

Analiza pojačanja zidanog šiljastog luka

Cukarić, Matei

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:281826>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-27**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Matei Cukarić

ANALIZA POJAČANJA ZIDANOG ŠILJASTOG LUKA

Diplomski rad

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Sveučilišni diplomski studij
Betonske i zidane konstrukcije 1

Matei Cukarić

JMBAG: 0114029809

Analiza pojačanja zidanog šiljastog luka

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2022.

Rijeka, 16. rujna 2022.

Zavod: **Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku**
Predmet: **Betonske i zidane konstrukcije 1**
Grana: **2.05.02 nosive konstrukcije**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 14

Pristupnik: **Matei Cukarić (0114029809)**
Studij: **Građevinarstvo**
Modul: **Konstrukcije**

Zadatak: **Analiza pojačanja zidanog šiljastog luka**

Opis zadatka:

Tema rada vezana je uz pojačanja zidanih lukova. U prvom djelu rada potrebno je dati pregled metoda pojačanja zidanih lukova i bačvastih svodova što uključuje metode pojačanja na ekstradosu i/ili intradosu. Razmotriti suvremene materijale poput PAV-a (polimeri armirani vlaknima), TAM-a (tkaninom armirani mort), ali također i izradu armiranobetonske ljuste ili pak korištenje čeličnih zatega. Dati osvrt na preporuke ICOMOS-a za konstrukcije zaštićene baštine. U drugom dijelu rada potrebno je provesti eksperimentalno ispitivanje na dva drvena modela šiljastih (gotičkih) lukova jednakih raspona ali različitih radijusa. Modele opteretiti koncentriranom silom u četvrtini raspona. Ispitati modele bez pojačanja, s pojačanjem na ekstradosu, te s pojačanjem na intradosu. Kao pojačanje koristiti "duct tape", ljepljivu traku armiranu vlaknima, kojom se može simulirati PAV/TAM. Jedan od modela ispitati i na potresnom stolu. Dokumentirati i prikazati testove. Drveni modeli lukova se svakako razlikuju od zidanih lukova, ali imaju slično ponašanje: porastom opterećenja formiraju se zglobovi koji naposljetku luk pretvaraju u mehanizam. Pojasniti kako pojačanje utječe na mehanizme sloma. Osvrnuti se i na načine sidrenja. U trećem djelu rada potrebno je numerički analizirati eksperimentalno provedene testove. Kinematičkim postupkom principom virtualnog rada odrediti granično opterećenje kod koje se luk pretvara u mehanizam.

Zadatak uručen pristupniku: 16. ožujka 2022.
Rok za predaju rada: 14. rujna 2022.

Mentor:



Doc. dr. sc. Paulo Šćulac

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Matei Cukarić

U Rijeci, 19.09.2022.

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta:

„ASSESSMENT OF MASONRY ARCHES AND VAULTS“

Voditelj projekta: doc.dr.sc. Paulo Šćulac, dipl.ing.građ.

Šifra projekta: **ZIP-UNIRI-1500-3-20**

Financijer projekta: Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost: Republika Hrvatska

U Rijeci, 14. rujna 2022.

Mentor:

doc. dr. sc. Paulo Šćulac, dipl. ing. građ.

Naslov: Analiza pojačanja zidanog šiljastog luka

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je pojačanje zidanih lukova i svodova. Pojačanje postojećih zidanih građevina tema je koja se istražuje diljem svijeta s ciljem produženja uporabnog vijeka i očuvanja povijesnih građevina i spomenika. Današnje teme istraživača baziraju se na istraživanjima metoda koje koriste čelična, karbonska ili staklena vlakna u sustavu PAV (polimeri armirani vlaknima) i TAM (tkaninom armirani mort), te pojačanja čeličnim zategama ili drugim vlaknastim materijalima koji se mogu koristiti kao pojačanje zidanih lukova.

U uvodu ovog rada dan je kratki pregled i usporedba učinkovitosti različitih tehnika pojačanja lučnih i svođenih konstrukcija. Zatim je prikazano eksperimentalno istraživanje provedeno na umanjenim drvenim modelima šiljastih lukova. Provedena su ispitivanja na modelima bez pojačanja te s pojačanjem na ekstradosu ili intradosu luka, opterećenim koncentriranom silom u četvrtini raspona. Pokazano je kako se mehanizmi sloma modela pojačanih na ekstradosu ili intradosu razlikuju od modela bez pojačanja. Uz to, provedena su i ispitivanja na potresnom stolu, te nagibni test kao pojednostavljena zamjena za dinamičko ispitivanje. Naposljetku je provedena i numerička analiza, gdje je principom virtualnog rada određena granična vrijednost sile pri kojoj se luk pretvara u labilni mehanizam.

KLJUČNE RIJEČI

Zidane konstrukcije, šiljasti luk, pojačanje lukova, kompoziti, eksperimentalni model, ispitivanje na potresnom stolu, mehanizmi sloma

Title: Strengthening of a pointed masonry arch

ABSTRACT

This final year project deals with strengthening of masonry arches and vaults. Strengthening of existing masonry buildings is a topic that is being researched all over the world with the aim of extending the design working life and preserving historical buildings and monuments. At present, researches are mostly dealing with methods that use steel, carbon or glass fibers in FRP (fiber-reinforced polymers) and TRM (textile-reinforced mortar) systems, as well as steel ties or other fibrous materials that can be used as strengthening material for masonry arches.

First, a brief overview of various techniques for strengthening of arches and vaulted structures and a comparison of their effectiveness is given. It is then followed by an experimental research conducted on scaled pointed arch models made of timber. Tests were carried out on unreinforced models and on models with reinforcement at the extrados or at the intrados of the arch, loaded with a pointed force at quarter span. It is shown that the collapse mechanisms of models reinforced at the extrados or at the intrados differ from models without reinforcement. In addition, shaking table tests were also conducted as well as tilt tests, as a simplified replacement method for dynamic testing. Finally, a numerical analysis was carried out, where using the principle of virtual work the limit value of the loading at which the arch turns into a mechanism was determined.

KEY WORDS

masonry structures, pointed arch, strengthening of arches, composite materials, experimental model, shaking table test, collapse mechanisms

SADRŽAJ

1.	Uvod	1
1.1.	Općenito o lukovima i svodovima.....	2
1.2.	Stabilnost konstrukcije i mehanizmi sloma.....	5
2.	Metode Pojačanja lukova i svodova	10
2.1.	Pojačanje lukova ugradnjom zatega	11
2.2.	„Armiranobetonska ljuska“ na kestradosu	12
2.3.	Pojačanja kompozitnim materijalima - općenito	14
2.3.1.	Utjecaj vrste i načina pojačanja.....	17
2.3.2.	Utjecaj materijala kompozita.....	18
2.3.3.	Utjecaj pozicije pojačanja.....	18
2.4.	Metoda pojačanja PAV-om („polimeri armirani vlaknima“)	20
2.5.	Metoda pojačanja TAM-om („tkaninom armirani mort“).....	24
2.5.	Pojačanje luka ugradnjom čelične zatega uzduž ekstradosa ili intradosa (Reinforced Arch Method – RAM)	30
2.5.1.	Ispitivanje modela na vertikalno opterećenje	31
2.5.2.	Ispitivanje na horizontalno opterećenje.....	33
2.5.3.	Primjer implementacije RAM metode.....	35
2.6.	Osvrt na konzervatorske preporuke.....	37
2.7.	Usporedba metoda pojačanja.....	39
3.	Eksperimentalni modeli.....	40
3.1.	Ispitivanje modela bez pojačanja.....	46
3.1.1.	Ispitivanje modela M.....	46
3.1.2.	Ispitivanje modela V	50
3.1.3.	Model M opterećen koncentriranom silom na polovini raspona	52
3.2.	Ispitivanje modela s pojačanjem na ekstradosu.....	55
3.2.1.	Ispitivanje modela M s pojačanjem na ekstradosu	55
3.2.2.	Ispitivanje modela V s pojačanjem na ekstradosu.....	60
3.3.	Ispitivanje modela s pojačanjem na intradosu.....	62
3.3.1.	Ispitivanje modela M s pojačanjem na intradosu	62
3.3.2.	Ispitivanje modela V s pojačanjem na intradosu.....	66
3.3.3.	Model M pojačan na intradosu sa dodatnim sidrenjem.....	68
3.4.	Ispitivanje modela na potresnom stolu	71
3.4.1	Ispitivanje modela M bez pojačanja	71
3.4.2.	Ispitivanje modela M pojačanog na ekstradosu.....	74

3.4.3. Ispitivanje modela M pojačanog na intradosu.....	76
3.5. Nagibni test	79
4. Numerička analiza modela luka kinematičkim postupkom.....	81
4.1. Osnove proračuna TAM pojačanja.....	81
4.2. Proračun modela bez pojačanja.....	84
4.2.1. Proračun modela M	85
4.2.2. Proračun modela V	89
4.3. Proračun modela s pojačanjem na ekstradosu ili intradosu.....	91
4.3.1. Proračun modela M pojačanog na ekstradosu	92
4.3.2. Proračun modela V pojačanog na ekstradosu.....	95
4.3.3. Proračun modela M pojačanog na intradosu	98
4.3.4. Proračun modela V pojačanog na intradosu.....	101
4.4. Proračun modela na potres	104
4.4.1. Proračun modela M bez pojačanja	106
4.5. Usporedba rezultata.....	108
5. Zaključak.....	110
6. Literatura	113

Popis tablica:

Tablica 1. Vrste kompozitnih materijala sa komponentima [5]

Tablica 2. Vrste sloma lukova pojačanih kompozitnim materijalima [5]

Tablica 3. Rezultati ispitivanja [7]

Tablica 4. Usporedba različitih metoda pojačanja

Tablica 5. Modeli korišteni za statička ispitivanja

Tablica 6. Modeli korišteni za ispitivanje na potresnom stolu

Tablica 7. Prikaz rezultata ispitivanja na potresnom stolu

Tablica 8. Prikaz proračun virtualnog rada nepojačanog modela M01

Tablica 9. Prikaz rezultata proračuna nepojačanih modela M

Tablica 10. Prikaz rezultata proračuna modela V

Tablica 11. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela ME

Tablica 12. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela ME

Tablica 13. Ukupno granično opterećenje za model ME

Tablica 14. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela VE

Tablica 15. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela VE

Tablica 16. Ukupno granično opterećenje za model VE

Tablica 17. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela MI

Tablica 18. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela MI

Tablica 19. Ukupno granično opterećenje za model MI

Tablica 20. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela VI

Tablica 21. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela VI

Tablica 22. Ukupno granično opterećenje za model VI

Tablica 23. Proračun mehanizma M01 na potres

Tablica 24. Proračun mehanizma M02 na potres

Tablica 25. Usporedba graničnog opterećenja eksperimenta i numeričke analize

Tablica 26. Usporedba graničnog ubrzanja na potresnom stolu i numeričke analize

Popis slika:

Slika 1. Prikaz lažnog luka konzolnim slaganjem blokova [1]

Slika 2. Najčešći oblici lukova [1] Slika 3. Ostale vrste lukova [1]

Slika 4. Vrste bačvastih svodova [2]

Slika 5. Različiti načini slaganja opečnih blokova: a) uzdužno na smjer svoda, b) okomito na smjer svoda, c) i d) pod kutom od 45° , e) i f) zakošenim redovima [2]

Slika 6. Potporna linija oblika poligona uslijed koncentriranih opterećenja [2]

Slika 7. a) Najmanji potisak uslijed povećanja raspona luka, b) najveći potisak uslijed smanjenja raspona luka [1]

Slika 8. Potporna linija i otvaranje zglobova za koncentrirano opterećenje [1]

Slika 9. Različite vrste mehanizama sloma [1]

Slika 10. Pojava zglobova kod šiljastog luka uslijed koncentrirane sile u tjemenu [2]

Slika 11. Pojava zglobova na lučnom mostu [7]

Slika 12. Pojava zglobova uz prikaz potporne linije [7]

Slika 13. Pojava zglobova na lučnoj konstrukciji [7]

Slika 14. Statički i kinematički teoremi teorije plastičnosti [1]

Slika 15. Metoda sa zategama [1]

Slika 16. Tehnika sa zategama na objektu Komunalne palače u Puli

Slika 17. a) Armirano betonska ljuska na ekstradosu opečnog svoda, b) preusmjeravanje naprezanja u AB ljusku, c) ispadanje blokova uslijed premještanja tlačnog naprezanja u AB ljusku [12]

Slika 18. a) Luk bez pojačanja, b) pojačanje ekstradosa, c) pojačanje intradosa, d) obostrano pojačanje [5]

Slika 19. a) Posmično klizanje, b) drobljenje materijala, c) drobljenje + klizanje [5]

Slika 20. a) Odvajanje pojačanja, b) vlačni slom pojačanja [5]

Slika 21. a) Odvajanje + drobljenje, b) posmično klizanje + odvajanje [5]

Slika 22. a) pojava vlačnih sila okomito na pojačanje u slučaju pojačanja intradosa, b) pojava tlačnih sila u slučaju pojačanja ekstradosa [12]

Slika 23. a) Pojačanje na ekstradosu, b) pojačanje na intradosu, c) pojačanje na obje strane, d) djelomično (lokalno) pojačanje naizmjenično na intradosu i ekstradosu [5]

Slika 24. PAV sustav pojačanja „MAPEWRAP“ [9]

Slika 25. Sidreni konektori [9]

Slika 26. Webertec sustav pojačanja [10]

Slika 27. Shema pojačanja bačvastog svoda

Slika 28. a) Tkanina od staklenih vlakana, b) tkanina od ugljičnih vlakana, c) tkanina od bazaltnih vlakana, d) mreža od čelične žice [15]

Slika 29. Dijagram naprezanje-deformacija vlačno opterećenog PAV uzorka [15]

Slika 30. TAM sustav „Mapei“ [9]

Slika 31. a) Poprečni presjek TAM metode pojačanja, b) tlocrt TAM metode pojačanja [11]

Slika 32. a) Sidrenje mrežice u oslonac, b) dodatno pričvršćivanje sidrenja [11]

Slika 33. Aksonometrijski prikaz pojačanja [11]

Slika 34. a) Poprečni presjek pojačanja, b) tlocrt pojačanja [11]

Slika 35. Faze ugradnje sidara [11]

Slika 36. Prijenos opterećenja RAM sustava na luk [7]

Slika 37. Modeli za ispitivanje [7]

Slika 38. Skica modela za ispitivanje [7]

Slika 39. Geometrija spljoštenog modela luka [7]

Slika 40. Graf ovisnosti sile sloma i sile prednapinjanja kablova za slučaj spljoštenog modela luka [7]

Slika 41. Stanje urušavajućeg mosta [7]

Slika 42. Planirani zahvat [7]

Slika 43. Postavljanje RAM kablova na ekstradosu luka [7]

Slika 44. Izgled obnovljenog mosta [7]

Slika 45. Geometrija lukova

Slika 46. Dimenzije blokova a) luka M te b) luka V

Slika 47. Brusni papir na gornjoj strani blokova

Slika 48. Oslonac koji omogućava rotaciju blokova

Slika 49. Izgled modela M

Slika 50. Izgled modela V

Slika 51. Uzorci trake pripremljeni za ispitivanje

Slika 52. Granično opterećenje luka i položaj tlačne linije luka M dobiven programom Arco

Slika 53. Granično opterećenje luka i položaj tlačne linije luka V dobiven programom Arco

Slika 54. Model M prije ispitivanja

Slika 55. Model M : otvaranje prvog zgloba između bloka 10 i 11

Slika 56. Model M : otvaranje drugog zgloba između bloka 12 i 13

Slika 57. Model M : otvaranje trećeg zgloba između blok 23 i oslonca

Slika 58. Model M : otvaranje četvrtog između bloka 3 i 4 (formiranje mehanizma)

Slika 59. Model M01: mehanizam sloma

Slika 60. Model M02: mehanizam sloma

Slika 61. Model M03: mehanizam sloma

Slika 62. Model V prije ispitivanja

Slika 63. Ispitivanje modela V03

Slika 64. Granična sila i položaj tlačne linije dobivene programom Arco

Slika 65. Model M prije ispitivanja koncentriranom silom u sredini raspona

Slika 66. Klizanje između blokova 11 i 12 na kraju ispitivanja

Slika 67. Pozicije otvaranja zglobova kod modela bez zaglavnog kamena

Slika 68. Pojačanje ekstradosa

Slika 69. Detalj sidrenja pojačanja na osloncu

Slika 70. Model M: izgled modela prije ispitivanja

Slika 71. Model M: otvaranje prvog zgloba između blokova 10 i 11

Slika 72. Model M: otvaranje drugog zgloba između bloka 23 i oslonca

Slika 73. Odljepljivanje pojačanja od bloka

Slika 74. Slom klizanjem i odljepljivanjem

Slika 75. Ispitivanje modela ME2

Slika 76. Model VE1 nakon sloma klizanjem i odljepljivanjem

Slika 77. Ispitivanje modela VE1

Slika 78. Model M s pojačanjem na intradosu

Slika 79. Model M : otvaranje zgloba između bloka 23 i oslonca

Slika 80. Model M : odljepljivanje pojačanja između blokova 11 i 12

Slika 81. Ispitivanje modela MI2

Slika 82. Model M nakon provedenog ispitivanja

Slika 83. Slom modela V klizanjem i odljepljivanjem

Slika 84. Ispitivanje modela VI3

Slika 85. Izgled dodatnog sidrenja na blokovima

Slika 86. Ispitivanje modela M sa dodatnim sidrenjem

Slika 87. Model M01P na potresnom stolu

Slika 88. Formirana su tri zgloba

Slika 89. Prelazak sa brijega u donji dio funkcije – početak

Slika 91. Ispitivanje modela M01P na potresnom stolu

Slika 92. Otvaranje zglobova na modelu ME1P

Slika 93. Početak odljepljivanja pojačanja

Slika 94. Odljepljivanje pojačanja i klizanje blokova neposredno pred slom modela

