavni problem dotičnega numeričnega modela je predvsem neupoštevanje mehanike loma in nosilnosti materiala v posameznih smereh.



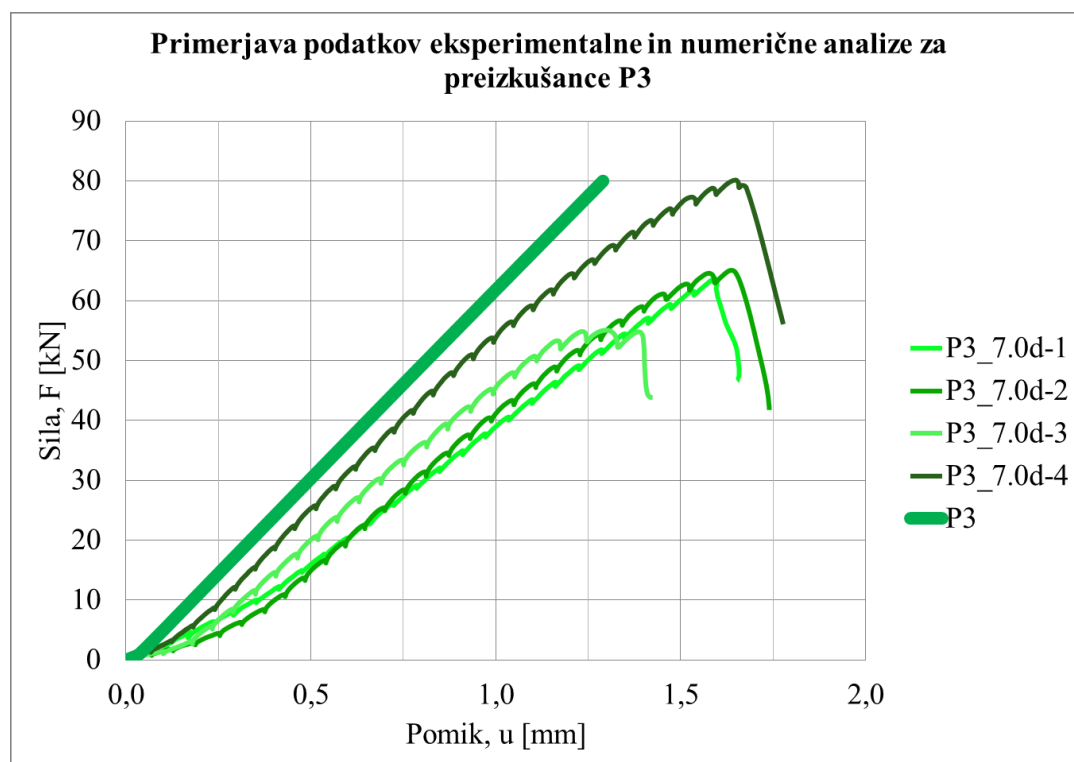
Slika 33: Diagram pomika vijaka in sile v vijaku za preizkušance P1, P2, P3.

Kljub enostavnemu modelu pa lahko v primerjavi z rezultati eksperimentalne analize (slike 34–37) ugotovimo, da rezultati v grobem kljub vsemu kažejo relativno podobno sliko. Rezultati eksperimentalne analize so sicer sami po sebi bolj točni, a zaradi raztrosa rezultatov ter možnih potencialnih napak pri izvedbi testov kljub temu rezultati, ki jih moramo jemati kritično. Bolj kompleksen numerični model lahko ponudi boljšo sliko ter vpogled v dogajanje. Žal je takšen model z upoštevanjem vseh možnih spremenljivk relativno težko izdelati. Izbrati bi bilo potrebno tudi druge končne elemente (takšne, ki se lahko pretrgajo), oziroma je za takšen model potrebno imeti več informacij o materialu, ki ga modeliramo (odvisnost napetost – deformacija v elastičnem in plastičnem stanju ter v fazi mehčanja materiala) ter več znanja s področja numeričnega modeliranja.





Slika 36: Diagram pomika in sile za preizkušance P2 v eksperimentalni in numerični analizi.



Slika 37: Diagram pomika in sile za preizkušance P3 v eksperimentalni in numerični analizi.