Slika 95. Ispitivanje modela ME1P na potresnom stolu

Slika 96. Model MI1P : pomicanje desnog oslonca i otvaranje zgloba

Slika 97. Model MI1P : harmonično otvaranje zglobova te početak klizanja i odljepljivanja

Slika 97. Slom modela MI1P

Slika 98. Ispitivanje modela MI1P na potresnom stolu

Slika 99. Izgled modela prije ispitivanja

Slika 100. Otvaranje prvog zgloba na modelu

Slika 101. Trenutak formiranja 4. zgloba i pretvaranje luka u mehanizam

Slika 102. Poprečni presjek luka sa pojačanjem [15]

Slika 103. Položaj zglobova i virtualni plan pomaka [15]

Slika 104. Prikaz korištenih oznaka u proračunu

Slika 105. Prikaz virtualnog plana pomaka za mehanizam M01

Slika 106. Prikaz mehanizma M01

Slika 107. Razmatrani mehanizmi modela M bez pojačanja

Slika 108. Prikaz mehanizma V04

Slika 109. Razmatrani mehanizmi modela V bez pojačanja

Slika 110. Prikaz grafičkog dijela proračuna modela

Slika 111. Prikaz mjerodavnog mehanizma ME7

Slika 112. Razmatrani mehanizmi modela M s pojačanjem na ekstradosu

Slika 113. Prikaz mjerodavnog mehanizma VE7

Slika 114. Razmatrani mehanizmi modela V s pojačanjem na ekstradosu

Slika 115. Prikaz mjerodavnog mehanizma MI9

Slika 116. Razmatrani mehanizmi modela M s pojačanjem na intradosu

Slika 117. Prikaz mjerodavnog mehanizma VI9

Slika 118. Razmatrani mehanizmi modela V s pojačanjem na intradosu

Slika 119. Luk uslijed potresnog opterećenja: a) blokovi i opterećenje, b) virtualni plan pomaka, c) prikaz mehanizma [1]

Slika 120. Model M01: desni mehanizam

Slika 121. Model M02: lijevi mehanizam

Popis grafova:

Graf 1. Graf ispitivanja uzoraka

Graf 2. Prikaz rezultata modela M bez pojačanja

Graf 3. Prikaz rezultata modela V

Graf 4. Prikaz rezultata nepojačanog modela M opterećenog na polovini raspona

Graf 5. Prikaz rezultata pojačanih modela na poziciji ekstradosa – model M

Graf 6. Prikaz rezultata modela V s pojačanjem na ekstradosu

Graf 7. Prikaz rezultata modela M s pojačanjem na intradosu

Graf 8. Prikaz rezultata modela V s pojačanjem na intradosu

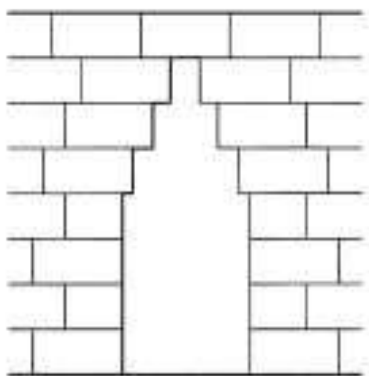
Graf 9. Rezultati ispitivanja modela M sa dodatnim sidrenjem

1. UVOD

Povijesne zidane konstrukcije, u svom vijeku korištenja pretrpjele su mnoga oštećenja. Veliki broj takvih konstrukcija još uvijek se koristi ili su donedavno bile u upotrebi no zbog oštećenja više nisu pogodne za korištenje. Uz navedeno došlo je do spoznaje za potrebom sanacije te po mogućnosti i pojačanja konstrukcija kako bi se iste mogle nesmetano koristiti a i sačuvati kao kulturno dobro. U ovom radu biti će detaljnije obrađene neke od mogućih metoda pojačanja i zidanih lučnih i svođenih konstrukcija. U radu će najprije ukratko biti prikazano što su zidane lučne i svođene konstrukcije, kako one „stoje“, kako se ponašaju prilikom nanošenja opterećenja te kako dolazi do sloma konstrukcija. Nadalje prikazati će se neke metode koje su se pokazale kao moguća rješenja za pojačanje oštećenih konstrukcija, prikazati će se njihova izrada/ ugradnja u postojeće konstrukcije, pojasniti kako utječu na povećanje nosivosti oštećene konstrukcije te neke primjere gdje su se takve metode implementirale. Na sve navedeno utječu konzervatorski uvjeti koji će ukratko biti navedeni u ovom radu ali u opsegu potrebnom za odrađivanje teme rada. Nakon navedenih metoda pojačanja i konzervatorskih uvjeta ovim radom pokušati će se dati odgovore na pitanja: kako pojačana utječu na mehanizme sloma; kakve su djelotvornosti sidrenja pojedinih metoda; te kako pojedina metoda utječe na konzervatorske uvijete. U nastavku rada prikazati će se i eksperimentalna ispitivanja provedena na umanjenim modelima lukova u kojima su modeli podvrgnuti opterećenju na četvrtini raspona luka, potresno opterećenje te nagibni test. Provedena su ispitivanja na dva drvena modela šiljastih lukova različitih radijusa. Modeli su pojačani na ekstradosu i intradosu uz pomoć duct tape trake, koja simulira pojačanje kompozitnim materijalima. Sva ispitivanja provedena su na nepojačanim i pojačanim modelima u više testova. Kao rezultati ispitivanja prikazati će se dobivene vrijednosti graničnih sila pred slom luka te dobiveni mehanizmi sloma. Dobiveni rezultati ispitivanja umanjenih modela luka naposljetku biti će uspoređeni sa numerički dobivenim rezultatima proračunatim principom virtualnog rada.

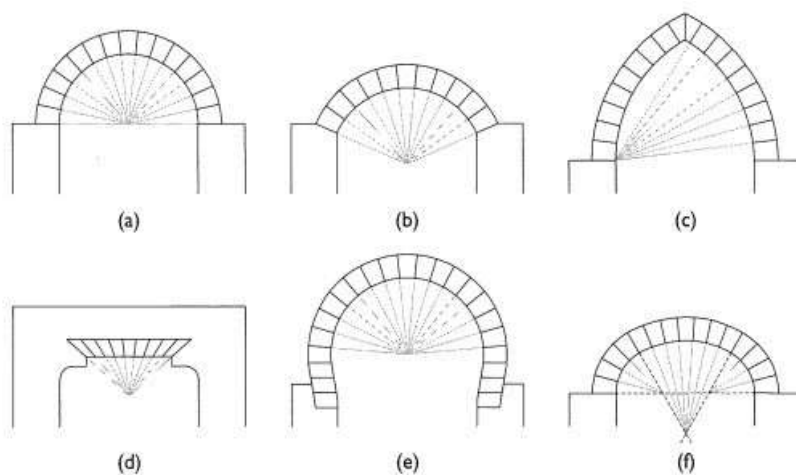
1.1. Općenito o lukovima i svodovima

Iako se sa sigurnošću ne zna podrijetlo zidanih lučnih i svodjenih konstrukcija nagađa se kako je prvobitna ideja o zidanom luku nastala iz takozvanog lažnog luka (engleski corble arch - corbeling) što znači zidanje ili postavljanje blokova konzolno na način da premostimo određeni prostor [1] (slika 1).



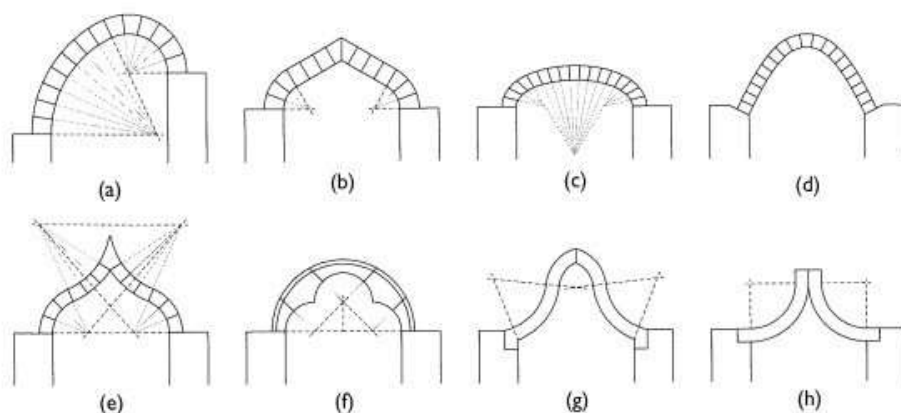
Slika 1. Prikaz lažnog luka konzolnim slaganjem blokova [1]

Na slici 2 prikazani su najčešći oblici lukova: a) rimski ili polukružni luk, b) Sirijski ili segmentni luk, c) gotički ili šiljasti luk, d) spljošteni luk, e) mavarski ili luk oblika potkove, f) trostruki luk (sastoji se od 3 luka različitih radijusa i centra)



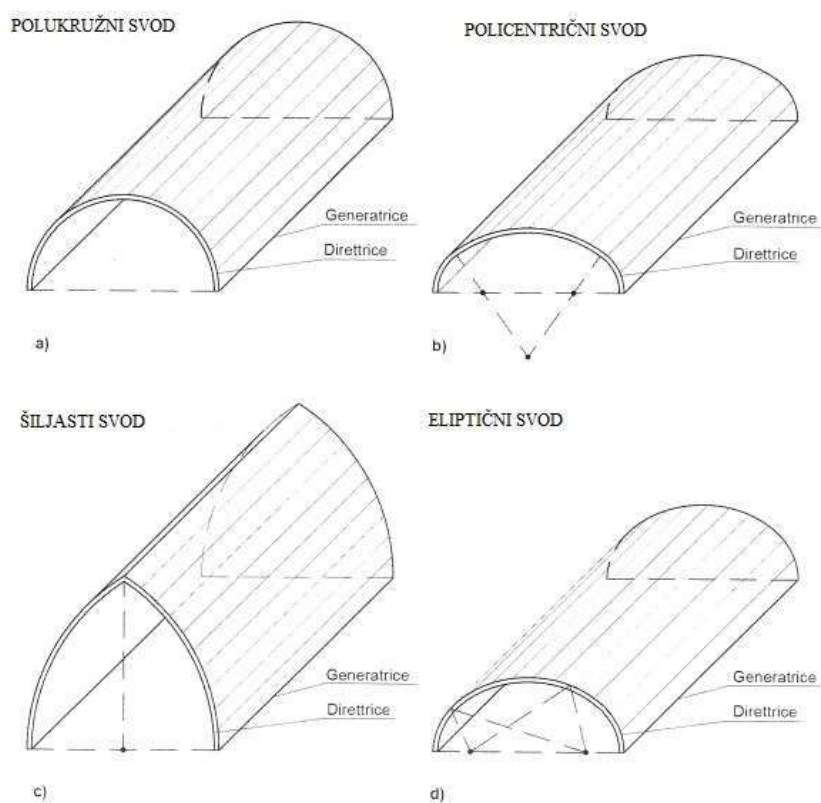
Slika 2. Najčešći oblici lukova [1]

Također na slici 3 prikazane su vrste lukova koji su manje zastupljeniji: a) usponski luk, b) tudorski luk, c) eliptični luk, d) parabolični luk, e) uvijeni luk, f) trolisni luk, g) obrnuto ovijeni luk, h) progibnuti luk.



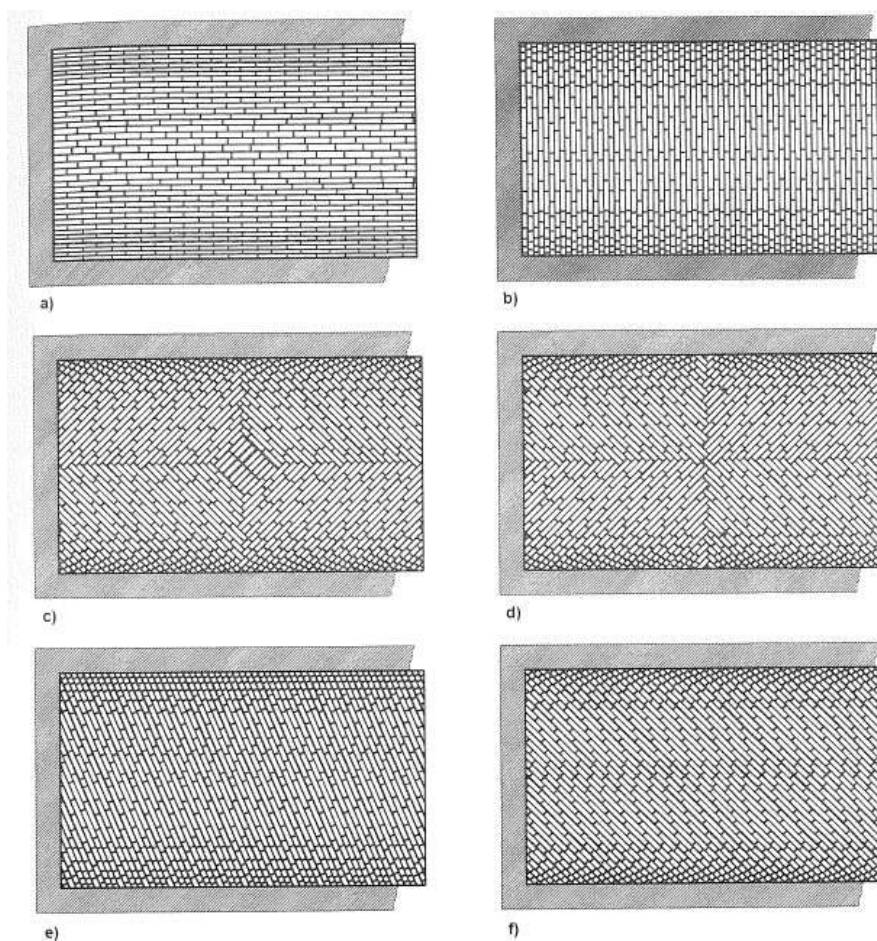
Slika 3. Ostale vrste lukova [1]

Svodovi su oblikom izdužene lučne konstrukcije. Na slici 4 prikazani su neki od mogućih oblika bačvastih svodova koji nastaju klizanjem nekog od prije spomenutih lukova uzduž pravca [2].



Slika 4. Vrste bačvastih svodova [2]

Osim po izgledu, svodovi se mogu razlikovati i po načinu slaganja blokova svodova. Na slici 4 dan je prikaz različitih oblika slaganja opekom [2].

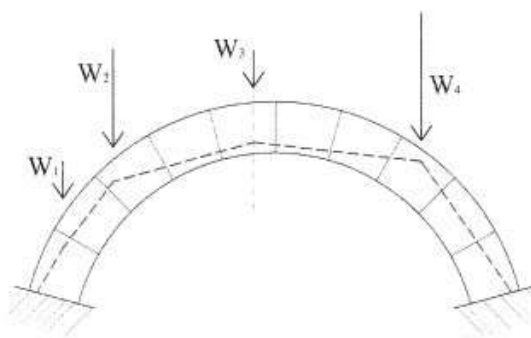


Slika 5. Različiti načini slaganja opečnih blokova: a) uzdužno na smjer svoda, b) okomito na smjer svoda, c) i d) pod kutom od 45° , e) i f) zakošenim redovima [2]

1.2. Stabilnost konstrukcije i mehanizmi sloma

Stabilnost lučnih konstrukcija i svodova postiže se tlačnim napreznjima između blokova. Konstrukcija će biti stabilna ukoliko je cijeli luk napregnut tlačnim napreznjima a to se može postići ili kontrolirati uz pomoć potporne (ili tlačne) linije.

Potporna linija (ili tlačna) linija je krivulja koja spaja hvatišta tlačnih sila u presjecima luka. Oblik tlačne linije ovisi o vrsti luka, broju zidanih blokova te opterećenju koje djeluju na luk. Kada je opterećenje jednoliko raspodijeljeno, na primjeru opterećenja vlastite težine potporna linija će biti pravilna krivulja no ako je opterećenje koncentrirano krivulja će biti poligon (slika 6).



Slika 6. Potporna linija oblika poligona uslijed koncentriranih opterećenja [2]

Vezano uz stabilnost zidanih lučnih konstrukcija J. Heyman je u [3] naveo tri glavne pretpostavke glede svojstava materijala a to su:

1) Zide ima beskonačnu tlačnu čvrstoću.

Pretpostavka se svodi na to da su napreznja u konstrukciji izrazito mala na način da ne predstavljaju opasnost za slom zida ili drobljenje materijala. Pretpostavka je naravno nesigurna no uopće nije nerealistična, dokazano da kod većeg broja lučnih mostova tlačna napreznja uistinu jesu mala (naspram napreznja kojih bi lučna konstrukcija mogla preuzeti). Svakako Heyman navodi da je moguća koncentracija tlačnih napreznja no pojava je lokalna te ne dovodi do rušenja zida [3].

2) Zide nema vlačnu čvrstoću.

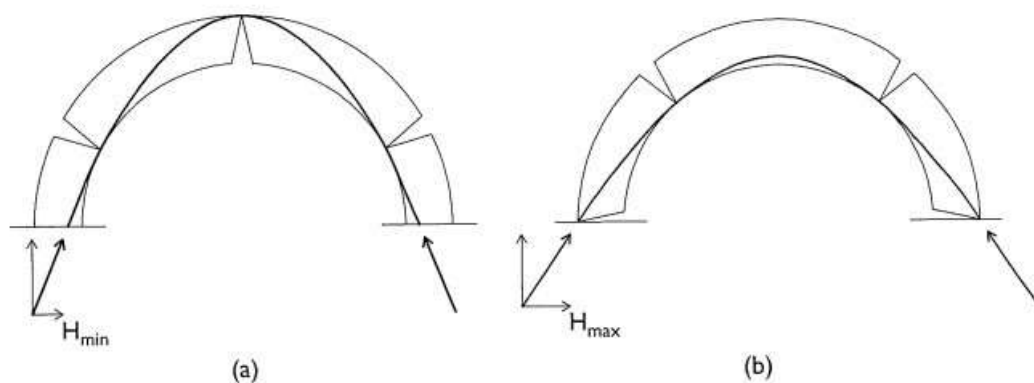
Iako kamen i opeka imaju određenu vlačnu čvrstoću no spojevi (sljubnice) između pojedinih blokova mogu ali i ne moraju biti ispunjeni vezivnim materijalom koji ima malu vlačnu čvrstoću. Navedenom pretpostavkom Heyman ističe da nije moguć prijenos vlačnih sila u zidu.

3) Nema klizanja u sljubnicama između blokova.

Pretpostavlja se da između pojedinih blokova luka djeluje trenje koje je dovoljno da zadrži blokove kako isti ne bi iskliznuli iz konstrukcije. Pretpostavka je razumna no moguće je pronaći i lukove kod kojih se dogodilo iskliznuće pojedinih blokova.

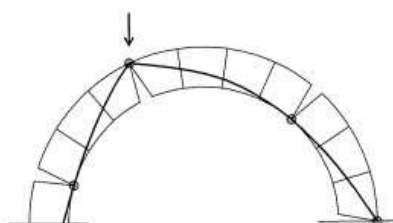
Navedenim pretpostavkama dovodi se do zaključka kako nije moguć slom konstrukcije zbog otkazivanja materijala tj. blokova konstrukcije koji se ponašaju kao kruta tijela i nije moguće klizanje krutih blokova zbog tlačnih sila koje zadržavaju stabilnost konstrukcije. Zbog nemogućnosti otkazivanja materijala ostaje jedini mogući slučaj sloma konstrukcije a to je pojavljivanje zglobova između blokova te pretvaranje sustava u mehanizam. Heyman [3] je povezao ove pretpostavke sa teorijom plastičnosti. Ukoliko se na lučnoj konstrukciji formira dovoljan broj zglobova, konstrukcija se pretvara u mehanizam te postaje nestabilna. Na primjeru tri puta statički neodređenog luka gdje je „n“ broj stupnjeva statički neodređenosti konstrukcije potrebno je $n+1$ broj zglobova kako bi konstrukcija prešla u mehanizam (u ovom slučaju potrebno je 4 zgloba).

Kako je navedeno, za pretvorbu konstrukcije u mehanizam potrebno je otvaranje određenog broja zglobova. Zglobovi će se otvoriti na ekstradosu ili na intradosu ovisno o vrsti opterećenja, poziciji i simetričnosti opterećenja ili o pomaku oslonaca. Na mjestu gdje potporna linija tangira intrados ili ekstrados luka otvara se zglob. Na slici 7. prikazana su dva granična stanja, najmanji potisak uslijed povećanja raspona te najveći potisak uslijed smanjenja raspona luka. Na slici je vidljivo kako ovisno o smanjenju ili povećanju raspona dolazi do promjene oblika potporne linije te otvaranja zglobova na drugim položajima.

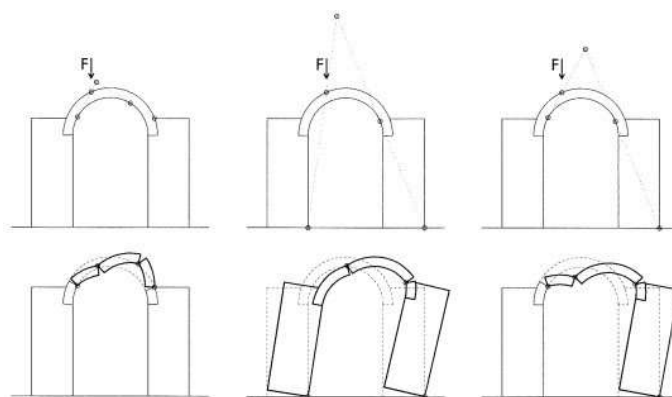


Slika 7. a) Najmanji potisak uslijed povećanja raspona luka, b) najveći potisak uslijed smanjenja raspona luka [1]

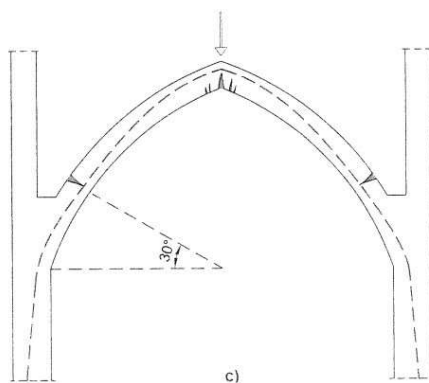
U nastavku su prikazani primjeri otvaranja zglobova uslijed djelovanja koncentriranog opterećenja. Na slici 8 prikazan je polukružni luk sa koncentriranim opterećenjem na trećini raspona luka, položaj potporna linije unutar luka te pozicije pojave zglobova na mjestima gdje potporna linija tangira intrados i ekstrados luka dok su na slici 9 prikazana tri moguća mehanizma sloma na primjeru polukružnog luka oslonjenog na bočne zidove. Mehanizmi sloma se razlikuju po tome da li se zglobovi javljaju samo u luku ili također i u zidovima. Na slici 10 prikazana je potporna linija i pojava zglobova kod šiljastog luka uslijed opterećenja koncentriranom silom na polovini raspona.



Slika 8. Potporna linija i otvaranje zglobova za koncentrirano opterećenje [1]



Slika 9. Različite vrste mehanizama sloma [1]



Slika 10. Pojava zglobova kod šiljastog luka uslijed koncentrirane sile u tjemenu [2]

U nastavku prikazana je pojava plastičnih zglobova na postojećim lučnim konstrukcijama.



Slika 11. Pojava zglobova na lučnom mostu [7]



Slika 12. Pojava zglobova uz prikaz potporne linije [7]



Slika 13. Pojava zgloba na lučnoj konstrukciji [7]

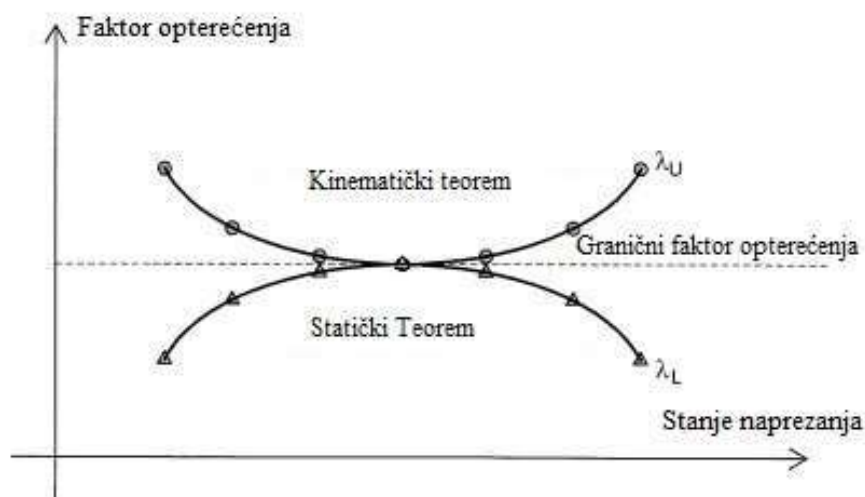
Uz tri prethodno navedene Heymanove pretpostavke za zide prelazi se sa analize čvrstoće konstrukcije na analizu stabilnosti konstrukcije. Uz pomoć ovih pretpostavki, moguće je primijeniti teoriju plastičnosti na zide. U nastavku su pojašnjena i dva bitna teorema teorije plastičnosti:

1) Statički teorem teorije plastičnosti

Ovaj teorem ističe kako je opterećenje koje odgovara stanju naprezanja u kojem je konstrukcija u ravnoteži manje od stvarnog graničnog opterećenja (slika 14). Ovaj teorem naziva se i teorem sigurnosti. Pravo granično opterećenje dobije se traženjem najvećeg mogućeg opterećenja [1].

2) Kinematički teorem teorije plastičnosti

Ističe kako je opterećenje dobiveno principom virtualnog rada za kinematički prihvatljiv mehanizam veće od graničnog opterećenja (slika 14); ovaj teorem naziva se i teorem nesigurnosti. Pravi granično opterećenje dobije se traženjem najmanjeg mogućeg opterećenja od svih kinematičkih mogućih mehanizama [1].



Slika 14. Statički i kinematički teoremi teorije plastičnosti[1]

2. METODE POJAČANJA LUKOVA I SVODOVA

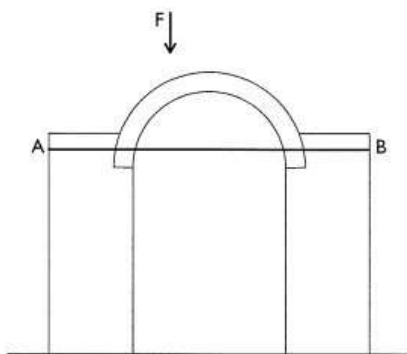
Pojačanje zidanih lukova se primjenjuje za povećanje njihove nosivosti. Pojačanje lukova potrebno je, na primjer, kako bi se poboljšala njihova sposobnost da izdrže potres ili opterećenja koja su se tijekom godina povećala od početnih izvornih projektnih uvjeta. Štoviše, pojačanje je bitno za sanaciju konstrukcija koje su pretrpjele potresna oštećenja, slijeganje temelja ili opterećenja nekih drugih utjecaja. Pregledom literature može se zaključiti kako su mnogi istraživači svoje radove usmjerili na raspravu o vrsti mehanizma urušavanja i kapacitetu pomaka zidanih lukova ovisno o pomaku oslonaca.

Pojačanja zidanih lukova može se postići uz pomoću nekolicine tehnika. Tradicionalne tehnike za pojačanje svodova i lukova (koje su se koristile u Europi, a osobito u Italiji zbog oštećenja nastalih potresima) uključuju čelične šipke postavljene kao zatege sidrene u bočne zidove za smanjenje pomaka oslonaca zidanih lukova, korištenje armirano betonske ljuske na ekstradosu luka, primjenu čeličnih profila na intradosu luka i injektiranje cementnim mortom. Zbog nekompatibilnosti u pogledu materijala i povećanja vlastite težine i krutosti koju bi ove tehnike mogle dodati konstrukciji, sve se manje koriste i zamjenjuju se novim metodama.

U ovom radu biti će obuhvaćene različite vrste pojačanja i sanacije lučnih i svođenih konstrukcija a to su metode pojačanja kao što su PAV „Polimeri Armirani Vlaknima“ (eng. FRP „Fiber Reinforced Polimer“), TAM „Tkaninom Armirani Mort“ (eng. FRCM „Fiber Reinforced Cementitious Matrix“), RAM metoda (eng. „Reinforced Arch Metoda“).

2.1. Pojačanje lukova ugradnjom zatega

Prije početka korištenja modernijih kompozitnih materijala česta metoda pojačanja lučnih konstrukcija bila je metoda sa ugradnjom zatega. Tehnika se sastoji od ugradnje zatega (vlačnog elementa) koji će spriječiti razmicanje oslonaca te otvaranje zglobova. Uobičajeno su to čelične zatega. Na slici 15 prikazana je skica tehnike pojačanja dok je na slici 16 prikaz tehnike implementirane u stvarnosti na komunalnoj palači u Puli.



Slika 15. Metoda sa zategama [1]



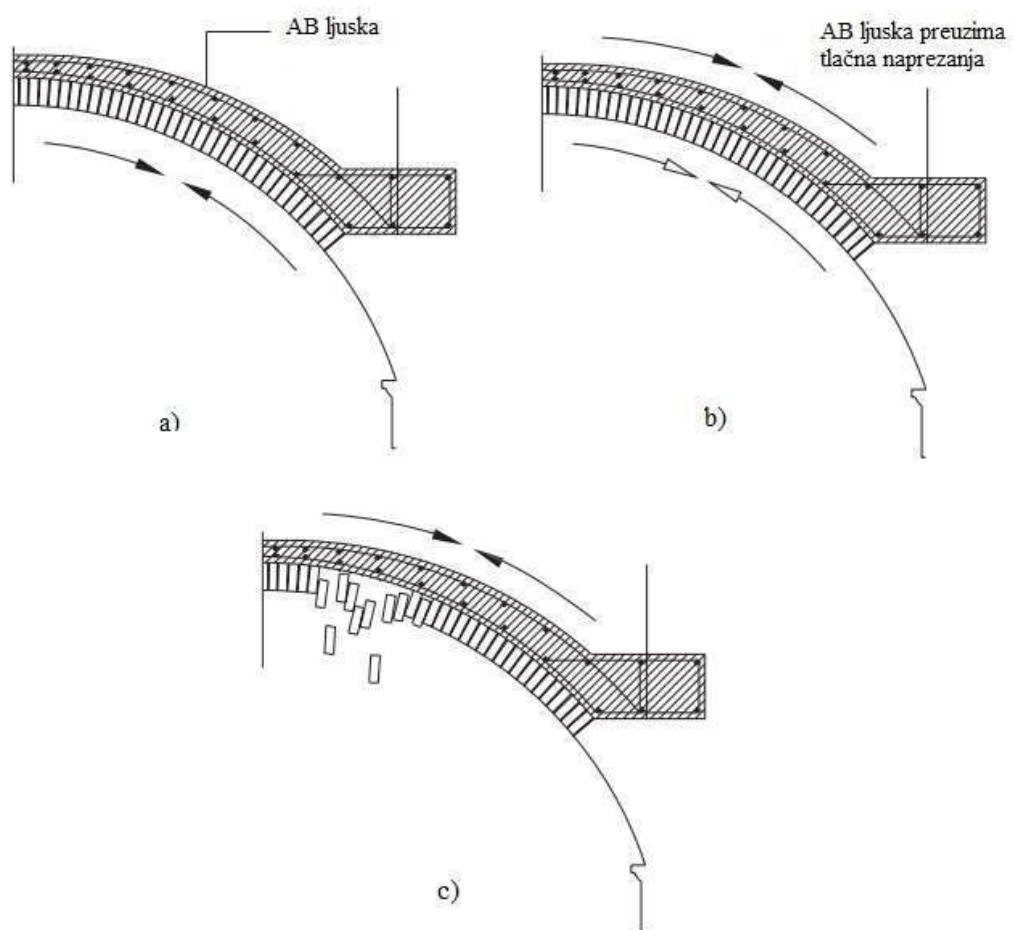
Slika 16. Tehnika sa zategama na objektu Komunalne palače u Puli

2.2. „Armiranobetonska ljuska“ na ekstradosu

Jedna od mogućih metoda pojačanja i ukrućivanja lukova i svodova je izrada armiranobetonske ljuske na ekstradosu, često popraćena izvedbom obodne grede za vezu [12]. Ako je ljuska male debljine, to neće značajno promijeniti statička i dinamička svojstva konstrukcije. Betonski sloj, s druge strane, pogoduje nakupljanju vlage u spojevima blokova opeke i između sloja opeke i AB ljuske. Ovaj učinak može se dugoročno pokazati štetnim za funkcioniranje cijelog svodnog sustava uzrokujući slabljenje spojeva. Za veće debljine AB ljuske mogu se pojaviti i negativni učinci na stabilnost svodova i lukova. U slučaju slijeganja zidova tj. oslonaca svodova, povećana krutost AB ljuske može uzrokovati premještanje tlačnih naprezanja s izvornog svoda na novi konstrukcijski element – ljusku (element veće krutosti preuzima veći udio opterećenja). Time dolazi do nestanka tlačnog naprezanja između blokova svoda što je neophodan uvjet za ispravan rad svih lučnih konstrukcija tj. uslijed pomaka oslonaca može se pojaviti ispadanje blokova zbog male razine tlačnog naprezanja između pojedinog bloka. Također u slučaju potresa, izazvane vibracije mogu uzrokovati odvajanje ciglenih blokova u središnjim dijelovima svoda, kao što je prikazano na slici 17 [12].