6 ZAKLJUČEK

Z združevanjem materialov z različnimi mehanskimi in kemičnimi lastnostmi tvorimo nove materiale, kompozite. Združevanje različnih materialov nam omogoča, da iz vsakega posameznega materiala izkoristimo njegove najboljše lastnosti in jih združimo v nov material, ki pa je za podan problem bolj primeren od vseh ostalih materialov. Prednosti kompozitov, natančneje armirane plastike, se kažejo predvsem v visoki trdnosti v kombinaciji z majhno prostorninsko težo, poleg tega pa je armirana plastika izjemno obstojna in odporna na agresivna okolja. V glavnem pri sestavi armirane plastike govorimo o dveh osnovnih sestavnih elementih, in sicer armaturi ter matrici. Armatura je glavni element, ki poskrbi za prevzem obtežbe, matrica pa poskrbi za povezavo armaturnih vlaken in njihovo pravilno geometrijsko umestitev. V primeru gradbeništva so zaradi svoje cene za armaturo večinoma uporabljena E-steklena vlakna. Kot proizvodna metoda za uporabo armirane plastike v gradbeništvu pa je daleč najbolj razširjen proces pultruzije. Proces omogoča zanesljivo veliko serijsko izdelavo profilov s praktično enakimi lastnostmi.

Obstoječe smernice za analizo vijačenih spojev in elementov iz armirane plastike nasploh se večinoma sklicujejo na razne priročnike, učbenike in ostalo strokovno literaturo, ki opisujejo obnašanje takšnih elementov. Najbolj priznan priročnik za analizo elementov iz armirane plastike je priročnik Eurocomp Design Code and Handbook, po njem pa so povzeti tudi številni priročniki, ki jih proizvajalci teh elementov zagotavljajo za svoje izdelke. Primer takšnega priročnika je Fiberline Design Manual danskega podjetja Fiberline. Evrokod standardi za projektiranje konstrukcij iz armirane plastike še ne obstajajo, trenutno je na voljo le standard EN 13706, ki podaja nekaj osnovnih navodil o označevanju elementov, minimalne zahteve za kvaliteto elementov ter metode za testiranje profilov, ki so bili pridobljeni z metodo pultruzije. Pri projektiranju in dokazovanju ustrezne nosilnosti elementov z ustreznimi varnostnimi faktorji je inženir prepuščen lastni presoji.

Numerične analize so zelo koristne, saj omogočajo dodaten poglobljen vpogled v dogajanje v kombinaciji z eksperimentalno analizo. Za dobro numerično analizo, ki bi lahko opisala dogajanje zelo natančno, pa je potreben izjemno kompleksen numerični model, ki nam bo izračunal iskane rezultate. Dobro je potrebno premisliti, kako definirati geometrijo, kontakte, materiale, robne pogoje, obtežbe, končne elemente in vse poenostavitve, ki so potrebne, da eksperimentalno analizo opišemo z numeričnim modelom. V izvedeni numerični analizi, ki je bila narejena v programskem okolju Abaqus, se je že v samem začetku modeliranja pokazalo dejstvo, da izdelava numeričnega modela ni preprosta. Če celoten model ni izdelan popolnoma pravilno, oziroma dokler niso ustrezno definirani vsi parametri, analize sploh ne moremo pognati.

Numerični model, izdelan v okviru te diplomske naloge, je nekoliko preveč poenostavljen za analizo nekaterih preizkušancev, v ostalih primerih pa je model deloval dobro. Do odstopanja med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati je prišlo zaradi poenostavitve geometrije vijaka, zaradi definirane popolne vpetosti, ki v realnosti ni mogoča, zaradi dejstva, da preizkušanci v realnosti niso bili popolnoma identični in je do odstopanja prišlo že med eksperimentalno analizo samo. Največja pomanjkljivost modela pa je definicija materiala na nivoju elastičnosti, ki je tudi glavni razlog za večje odstopanje rezultatov (v nekaterih primerih). V primerih preizkušancev, pri katerih sta bili obremenitev in deformacija večji, oziroma je bil odmik vijaka od roba preizkušanca velik, je prišlo do večjega odstopanja rezultatov. V primeru preizkušancev z manjšo robno razdaljo pa je numerični model podal rezultate, ki so bili v inženirskem smislu popolnoma skladni z linearnim delom rezultatov eksperimentalne analize. Glavna pomanjkljivost poenostavljenega modela je nezmožnost upoštevanja trdnosti materiala in mehanike loma. Material bi moral biti definiran tako, da bi v točki, ko doseže svojo trdnost, na tem mestu tudi odpovedal, sile oziroma napetosti pa bi se s tega dela prenesle na drug del elementa, v katerem trdnosti materiala še niso dosežene. Takšen model bi zahteval drugačno definicijo materiala ter drugačno izbiro končnih elementov, ki se lahko pretrgajo. V splošnem bi bilo potrebno tudi boljše razumevanje in poznavanje programa oziroma procesa numeričnega modeliranja mehanike loma, kar pa presega okvire te diplomske naloge.