Navedeni efekt premještanja tlačnog naprezanja u AB ljusku može se smanjiti izvedbom bolje veze između zidanog svoda i armiranobetonske ljuske, npr. ugradnjom sidara u blokove svoda što će armiranobetonsku ljusku pretvoriti u spregnutu konstrukciju.

Nedostatci kod ovog postupka su to što je navedeni postupak invazivan i nije reverzibilan te velika debljina AB ljuske ujedno i znači povećanje vlastite težine konstrukcije.



Slika 17. a) Armirano betonska ljuska na ekstradosu opečnog svoda, b) preusmjeravanje naprezanja u AB ljusku, c) ispadanje blokova uslijed premještanja tlačnog naprezanja u AB ljusku [12]

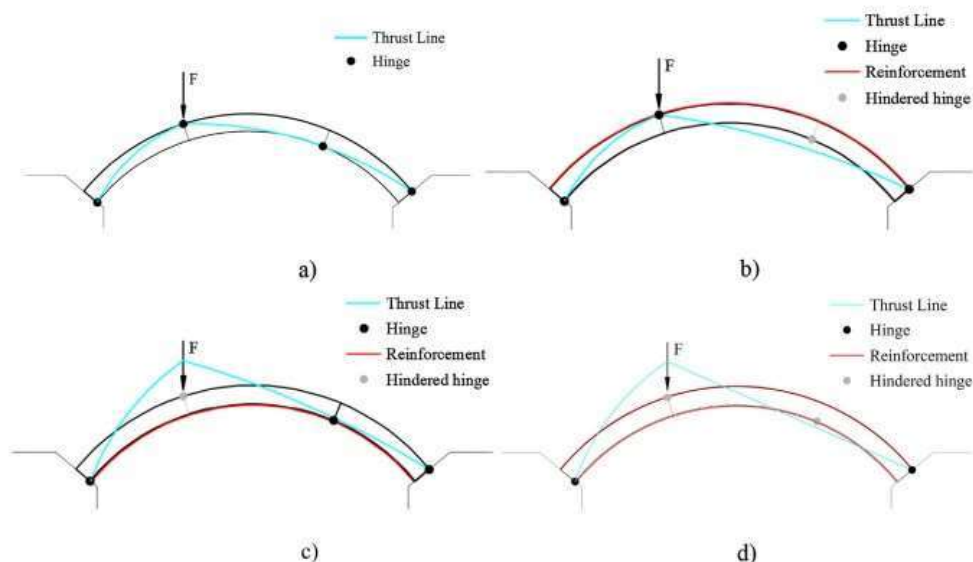
2.3. Pojačanja kompozitnim materijalima - općenito

Istraživanja provedena u posljednjim desetljećima na temu pojačanja i obnova lučnih konstrukcija bazirala su se većinom na pronalaženju materijala koji može pridonijeti najbolje uvijete sa gledišta stabilnosti, ekonomičnosti te kompatibilnosti sa materijalom lukova. Nastavno na navedeno provedena su istraživanja sa kompozitnim materijalima prikazanim u tablici 1.

Tablica 1. Vrste kompozitnih materijala sa komponentima [5]

Kompozitni materijal	Materijal pojačanja	Matrica kompozita
PBO-TAM	Polyparaphenylene benzobisoxazole	Cementni mort
GTAM	Stakleni tekstil	Cementni mort
BTAM	Bazalni tekstil	Temeljni mort bez cementa
B-TAM	Bazalna vlakna	Vapneno-cementni mort
C-TAM	Ugljična vlakna	Vapneno-cementni mort
SRP	Čelične žice - užice	Polimer
GPAV	Staklena vlakna	Polimer
CPAV	Ugljična vlakna	Polimer

Većina ispitivanja provedena su na pojačanim i na modelima lukova bez pojačanja. Neki su istraživači došli do spoznaje da prvi zglob nastaje na ekstradosu te drugi na intradosu [5]. Slom konstrukcije nastane onda kada se pojave još dva dodatna zgloba (u slučaju 3 puta statički neodređenog luka) i to na pozicijama oslonaca. Na slici 18 prikazan je mehanizam pojave plastičnih zglobova prilikom djelovanja koncentriranog opterećenja na trećini raspona konstrukcije. Vidljiva je pojava četiri zgloba na pozicijama gdje potporna linija tangira intrados i ekstrados luka. Također na slici je prikazana i promjena mehanizma pojave zglobova ukoliko je luk pojačan, tako da ukoliko se pojača ekstrados luka zglob koji bi se inače pojavio na intradosu nepojačanog luka neće biti u mogućnosti otvoriti se, te konstrukcija neće postati mehanizam (slika 18.b).



Thrust line – potporna linija
Hinge – zglob

Reinforcement – pojačanje
Hindered hinge – spriječeni zglob

Slika 18. a) Luk bez pojačanja, b) pojačanje ekstradosa, c) pojačanje intradosa, d) obostrano pojačanje [5]

Kao što je u slučaju sa pojačanjem ekstradosa tako je i u slučaju pojačanja intradosa (18.c), potporna linija izlazi izvan geometrije luka, pojačanje će onemogućiti otvaranje zgloba koji bi se pojavio na ekstradosu te će sustav ostati stabilan. Također i u slučaju obostranog pojačanja neće biti u mogućnosti otvaranje zglobova. Naravno sve prethodno navedeno u idealnom slučaju teorijski je točno jer vlačna nosivost kompozitnog pojačanja onemogućava otvaranje zglobova sve dok kompozitno pojačanje ostane dobro povezano sa materijalom luka. Prilikom ispitivanja uočeno je kako se mehanizam sloma pojačanih lukova općenito razlikuje od mehanizma sloma nepojačanog luka te ovisi o kvaliteti i već nastalim oštećenjima materijala luka, o kvaliteti kompozitnog pojačanja i o zajedničkoj vezi pojačanja i luka, na temelju navedenoga utvrđeno je sedam mogućih vrsta sloma prikazanih u tablici 2.

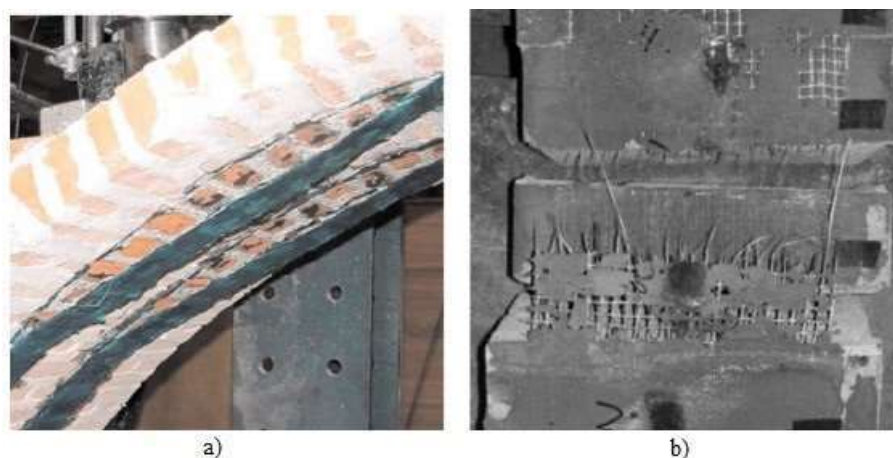
Tablica 2. Vrste sloma lukova pojačanih kompozitnim materijalima [5]

Moguće vrste sloma	Elementi uključeni u vrstu sloma
Posmično klizanje	Zidani elementi luka
Drobljenje materijala	Zidani elementi luka
Odvajanje pojačanja	Kompozitno pojačanje
Vlačni slom pojačanja	Kompozitno pojačanje
Drobljenje materijala + Odvajanje pojačanja	Zidni elementi + Kompozit
Posmično klizanje + Odvajanje pojačanja	Zidni elementi + Kompozit
Drobljenje materijala + Posmično klizanje	Zidni elementi luka

U nastavku su prikazane slike sa pojedinim vrstama sloma navedenih u tablici 2.



Slika 19. a) Posmično klizanje , b) drobljenje materijala, c) drobljenje + klizanje [5]



Slika 20. a) Odvajanje pojačanja, b) vlačni slom pojačanja [5]



Slika 21. a) Odvajanje + drobljenje, b) posmično klizanje + odvajanje [5]

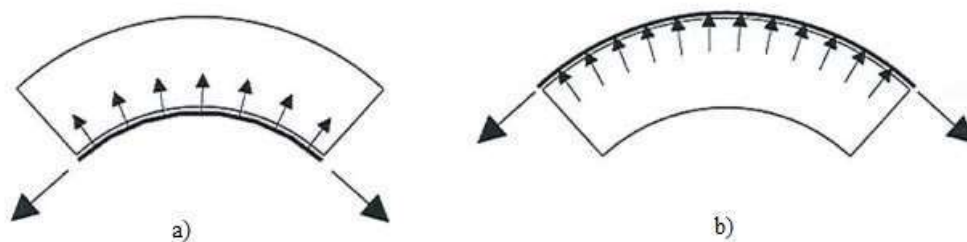
Prema [5] navedena je procjena mogućih učinaka koji utječu na ponašanje lukova a to su: utjecaj vrste i načina pojačanja, utjecaj materijala kompozita, utjecaj položaja pojačanja na luku.

2.3.1. Utjecaj vrste i načina pojačanja

Vrsta sloma pojačanog luka može se razlikovati u načinu polaganja pojačanja na osloncu luka. Prema [5] ukoliko se pojačanje postavi na jednu stranu (ekstrados ili intrados) ili na obje strane, a pojačanje se ne usidri u oslonce, mehanizam sloma će biti jednak onom mehanizmu sloma luka bez pojačanja no ukoliko se pojačanje usidri u oslonce zglobovi na osloncu se neće moći otvoriti te će se pojaviti jedna od prethodno sedam navedenih vrsta sloma.

U slučaju da se pojačanje postavi na ekstradosu te se pravilno usidri na osloncu a potporna linija tangira rub intradosa, zglob se neće moći otvoriti no pojaviti će se utjecaj posmičnog klizanja blokova u blizini oslonca. Isto tako u slučaju pojačanja intradosa u kojem se pojačanje sidri u oslonac, ukoliko tlačna linija tangira ekstrados zglob se neće moći otvoriti.

Kod pojačanja intradosa stabilnost osigurava samo veza između kompozita i luka dok se kod pojačanja ekstradosa stabilnost održava tlačnim naprezanjem između blokova, drugim riječima pojačanje unosi tlačnu silu u luk (slika 22).



Slika 22. a) pojava vlačnih sila okomito na pojačanje u slučaju pojačanja intradosa, b) pojava tlačnih sila u slučaju pojačanja ekstradosa [12]

Prema navedenom zaključeno je kako bi bilo idealno pojačati intrados i ekstrados sa sidrenjem u oslonce no to bi zahtijevalo veliki utrošak materijala. Najefikasnija metoda bi onda bila pojačanje ekstradosa.

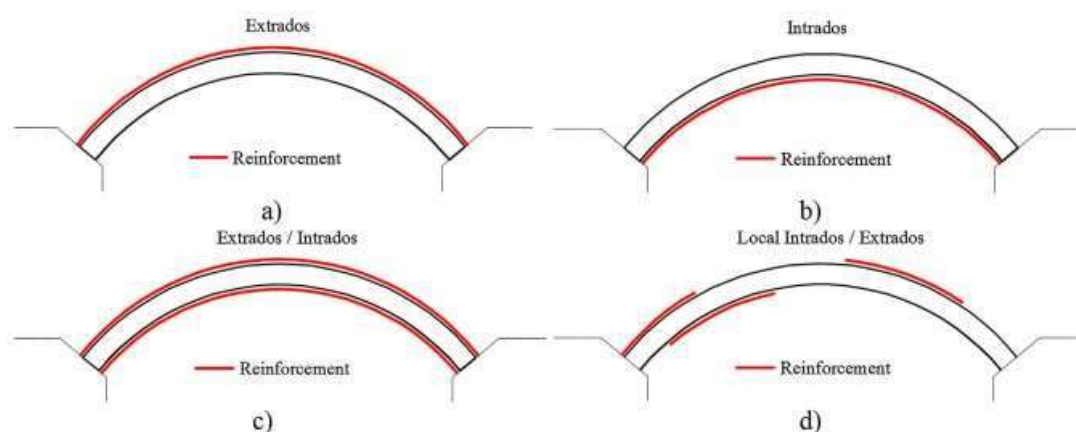
2.3.2. Utjecaj materijala kompozita

Materijal kojim se povezuje „armatura“ pojačanja sa konstrukcijom vrlo je značajan čimbenik; nekompatibilni materijali koji se međusobno dobro ne povezuju i na materijal konstrukcije loše utječu na kvalitetu pojačanja. Najčešće korišteni materijali armature su ugljik, staklo, čelik i PBO koji se vežu sa konstrukcijom u matrici od polimera ili morta. U [5] je navedeno kako lukovi koji su pojačani sa BTAM-om po mehanizmu sloma se ne razlikuju od nepojačanih lukova dok se u pojačanjima sa CPAV-om u ovisnosti o poziciji na kojoj se postavlja pojačanje (ekstrados, intrados ili na obje pozicije) pojavljuju posmično klizanje, slom i odvajanje pojačanja ovisno o parametrima luka. Ista situacija pojavljuje se kada se koristi armatura od staklenih vlakana. Kod pojačanja vlaknima veliki utjecaj na opterećenje koje luk može podnijeti ima širina pojačanja. Zaključno, navedeno je kako pojačanje sa ugljičnim i čeličnim vlaknima puno efikasnije od bilo kojih drugih vlaknenih i tekstilnih armatura.

2.3.3. Utjecaj pozicije pojačanja

U provedenom istraživanju [5] su razmatrani modeli sa različitim položajem pojačanja (slika 23). Izrađene su četiri grupe modela: a) sa kontinuiranim pojačanjem na ekstradosu, b) sa kontinuiranim pojačanjem na intradosu, c) sa kontinuiranim pojačanjem i na ekstradosu i na intradosu te d) sa djelomičnim pojačanjima na ekstradosu i intradosu (na pretpostavljenom mjestu pojave zglobova). Zaključeno je kako pozicija pojačanja značajno utječe na ponašanje luka

opterećenog koncentriranim opterećenjem. U prva dva slučaja kad je pojačanje kontinuirano na ekstradosu ili intradosu pokazalo se kako su lukovi u mogućnosti preuzeti puno veća opterećenja u usporedbi sa nepojačanim lukom te ne dopuštaju otvaranje zglobova koji bi se pojavili na suprotnoj strani pojačanja. Kontinuiranim pojačanjem sa obje strane luka sprječava se otvaranje zglobova u potpunosti no dolazi do pojave drukčijih mehanizama sloma. Teoretski isti utjecaj se može postići i lokalnim pojačanjem samo na određenoj duljini no u ispitivanjima je dokazano kako sa na taj način ne sprječava pojava zgloba već se zglob samo javlja u drugom području luka.



Slika 23. a) Pojačanje na ekstradosu, b) pojačanje na intradosu, c) pojačanje na obje strane, d) djelomično (lokalno) pojačanje naizmjenu na intradosu i ekstradosu [5]

U pogledu koeficijenta pojačanja (omjer najvećeg opterećenja pojačanog luka i najvećeg opterećenja luka bez ojačanja) zaključeno je da se lokalnim pojačanjem dobije manji koeficijent pojačanja a najveći se dobije sa kontinuiranim pojačanjem na obje strane luka. Također je zaključeno da se ne može općenito utvrditi je li povoljnije kontinuirano pojačanje ekstradosa u usporedbi sa pojačanjem intradosa, budući da značajno ovisi o vrsti pojačanja te spljoštenosti luka. Provedeno je i ispitivanje u kojem su uspoređena PAV i TAM pojačanja, gdje je pokazano da lukovi sa pojačanjem od PAV-a imaju veći koeficijent pojačanja od TAM-a [5].

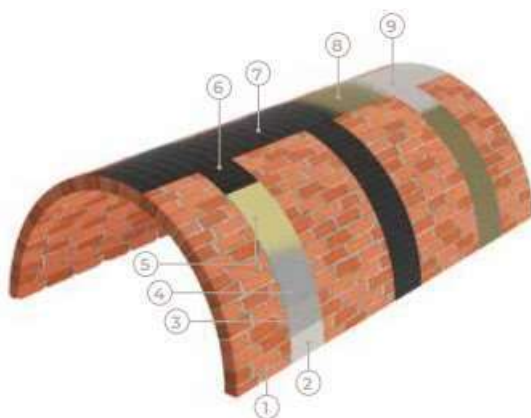
2.4. Metoda pojačanja PAV-om („polimeri armirani vlaknima“)

PAV (Polimeri Armirani Vlaknima) (eng. FRP-Fiber Reinforced Polimer) kompozitni je materijal izrađen od vlakana različitih materijala koji služe kao armatura ugrađena u polimernu matricu. Vrsta i orijentacija vlakana, svojstva i količina matrice bitno utječu na karakteristike krajnjeg proizvoda. Najčešće korištene su tkanina od ugljičnih vlakana te mrežice od staklenih i ugljičnih vlakana. Glavne karakteristike PAV-a su otpornost na koroziju, mala težina i velika vlačna čvrstoća. Njegova velika otpornost na koroziju iskorištava se u armiranobetonskim konstrukcijama u agresivnom okolišu ili za pojačanje izloženih elemenata konstrukcija. Zbog male težine FRP-a olakšava se primjena u skućenim prostorima te nije potrebno korištenje oplate prilikom armiranja FRP-om što umanjuje troškove rada [16].

PAV kao sustav pojačanja jednostavan je za ugradnju i primjenjiv je na više tipova konstrukcije no osim što ima dosta pozitivnih strana kao što su visoka mehanička svojstva tkanina i vlakana, niska gustoća kompozita daje i malu sveukupnu težinu, nizak koeficijent toplinskog širenja, ima i negativnih strana. Kvaliteta veze između PAV sustava i površine konstrukcije na kojoj se primjenjuje ovisi o kvaliteti i uvjetima postojećeg materijala konstrukcije, uvjetima površine, načinu primjene PAV-a i atmosferskih utjecaja prilikom primjene pojačanja. Potrebno je osigurati dobru vezu između dva relativno nekompatibilna materijala sa različitim premazima kako bi se ta veza osigurala. Na kvalitetu pojačanja uvelike utječe i temperatura kojom će pojačanje biti podvrgnuto nakon ugradnje, potrebno je koristiti određenu vrstu veziva za određene temperature koje se mogu pojaviti nakon ugradnje. PAV sustavima temperaturne promjene mijenjaju mehanička svojstva, na primjer prilikom većih temperatura od 50 do 80 °C određene vrste polimernih veziva postaju viskozne ili gumaste te pri temperaturama od 400 °C se u potpunosti tope što negativno utječe na protupožarna svojstva. Također i postojanost vlage/vode loše utječe na konstrukciju, veziva koja se koriste u PAV sustavima izrazito su loše vodopropusnosti. Sam proces upijanja i prolazak vlage kroz sloj PAV-a je izrazito dug proces. Zbog loše vodopropusnosti konstrukcija koja je podvrgnuta smrzavanju a velike šanse su da su u konstrukciji pukotine u kojima se voda može zadržavati, smrzavanjem te vode u pukotinama dolazi do širenja pukotina te može doći i do delaminacije i odvajanja PAV sustava od konstrukcije. Što se tiče debljine slojeva pojačanja ona varira ovisno o proizvođaču i sustavu ugradnje no većinom je u rangi od 5-6 mm po sloju veziva [14].

Neovisno o negativnim svojstvima ovakav sustav pojačanja moguće je primijeniti na različite načine. U nastavku slijedi kratki prikaz i objašnjenje nekih od mogućih metoda ugradnje PAV sustava od strane različitih proizvođača.

Proizvođač građevinskih materijala „Mapei“ [9] daje sustav pojačanja bačvastog svoda ili luka. Na slici 24 prikazan je sustav sa svim komponentama.



1. Postojeći svod/luk
2. Dvokomponentni bezcementni mort
3. Epoksidni premaz
4. Epoksi kit za izravnavanje
5. Epoksi smola
- 6,7. Tkanina od ugljična vlakana
8. Epoksi smola
9. Silikatni šljunak

Slika 24. PAV sustav pojačanja „MAPEWRAP“ [9]

Postupak izvedbe:

- Ukoliko je površina zidanog svoda ili luka neravna potrebno je primijeniti dvokomponentni bezcementni mort kao primarno zaravnanje površine u debljini od 5-6 mm.
- Nakon zaravnanja površinu je potrebno impregnirati sa odgovarajućim temeljnim premazom
- Kako bi površina bila idealno ravna za ugradnju tkanine potrebno ju je dodatno izravnati sa epoksidnim kitom
- Na konačno zaravnatu podlogu postavlja se prvi sloj epoksidne smole
- Na još svjež sloj smole postavlja se odgovarajuća tkanina i utiskuje u smolu
- Tkanina se ponovno premaže smolom kako bi se u potpunosti prekrila
- Kako bi se sustav zaštitio na zadnji sloj smole postavlja se silikatni šljunak

Kod ovakvih sustava kada se pojačanje polaže na ekstrados potrebno je osigurati sidrenje na mjestu oslonca luka kako bi sam sustav bio „zategnut“. Proizvođač „Mapei“ u tom slučaju daje rješenje uz posebna sidra izrađena od istog materijala kao i tkanina. Ta sidra izrađena su od

vlakana na način da su sa jedne strane u obliku šipke kako bi se usidrili u izbušene rupe oslonca a sa druge strane vlakna su „rascvjetana“ kako bi se raširila po površini pojačanja (slika 25).



Slika 25. Sidreni konektori [9]

U nastavku je prikazan još jedan PAV sustav pod nazivom „Webertec CPAV“ [10] koji je moguće primijeniti na zidane i betonske elemente te kao pojačanje zidanih svodova i lukova (slika 26.) Sustav ugradnje sličan je kao i prethodni primjer.



Slika 26. Webertec sustav pojačanja [10]

Autor u radu [17] daje osnovna načela koja bi se trebala pridržavati kako bi se pojačanje izvelo pravilno te uistinu poboljšalo svojstva konstrukcije:

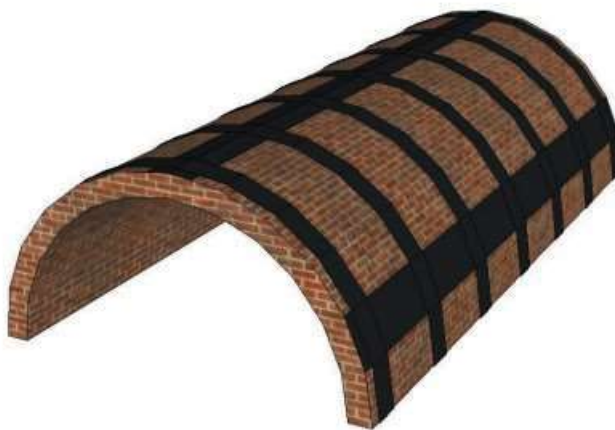
- a) upotreba tkanina od ugljičnih vlakana na bočnim površinama luka ne pridonosi pojačanju konstrukcije zato jer dolazi do delaminacije tj. odvajanja sloja pojačanja od konstrukcije.
- b) poželjno je ugraditi pojačanja kontinuirano na ekstradosu ili intradosu luka
- c) prikladno je i povoljno koristiti FRP tkanine umjesto lamela zbog nepravilne geometrije zidane podloge
- d) neophodno je izvršiti temeljiti pregled oslonaca te također po pažljivo čišćenje od moguće prašine i nečistoća

Kod pojačanja svodova moguće je izvesti pojačanje uzduž direktrise svoda tj. longitudinalno na luk. Količina pojačanja ovisi o geometrijskim karakteristikama svoda (raspon, debljina, svjetla visina) u praksi preporučeno je da pojačanje zadovoljava slijedeće dva uvjeta

$$p_f \leq 5t + b_f \qquad b_f \leq 2t$$

Gdje je t debljina svoda a b_f je širina usvojenog pojačanja

Kod slučaja pojačanja bačvastog svoda sustav pojačanja trebao bi izgledati kao sa slike 27.



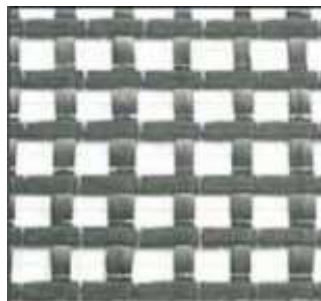
Slika 27. Shema pojačanja bačvastog svoda

2.5. Metoda pojačanja TAM-om („tkaninom armirani mort“)

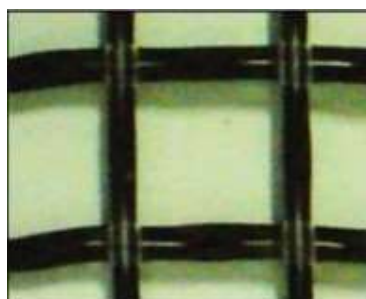
FRCM (Fiber Reinforced Cementous Matrix) ili TAM pojačanja su sustavi kojima je matrica na bazi organskog materijala (cementnog ili vapnenog). Tkanina kojom se armira cementna matrica nalikuje na mrežu čija su vlakna najčešće izrađena od materijala kao što su staklo, bazalt, ugljik. Tkanine su najčešće pletene u dva okomita smjera na način da se omogući dovoljan prostor između pojedinih vlakana kako bi matrica bila u mogućnosti potpuno popuniti taj prostor. Moguća je ugradnja više slojeva pojačanja. Osim tkanina primjenjuju se i pletene čelične mreže. U nastavku su prikazane neke od mogućih vrsta tkanina i mreža [15].



a)



b)



c)

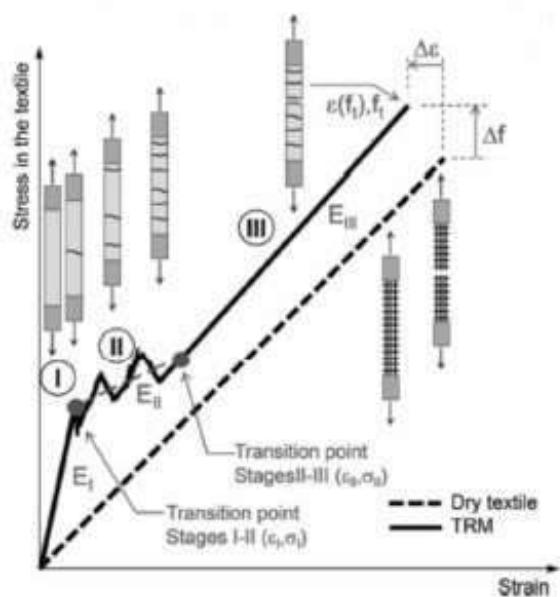


d)

Slika 28. a) Tkanina od staklenih vlakana, b) tkanina od ugljičnih vlakana, c) tkanina od bazaltnih vlakana, d) mreža od čelične žice [15]

Za razliku od polimernih veziva matrice kao cementni mort ne mogu u potpunosti popuniti prostor između pojedinih vlakana armature te se u ovom slučaju koriste mreže sa većim razmacima između pojedinih vlakana ili mreže kojima su vlakna prethodno impregnirana te obložena nekim polimernim slojem. Za razliku od PAV sustava TAM imaju bolja svojstva u pogledu bolje kompatibilnosti sa kemijskim, fizikalnim i mehaničkim svojstvima postojeće zidane konstrukcije, jednostavnost ugradnje jer se mogu koristiti tradicionalni oblici ugradnje tipa kao žbukanje, matrica koja je porozna omogućava „disanje“ konstrukcije jer propušta vlagu i zrak te dobra protupožarna svojstva. [15]

Na slici 29 prikazano je vlačno ispitivanje PAV uzorka. Na dijagramu naprezanje-srednja deformacija mogu se uočiti tri faze. U prvoj fazi cementna matrica je neraspucana te pruža glavna svojstva pojačanja glede krutosti i nosivosti kompozitnog pojačanja. Pojavom prve pukotine započinje druga faza, kako se naprezanje u pojačanju povećava tako se i povećava broj pukotina u matrici. Nakon potpunog razvijanja pukotina u matrici (kada matrica više ne sudjeluje u nosivosti) dolazi do treće faze u kojoj ukupno opterećenje preuzima tkanina [15].



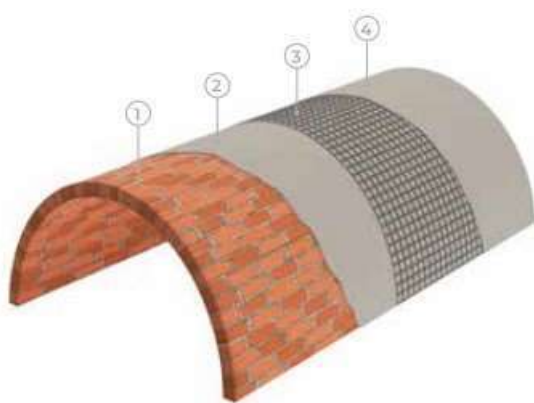
Slika 29. Dijagram naprezanje-deformacija vlačno opterećenog PAV uzorka [15]

Uporabom TAM sustava kao pojačanja konstrukcija lukova i svodova sprječava se otvaranje dovoljnog broja zglobova za prelazak konstrukcije u mehanizam. Pojačanje je moguće primijeniti na intrados i na ekstrados ili na obje strane. Primjena na intrados je jeftinija te jednostavnija zbog jednostavnosti ugradnje pojačanja sa donje strane luka ili svoda. Uz navedenu jednostavnost ugradnje postoji mogućnost lošeg adhezijskog vezivanja pojačanja u intrados uz koji bi se

izgubilo prvobitno svojstvo pojačanja, no navedeno se može izbjeći uz korištenje sidara. Ugradnjom na ekstrados ukoliko postoji nekakva ispuna iznad luka zahtjeva se da se ista odstrani kako bi se pojačanje moglo ugraditi no uz ugradnju na ekstrados osigurava se bolja adhezijska veza između pojačanja i luka te nije potrebna ugradnja dodatnih sidara. [15]

U nastavku su ukratko prikazane i opisane metode ugradnje TAM sustava pojačanja različitih proizvođača.

Tvrtka Mapei također daje i rješenja za TAM sustave. U nastavku je prikazan TAM sustav pojačanja [9].



1. Postojeći luk/svod
2. Dvokomponentni mort
3. Staklena mrežica
4. Dvokomponentni mort

Slika 30. TAM sustav „Mapei“ [9]

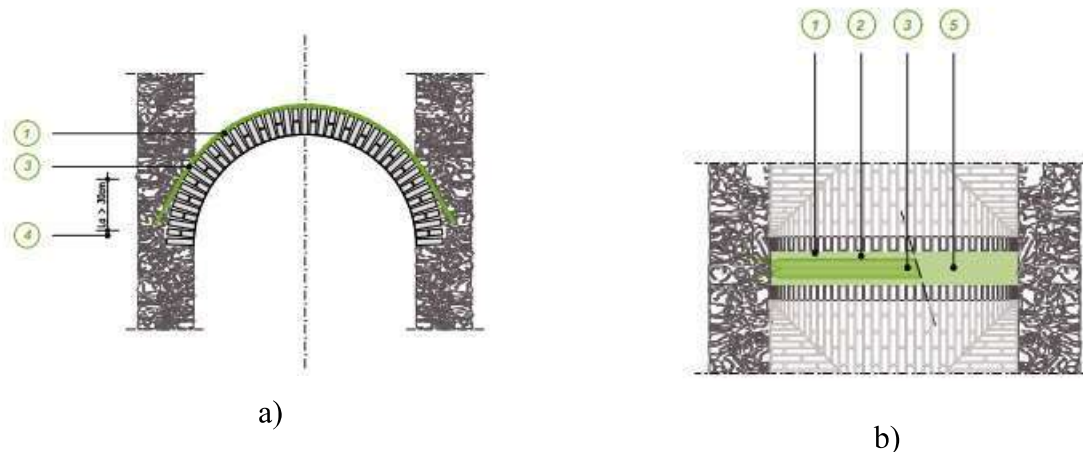
Ovaj sustav moguće je ugraditi na intrados i ekstrados luka i svoda, jednostavniji je za ugradnju od PAV sustava istog proizvođača. Za razliku od PAV sustava gdje se koristi smola ovdje se kao vezni materijal koristi dvokomponentni mort na bazi vapna sa dodatkom vlakana koja povećavaju duktilnost morta.

Postupak izvedbe nakon uklanjanja žbuke:

- Kao prvi sloj izravnivanja površine lukova i svodova koristi se dvokomponentni mort na bazi vapna sa dodatkom vlakana koji se ugrađuje u debljini od 5 do 6 mm te ujedno i služi kao vezivo za mrežicu.
- Na svježe ugrađeni mort polaže se i lagano utiskuje mrežica od staklenih ili bazaltnih vlakana. Potrebno je osigurati preklope od minimalno 15 cm prilikom polaganja mreže.
- Na ugrađenu mrežu ugrađuje se drugi sloj dvokomponentnog morta kao završni sloj sustava u debljini od 5 – 6 mm.

Također i za ovaj sustav proizvođač je namijenio slično rješenje sidrenja pojačanja u oslonce kao i za PAV sustav. Kao sidra koriste se isti konektori kao i u slučaju PAV-a no u ovom slučaju kad je pojačanje kontinuirano na cijeloj površini ekstradosa konektori se postavljaju na određenim razmacima koje propisuje proizvođač.

Proizvođač Kerakoll također ima rješenja za pojačanja lukova i svodova, jedno od kojih je prikazano u nastavku [11]. Na slici 31 prikazan je način ugradnje pojačanja u koracima.