Armirana plastika je izjemen material, ki je na nekaterih drugih področjih že zelo dobro uveljavljen. Kljub temu pa se zaradi pomanjkljivega znanja in razumevanja delovanja materiala, v gradbeništvu večinoma uporablja zgolj v specializiranih primerih. Negotovost oziroma nezaupanje v material le še dodatno podkrepi dejstvo, da standardi za projektiranje takšnih konstrukcij ne obstajajo. Menim, da je armirana plastika material z ogromno potenciala, ki bo v polni meri izkoriščen, ko bodo na voljo tudi standardi, ki bodo inženirju nudili podporo pri izbiri in uporabi tega materiala.

7 VIRI IN LITERATURA

7.1 Uporabljeni viri

- [1] Ponjavič, R. 2016. Eksperimentalna analiza vijačenih spojev iz armirane plastike. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Ponjavič Robi).
- [2] Wu, H. C., Davalos, J. F., Qiao, P., Shan, L. 2006. Advanced civil infrastructure materials. Advanced fiber-reinforced polymer (FRP) structural composites for use in civil engineering. Cambridge England idr., Woodhead Publishing Limited: str. 118–200.
- [3] <https://marketresearchbiz-ikwnsbmbizhvmufcjx.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/11/fiber-reinforced-polymer-composites-market.jpg> (Pridobljeno 23. 7. 2020)
- [4] Fiberline Composites A/S, Design Manual – 2nd edition, 2003: p. 0.0.03 – 1.1.04, 1.4.03 – 1.4.12.
- [5] Bank, L. C. 2006. Composites for construction. Structural Design with FRP Materials. New Jersey, Canada, John Wiley & Sons, Inc: str. 1–190.
- [6] <https://fiberline.com/> (Pridobljeno 28. 7. 2020)
- [7] <https://theconstructor.org/wp-content/uploads/2017/03/continuous-frp-systems-for-ciolumn-strengthening.jpg> (Pridobljeno 24. 7. 2020)
- [8] Clarke, J. L., idr. 1996. Structural Design of Polymer Composites. London, Taylor & Francis: str. 25–43, 147–235, 475–513.
- [9] Mandal, B., Chakrabarti, A. 2018. Numerical failure assessment of multi-bolt FRP composite joints with varying sizes and preloads of bolts. Science Direct, Composite Structures 187: str 169–178.
- [10] Barbero, E. J. 2008. Finite element analysis of composite materials. Boca Raton, West Virginia University, Taylor & Francis: 1–105.
- [11] Boulbes, J. R. 2019. Troubleshooting Finite-Element Modeling with Abaqus. France, Springer, Cham: str. 227–241.

7.2 Ostali viri

Antolinc, D., Ponjavić, R. 2016. Obnašanje preklopnih vijčnih spojev iz armirane plastike (frp) z enim vijakom. 38. Zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Ljubljana.

Tserpes, K. I., Labeas, G., Papanikos, P., Kermanidis, Th. 2002. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates. Patras, Greece, Laboratory of Technology and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras: str 521–529.

Camanho, P. P., Matthews, F. L., 1997. Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review. London, Centre for Composite Materials, Imperial College of Science, Technology and Medicine: str 529–547.

Može, P. 2018. Bearing strength at bolt holes in connections with large end distance and bolt pitch. Science Direct, Journal of Constructional Steel Research: 147: str. 132-144.