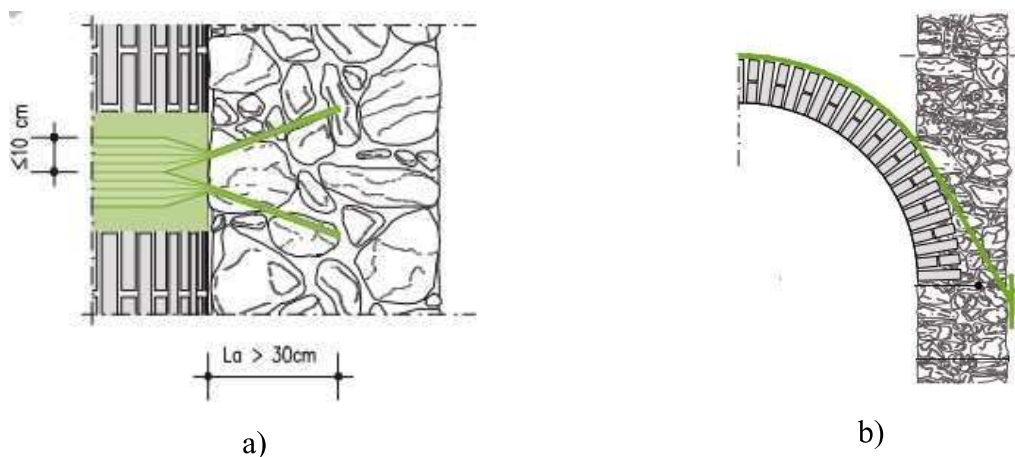


Slika 31. a) Poprečni presjek TAM metode pojačanja, b) tlocrt TAM metode pojačanja [11]

Postupak izvedbe:

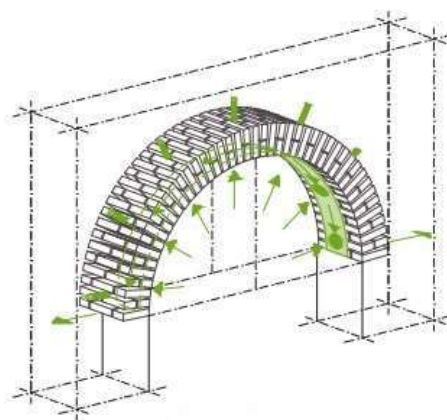
- 1. Površinu na koju se ugrađuje sustav pojačanja potrebno je očistiti od svih nečistoća te po potrebi učvrstiti i/ili ponovno zazidati odlomljene elemente.
- 2. Na očišćenu podlogu postavlja se određeni mort proizvođača u debljini od 3 do 5 mm, mort je klase M15 te je paropropusan.
- 3,4 Na svježi mort polaže se željezna mrežica te se lagano utiskuje u mort, mrežu je potrebno sidriti u bočne zidove (ukoliko ih ima) na duljini od minimalno 30 cm, ukoliko ih nema samo se mreža nastavlja za minimalno 30 cm od oslonca luka te se sidri.
- 5. Na postavljenu mrežicu ugrađuje se završni sloj morta

Za razliku od Mapei-a Kerakol ne koristi posebne konektore za sidrenje pojačanja u oslonce već je propisano da se armatura to jest mrežica zareže, savije u tuljak te se ugura u prethodno izbušenu rupu u osloncu za minimalno 30 cm te se ispuni sa mortom (slika 32.a) Ukoliko je moguće provesti tuljak do suprotne strane oslonca ili zida dodatno se pričvršćuje za zid/oslonac (slika 32.b)

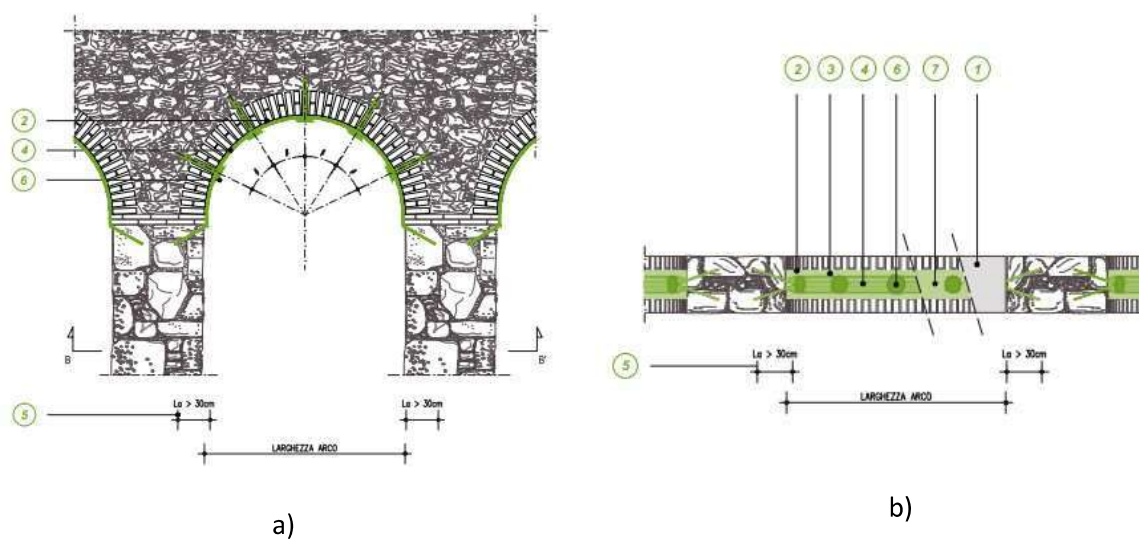


Slika 32. a) Sidrenje mrežice u oslonac, b) dodatno pričvršćivanje sidrenja [11]

Proizvođač prethodno navedenog sustava daje rješenje i za slučaj pojačanja intradosa koji je prikazan u nastavku. Kod pojačanja intradosa potrebno je osigurati dodatnu vezu između sustava pojačanja i luka zato jer adhezijska veza između sustava pojačanja i intradosa luka nije dovoljna da pojača konstrukciju. Proizvođač zato daje rješenje za navedeni problem u obliku sidara koji se buše u intrados luka te sidre u ispunu iznad konstrukcije luka. [11]

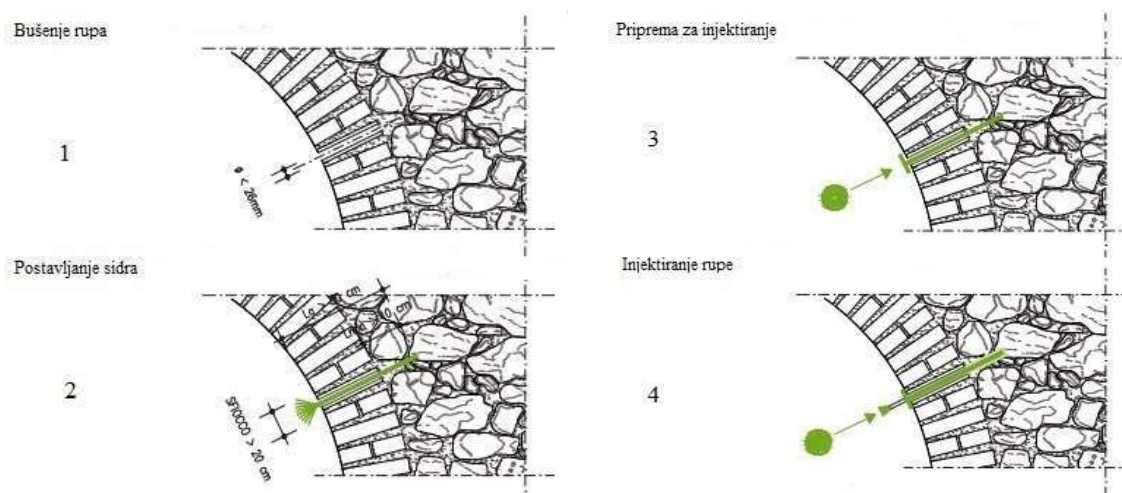


Slika 33. Aksonometrijski prikaz pojačanja [11]



Slika 34. a) Poprečni presjek pojačanja, b) tlocrt pojačanja [11]

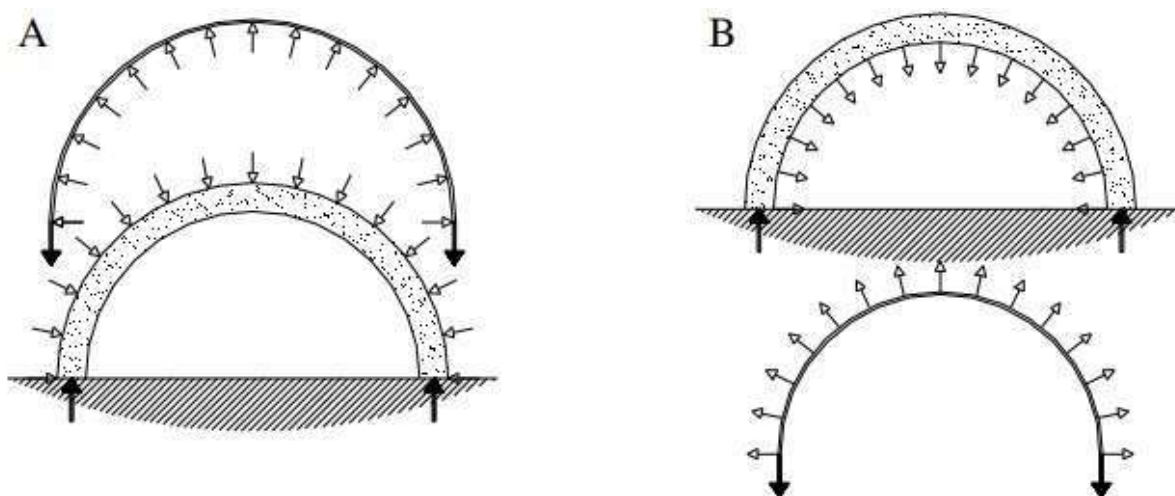
Metoda pojačanja intradosa postavlja se postupkom izvedbe identično kao i na ekstrados no jedina razlika je u dodatnim sidrima koji se buše kroz intrados luka (slika 33, faza 6). Proizvođač navodi pravilno ugrađivanje sidara u pet faza. Prvo je potrebno izbušiti rupe, zatim se postavlja prvi sloj premaza i tkanina na intrados, zatim se u izbušene rupe postavljaju sidra (ista kao i od proizvođača Mapei) te na kraju se u izbušene rupe injektira smjesa koja će povezati sidro i materijal luka (slika 35).



Slika 35. Faze ugradnje sidara [11]

2.5. Pojačanje luka ugradnjom čelične zatege uzduž ekstradosa ili intradosa (Reinforced Arch Method – RAM)

U zidanim lukovima formiranjem dovoljnog broja plastičnih zglobova (obično 4, odnosno 5 kod simetričnog opterećenja) dolazi do pojave mehanizama. Kad bi bilo moguće spriječiti nastanak najmanje jednog plastičnog zgloba neovisno je li na poziciji intradosa ili ekstradosa luk se ne bi pretvorio u mehanizam te ne bi došlo do sloma. Na primjeru luka koji je statički određen, oslonjen na nepomične oslonce te sadrži zglob na tjemenu, luk je statički stabilan te sadrži potpornu liniju koja je jedinstvena ovisno o opterećenju koje djeluje na luk. Takav luk kojem je potrebno otvaranje samo jednog plastičnog zgloba kako bi došlo do sloma moguće je pojačati na način da se postavi kontinuirano pojačanje na ekstrados ili intrados luka (u ovom primjeru prednapete čelične zatege). RAM sustav čeličnih zatega odmah nakon ugradnje i prednapinjanja izvršava svoju funkciju da duž luka vrši ravnomjeran pritisak na svaki blok i luk u cijelosti te na taj način osigurava povoljan položaj tlačne linije luka. Zapravo funkcija RAM-a je modificiranje opterećenja koje djeluju na luk tako da se kombinacijom postojećih i novih opterećenja stvori stabilniji sustav (slika 36). [7]



Slika 36. Prijenos opterećenja RAM sustava na luk [7]

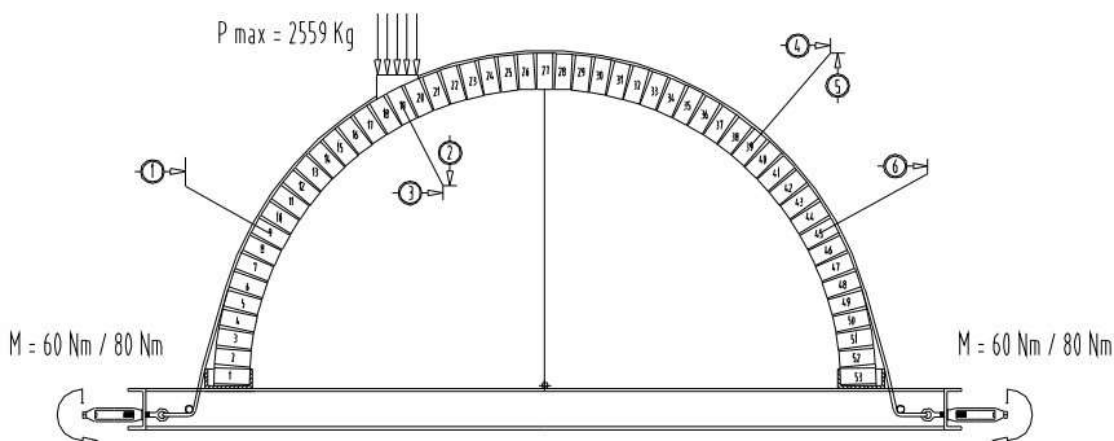
2.5.1. Ispitivanje modela na vertikalno opterećenje

L. Jurina je uz pomoć kolega Cultreri i Savoldelli godine 1996. proveo eksperimentalna ispitivanja na 12 lučnih modela izgrađenih od opečnih blokova raspona 2 m (slika 37). Svi modeli bili su istih dimenzija no razlika je bila u vrsti pojačanja luka.



Slika 37. Modeli za ispitivanje [7]

Ispitivanje su proveli na način da su svaki model opteretili sa koncentriranom silom na određenoj poziciji te kasnije usporedili rezultate koji će varirati ovisno o vrsti pojačanja luka. Ispitivanja su provedena za četiri različita slučaja pojačanja : 3 modela bez pojačanja, 3 modela sa tradicionalnim pojačanjem armiranobetonskom ljuskom sa sidrima koja povezuju beton i opečne blokove, 3 modela sa tradicionalnim pojačanjem armiranobetonskom ljuskom bez sidara te 3 modela sa RAM metodom pojačanja uzduž ekstradosa no sa različitom silom prednapinjanja. Tokom izvođenja ispitivanja zabilježeni su slijedeći podatci: maksimalno opterećenje koje luk može podnijeti prije sloma te najveći pomaci na određenim pozicijama modela. Na slici broj 38 prikazana je skica modela sa pozicijom unosa opterećenja, pozicijama sidrenja RAM pojačanja te pozicijama promatranih točaka za mjerenje pomaka.



Slika 38. Skica modela za ispitivanje [7]

U sljedećoj tablici prikazani su podatci dobiveni iz provedenog ispitivanja.

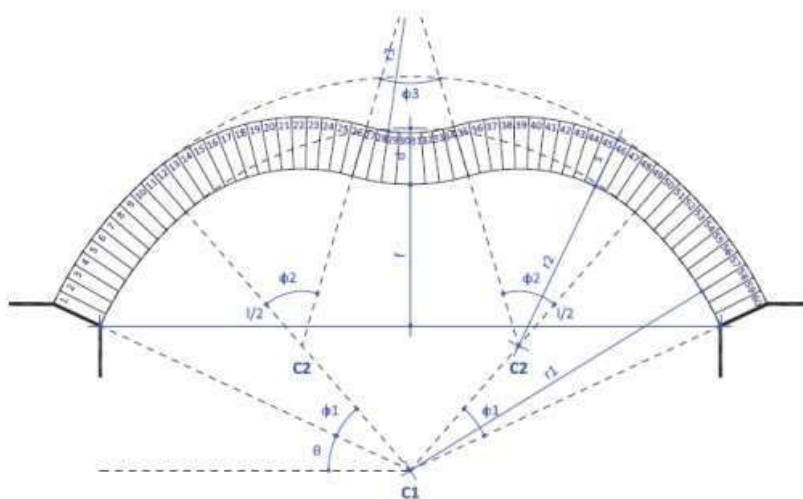
Tablica 3. Rezultati ispitivanja [7]

Vrste pojačanja	P max [N]	H. pomak točke 1 [mm]	V. pomak točke 2 [mm]	H. pomak točke 3 [mm]	H. pomak točke 4 [mm]	V. pomak točke 5 [mm]	H. pomak točke 6 [mm]
1.Bez pojačanja	191	0,04	0,84	1,35	1,16	0,6	1,5
2.Armiranobetonska ljuska bez sidrenja	3379	3,78	10,6	13,34	15,2	6,84	13,0
3.Armiranobetonska ljuska sa sidrima	2948	2,1	5,82	7,33	8,17	3,03	7,36
4.RAM M=60 Nm	2559	5,18	20,22	19,7	23,1	10,5	16,37
5.RAM M=80 Nm	2886	1,3	11,64	12,75	11,98	5,03	9,42

Dobiveni rezultati pokazali su kako su svi modeli sa pojačanjima pokazali povećanu nosivost i duktilnost u odnosu na nepojačane modele no najveću duktilnost su pokazali baš oni modeli ojačani sa RAM metodom kao što je i vidljivo iz tablice 3. Što se tiče vertikalnog koncentriranog opterećenja vidljivo je kako je model sa armiranobetonskom ljuskom prihvatio najveću silu no RAM metoda se također pokazala jako zadovoljavajuća jer je u usporedbi sa običnim nepojačanim lukom prihvatila silu čak do 800% veću. Autori zaključuju da je RAM metodu zbog mnogo veće duktilnosti konstrukcije i povećane nosivosti moguće implementirati na postojeće konstrukcije [7].

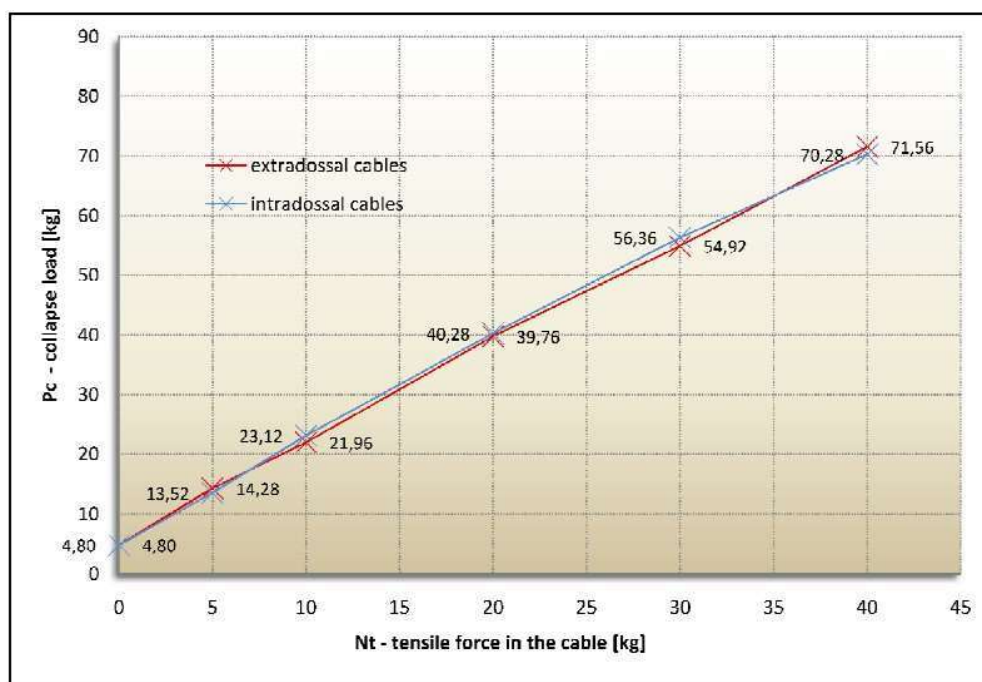
2.5.2. Ispitivanje na horizontalno opterećenje

Zbog čestih potresa u Italiji prije autor rada [7] proveo je ispitivanje na pojačanim lukovima RAM metodom na horizontalno opterećenje kako bi utvrdio je li navedena metoda primjenjiva i u slučaju potresnog djelovanja. Ispitivanje je provedeno na modelu običnog polukružnog luka i spljoštenog luka kao sa slike 39, izrađenog od drvenih blokova.



Slika 39. Geometrija spljoštenog modela luka [7]

Ispitivanje je provedeno na više modela, jedina razlika bila je u sili prednapinjanja zatege. Prilikom prednapinjanja obratila se pažnja na to da se ne prekorači tlačna nosivost samog materijala od kojeg je model izrađen. Ispitivanje je pokazalo da i u ovom slučaju kod horizontalnog opterećenja RAM metoda doprinosi velikom značaju duktilnosti i samoj nosivosti luka. Ispitivanje je provedeno na način da su neki modeli bili pojačani na ekstradosu a neki na intradosu luka. Na slici broj 40 prikazan je graf ispitivanja u kojem je vidljivo povećanje nosivosti modela na horizontalno opterećenje linearno sa povećanjem sile prednapinjanja RAM kablova. Usporedbom pojačanih modela RAM metodom i običnih modela bez pojačanja dobiveni su rezultati da se nosivost na horizontalnu silu poveća za 200% kod modela sa manjom silom prednapinjanja dok se kod modela sa većom silom prednapinjanja nosivost modela poveća i do 1400% [7].



Slika 40. Graf ovisnosti sile sloma i sile prednapinjanja kablova za slučaj spljoštenog modela luka [7]

2.5.3. Primjer implementacije RAM metode

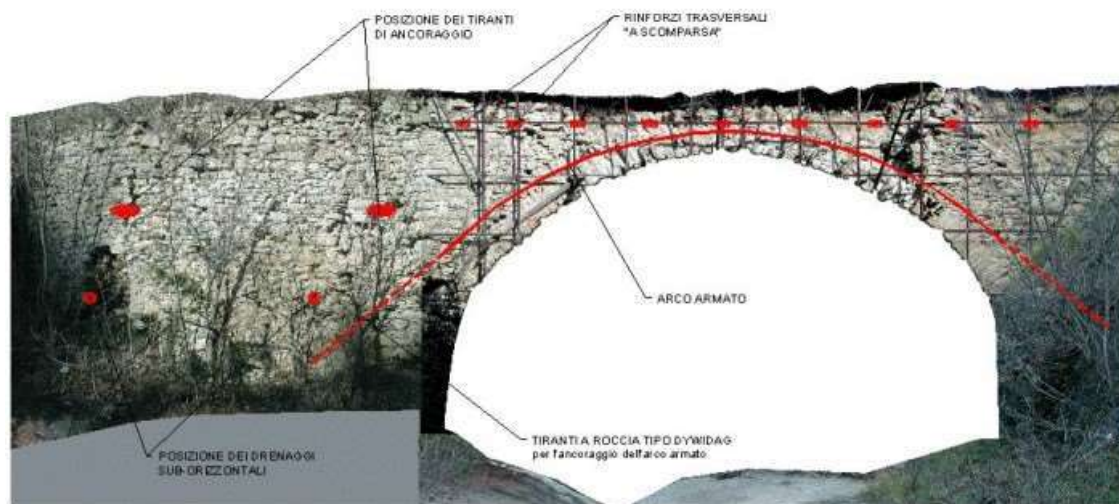
Prvi slučaj u kojem se RAM metoda koristila kao pojačanje lučne konstrukcije je u slučaju pješačkog mosta iz 14. stoljeća koji se nalazi u Italiji – Sogliano al Rubicone. Most je bio u kritičnom stanju pred rušenjem zbog ispadanja zidanih kamenih blokova luka. Zidana konstrukcija bila je međusobno nepovezana te više nije bila u mogućnosti nositi vlastitu težinu. Slika 40 prikazuje dio mosta na kojem je vidljiva nepovezanost između blokova te mjesta na kojima su neki blokovi iskliznuli sa mjesta.



Slika 41. Stanje urušavajućeg mosta [7]

Početne sanacije (zazidavanje srušenih zona, injektiranje vezivom, sanacija pukotina) provedene su kako bi se povratio izgled konstrukcije i omogućio pješački promet po mostu no isti nije zadovoljavao potresne propise. Zbog navedenog razloga implementirana je RAM metoda.

Ugrađene su tri čelične zatege na poziciji ekstradosa luka unutar ispune mosta koje su usidrene u temelje mosta. Napinjanjem kablova postiže se djelotvorni učinak međusobnog tlačenja blokova kojim se zatvaraju nastale pukotine i stvara kompaktnija konstrukcija. Zahvaljujući ovom zahvatu povećana je nosivost mosta ne samo na gravitacijska već i na potresna djelovanja. Na slikama 42 i 43 prikazan je način i dio izvođenja pojačanja te na slici 44 prikazan je izgled mosta nakon svih radova.



Slika 42. Planirani zahvat [7]



Slika 43. Postavljanje RAM kablova na ekstradosu luka [7]



Slika 44. Izgled obnovljenog mosta [7]

2.6. Osvrt na konzervatorske preporuke

Prilikom obnove konstrukcija zaštićene kulturne baštine javljaju se problemi koji ograničavaju primjenu suvremenih građevinskih propisa. Kako bi se sačuvala kulturna baština te se provele metode analize i restauracije ili konzervacije potrebno je pridržavati se određenih preporuka. Povodom navedenoga 2003. godine izdana je povelja ICOMOS-a [13] (International Council On Monuments and Sites) međunarodnog strukovnog udruženja za očuvanje i zaštitu kulturne baštine. Cjelokupni popis principa može se pronaći u [13] dok će u nastavku biti navedeni neki od principa povezanih uz temu ovog rada.

PRINCIPI:

1.7. Ne treba poduzimati nikakve aktivnosti, a da se prethodno ne utvrdi koja se korist može ostvariti i kakva šteta može nastati za graditeljsko nasljeđe, osim u slučajevima kada su neophodne hitne mjere kako bi se izbjeglo prijetće urušavanje konstrukcija (npr. uslijed oštećenja izazvanih potresom); međutim, primjenom tih hitnih mjera trebalo bi kada je to moguće, izbjeći nepovratnu promjenu materijala.

2.3. U konzervatorskoj praksi potrebno je potpuno razumijevanje karakteristika konstrukcije i materijala. Ključne su informacije o izvornom stanju konstrukcije i njenim kasnijim stanjima, tehnikama koje su korištene u izgradnji, izmjenama i njihovim posljedicama o pojavama koje su se dogodile i konačno o sadašnjem stanju konstrukcije

3.6. Projektiranje zahvata treba se temeljiti na jasnom razumijevanju vrsta djelovanja koje su uzrokovale oštećenje i propadanje, kao i onih koje se uzimaju u obzir za analizu konstrukcije nakon zahvata jer će projekt zavisiti od njih.

3.7. Izbor između „tradicionalnih“ i „inovativnih“ tehnika treba prosuditi od slučaja do slučaja, a prednost bi trebalo dati tehnikama koje su najmanje invazivne i najkompatibilnije s vrijednostima nasljeđa, pritom imajući u vidu zahtjeve u pogledu sigurnosti i trajnosti.

3.9. Kada je moguće, sve usvojene mjere trebale bi biti „reverzibilne“ kako bi se mogle ukloniti i zamijeniti prikladnijim mjerama kada se steknu nova saznanja. Tamo gdje nisu potpuno reverzibilne, intervencije ne bi trebale ograničavati buduće intervencije.

3.10. Treba u potpunosti utvrditi svojstva materijala koji se koristi u restauratorskim radovima (naročito novijih materijala) i njihovu kompatibilnost s postojećim materijalima. Pritom se moraju uzeti u obzir dugotrajni utjecaji, kako bi se izbjegle neželjene nuspojave.

3.12. Pri svakoj intervenciji trebalo bi što je više moguće poštovati koncept, tehnike i povijesne vrijednosti izvornog stanja konstrukcije ili njezinih kasnijih stanja, te ostaviti dokaz koji se budućnosti može prepoznati u budućnosti.

3.14. Uklanjanje ili izmjenu bilo kojeg povijesnog materijala ili prepoznatljivih arhitektonskih obilježja treba izbjegavati kad god je to moguće.

3.17. Rastavljanje i ponovno sastavljanje treba poduzeti samo kao opcionalnu mjeru koju zahtjeva sama priroda materijala i konstrukcije kad je konzervacija na drugi način nemoguća ili štetna.

3.18. Privremeni zaštitni sustavi korišteni tijekom intervencije trebali bi služiti svojoj svrsi i namjeni bez nanošenja štete vrijednostima baštine.

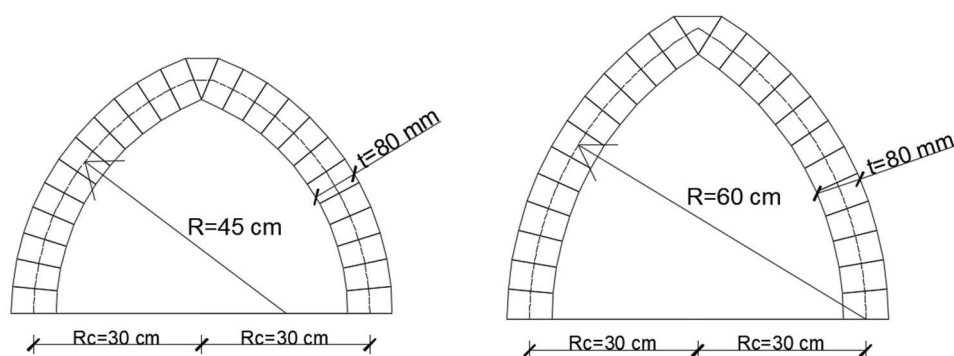
2.7. Usporedba metoda pojačanja

Tablica 4. Usporedba različitih metoda pojačanja

RAM metoda		PAV metode		TAM metode		AB ljuska	
POZITIVNO	NEGATIVNO	POZITIVNO	POZITIVNO	POZITIVNO	NEGATIVNO	POZITIVNO	NEGATIVNO
Povećanje duktilnosti i sile sloma pod koncentriranim opterećenjem	Složena primjena na intrados	Mogućnost primjene na intrados i ekstrados	Stabilnost i mehanizam sloma ovisi o poziciji pojačanja	Mogućnost primjene na intrados i ekstrados	Stabilnost i mehanizam sloma ovisi o poziciji pojačanja		Moguća primjena samo na ekstrados
Povećanje potresne otpornosti		Mala težina	Relativno skupa metoda (skup materijal)	Mala težina			Povećana vlastita težina konstrukcije
Kontrola sile napinjanja kablova	Kontrola sile napinjanja kablova	Jednostavna ugradnja	Duktilnost luka ovisit će o vrsti materijala pojačanja	Jednostavna ugradnja	Duktilnost luka ovisit će o vrsti materijala pojačanja		Nije reverzibilna metoda
Aktivna metoda odmah nakon ugradnje		Širok izbor materijala u ovisnosti o pojačanju i sanaciji	Vidljiva metoda na konstrukciji ukoliko je na intradosu – konzervatorski nepovoljno	Širok izbor materijala u ovisnosti o pojačanju i sanaciji	Vidljiva metoda na konstrukciji ukoliko je na intradosu – konzervatorski nepovoljno		
Mogućnost „sakrivanja“ pojačanja – konzervatorski povoljno		Povećanje potresne otpornosti		Povećanje potresne otpornosti			
Mogućnost primjene na intrados i ekstrados				Poroznost matrice – konstrukcija „diše“			
Mala težina				Reverzibilan postupak			
				Dobra protupožarna svojstva			

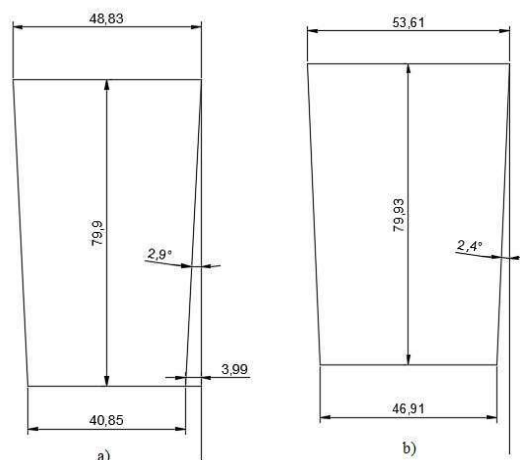
3. EKSPERIMENTALNI MODELI

U ovom poglavlju biti će prikazana provedena ispitivanja na modelima šiljastih lukova. Izrađena su dva drvena modela koja su potom opterećena na četvrtini raspona luka, modeli su ispitani bez pojačanja te sa pojačanjem na ekstradosu i na intradosu simulacijom TAM i PAV metode pojačanja. Pojačani su ljepljivom trakom pojačanom vlaknima tkanine takozvanom „Duct Tape“. Modeli se razlikuju po geometriji, oba modela imaju jednak osni raspon luka u iznosu od 60 cm i broj blokova. Radijus zakrivljenosti luka je drugačiji kod dvaju modela, kod nižeg luka nazvanog luk M radijus zakrivljenosti jednak je 45 cm te se centar zakrivljenosti nalazi na četvrtini raspona luka dok kod višeg luka nazvanog luk V radijus zakrivljenosti iznosi 60 cm te se centar zakrivljenosti nalazi u osloncu luka (slika 45.)



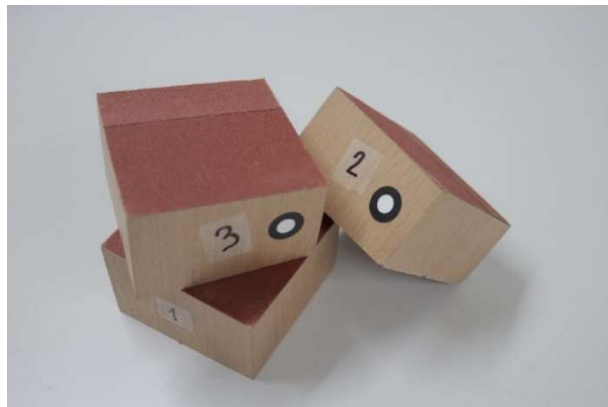
Slika 45. Geometrija lukova

Osim po zakrivljenosti lukovi se razlikuju i po dimenzijama blokova. Na slici 46 prikazane su dimenzije blokova pojedinih lukova.



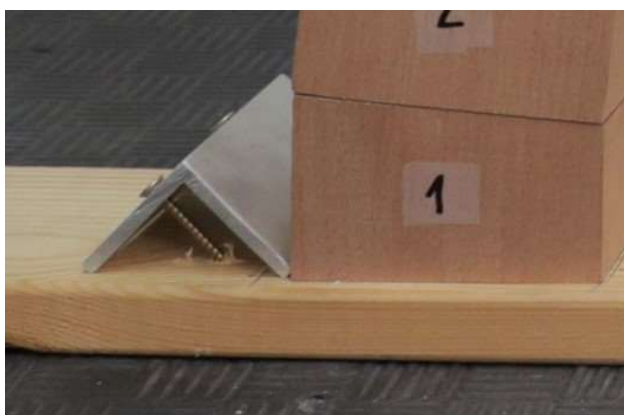
Slika 46. Dimenzije blokova a) luka M te b) luka V

Modeli su izrađeni od drva (korištena je bukva) te kako bi simulirali stvarno ponašanje kamenih blokova između blokova postavljen je brusni papir kako bi se povećalo trenje između blokova te kako ne bi došlo do preranog proklizavanja, kako bi se čim više simuliralo stvarno stanje ponašanja blokova (slika 47). Korišten je brusni papir granulacije P150.



Slika 47. Brusni papir na gornjoj strani blokova

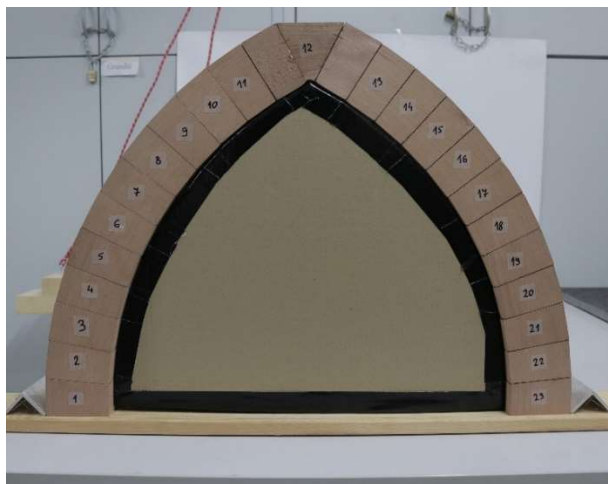
Što se tiče oslonaca konstrukcije luka, potrebno je da oslonci omogućuju rotaciju bloka a onemogućuju horizontalno i vertikalno pomicanje. Kao oslonce iskoristili smo aluminijski L profil postavljen i fiksiran kao na slici 48.



Slika 48. Oslonac koji omogućava rotaciju blokova

Oba modela sastoje se od 23 bloka, od kojih su 22 bloka jednaka, dok se zaglavni blok sastoji od 2 „trapezna“ bloka i središnjeg „trokutnog“ bloka koji su međusobno zalijepljeni

U konačnici modeli su izgledali kao na slikama 59 i 50, gdje se može vidjeti i oplata izrađena od kartona



Slika 49. Izgled modela M



Slika 50. Izgled modela V

Kao što je prethodno navedeno, pojačanje je simulirano ljepljivom trakom pojačanom vlaknima, takozvanom Duct Tape. Proizvođač ljepljive trake daje slijedeća svojstva za traku TEXO American duct tape:

Debljina trake: 0,19 mm

Vlačna nosivost: 31,6 N/cm

Adhezija (čelik): 4,8 N/cm

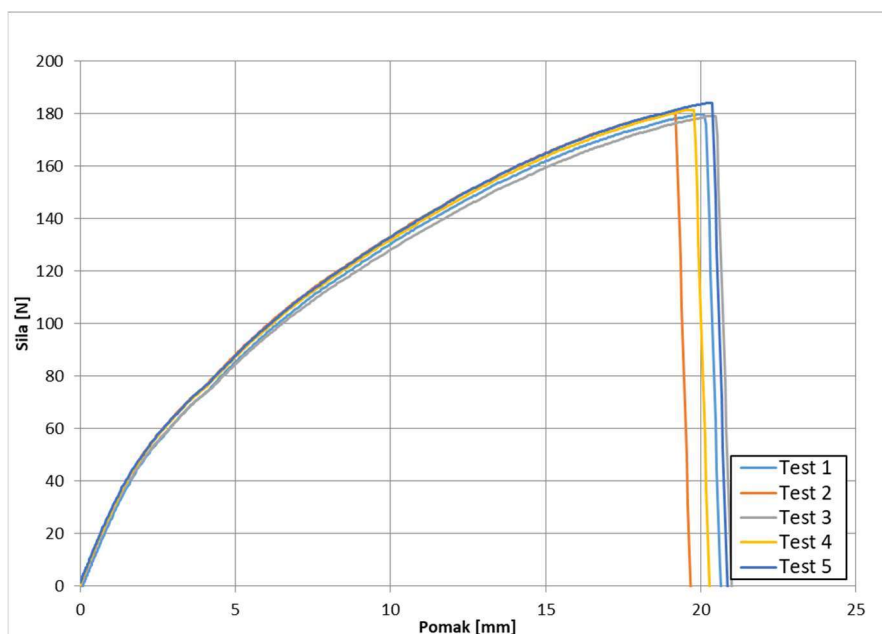
Širina trake: 50 mm

Sastav: PVC + PE + tkanina

Osim priloženih svojstava od strane proizvođača, provedeno je ispitivanje na vlak tzv. ispitivanje kidanjem. Prema normi HRN EN ISO 29864:2019 na uređaju za ispitivanje ispitano je šest jednakih uzoraka (jedan je uzorak odbačen jer je došlo do pucanja preblizu mjesta pridržanja). Tokom ispitivanja uređaj je pratio vrijednost sile te pomak čeljusti, razvlačenje trake. Nakon provedenog ispitivanja dobiveni su grafovi u ovisnosti o sili i pomaku prikazani u nastavku.



Slika 51. Uzorci trake pripremljeni za ispitivanje



Graf 1. Graf ispitivanja uzoraka

Na grafu je vidljivo da se uzorci pretjerano ne razlikuju, srednja vrijednost sile potrebna za slom iznosi 181 N.

Proveden je veći broj ispitivanja te je detaljniji pregled korištenih modela i njihovih naziva prikazan u tablicama 5 i 6.

Tablica 5. Modeli korišteni za statička ispitivanja

Modeli	Bez pojačanja	Pojačanje ekstradosa	Pojačanje intradosa
M	M01	ME1	MI1
	M02	ME2	MI2
	M03	ME3	MI3
V	V01	VE1	VI1
	V02	VE2	VI2
	V03	VE3	VI3

Tablica 6. Modeli korišteni za ispitivanje na potresnom stolu

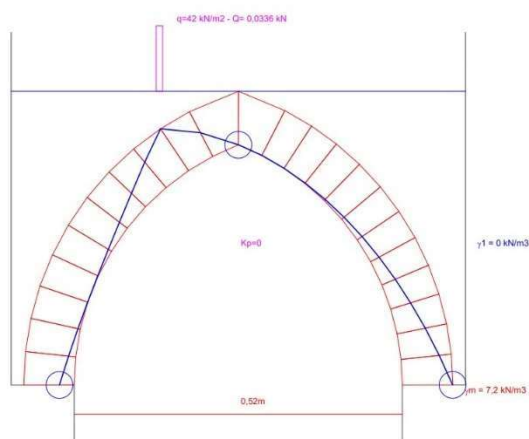
Modeli	Bez pojačanja	Pojačanje ekstradosa	Pojačanje intradosa
M	M01P	ME1P	MI1P
	M02P	ME2P	

Oznake:

M – mali V – veliki 0 – bez pojačanja E – pojačanje ekstradosa
I – pojačanje intradosa 1,2,3 – broj testa P – potresni stol

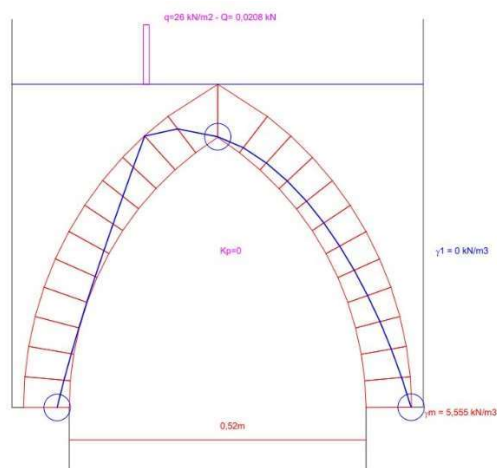
Prije provođenja ispitivanja uz pomoć programa „Arco“ [18] koji se temelji na statičkom teoremu teorije plastičnosti za zadane ulazne podatke (geometrija luka, gustoća materijala blokova i opterećenja) dobiven je položaj tlačne linije luka. Postupnim povećanjem opterećenja (metodom pokušaja i pogreške) dobiveni su slijedeći rezultati za dva modela bez pojačanja.

Za model M kojem je radijus zakrivljenosti $R=45$ cm na kojem je opterećenje nanoseno na četvrtini raspona dobiveni su rezultati sa slike 52. Tlačna linija tangira granice luka prilikom nanosene sile 33,6 N.

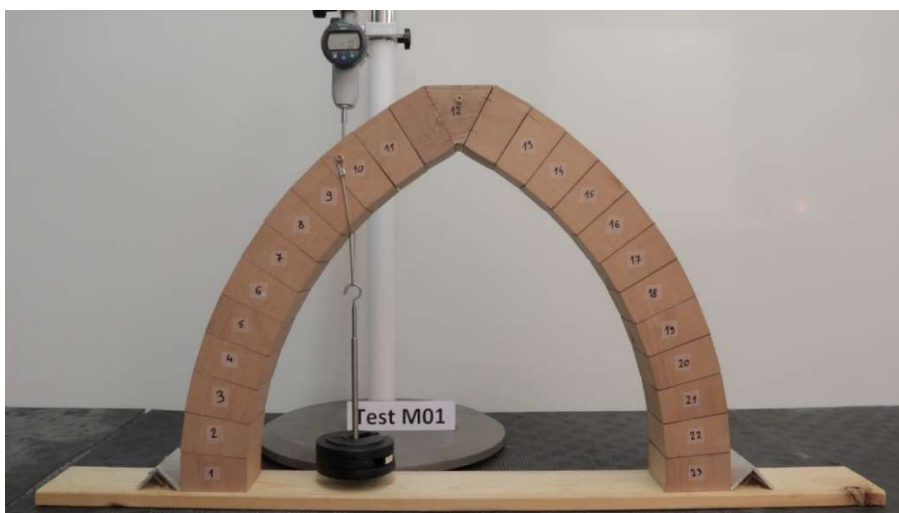


Slika 52. Granično opterećenje luka i položaj tlačne linije luka M dobiven programom Arco

Kod modela V kojem je radijus zakrivljenosti $R=60$ cm opterećenje je nanoseno na istoj poziciji (četvrtini raspona) dobivena je sila sloma u iznosu od 20,8 N (slika 53.)



Slika 53. Granično opterećenje luka i položaj tlačne linije luka V dobiven programom Arco



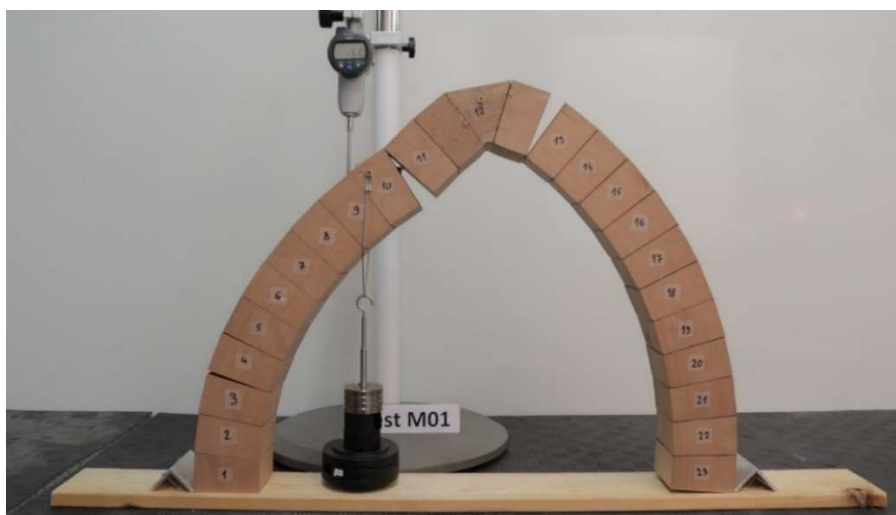
Slika 55. Model M : otvaranje prvog zgloba između bloka 10 i 11



Slika 56. Model M : otvaranje drugog zgloba između bloka 12 i 13



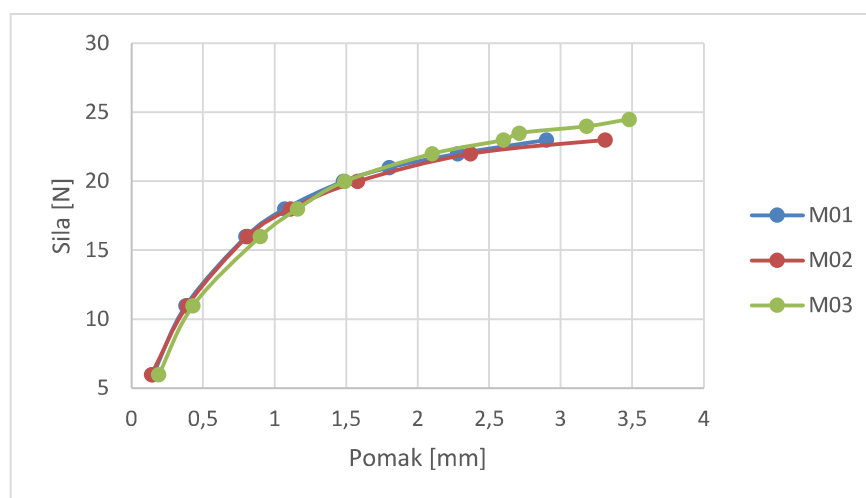
Slika 57. Model M : otvaranje trećeg zgloba između blok 23 i oslonca



Slika 58. Model M : otvaranje četvrtog između bloka 3 i 4 (formiranje mehanizma)

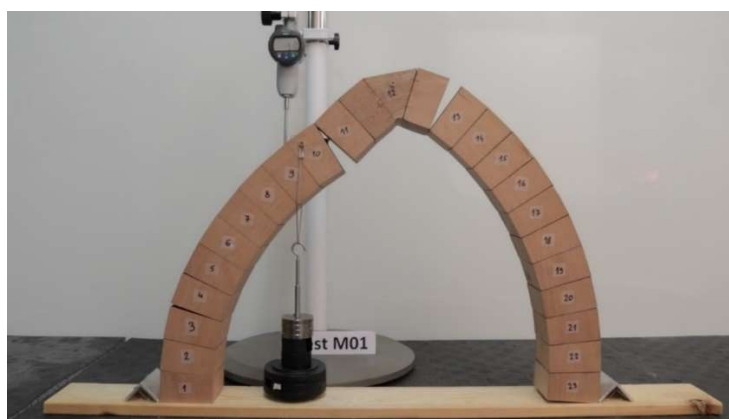
Na slici 57 može se uočiti kako su otvorena 3 zgloba (formiran je trozglojni luk), uslijed otvaranja četvrtog zgloba (slika 58) konstrukcija prelazi u mehanizam te dolazi do rušenja. U nastavku su prikazani grafovi opterećenje/pomak za modele bez pojačanja – provedena su 3 testa (M01, M02, M03).

Na grafu 2 vidljivo je kako je do sloma konstrukcije došlo pri opterećenju oko 24 N te pomaku od 3 do 3,5 mm. U usporedbi sa graničnom silom dobivenom u programu Arco koja je iznosila 33,6 N dobivena je manja vrijednost za 29%. Navedena razlika posljedica je nesavršenosti drvenog modela što uključuje nesavršenosti u geometriji (odstupanja od izvorne geometrije), problem da blokovi ne naliježu idealno jedan uz drugi, te oštećenja rubova blokova koja nastaju pri rušenju modela.



Graf 2. Prikaz rezultata modela M bez pojačanja

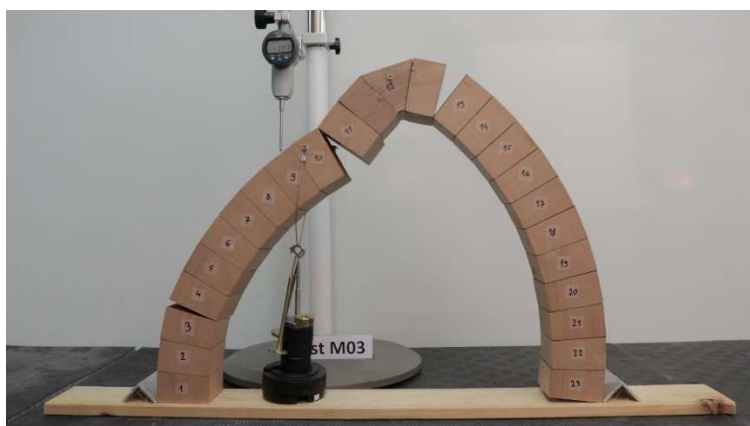
U nastavku slijedi prikaz svih ispitanih modela M bez pojačanja i njihovih mehanizama sloma.



Slika 59. Model M01 – mehanizam sloma



Slika 60. Model M02 – mehanizam sloma

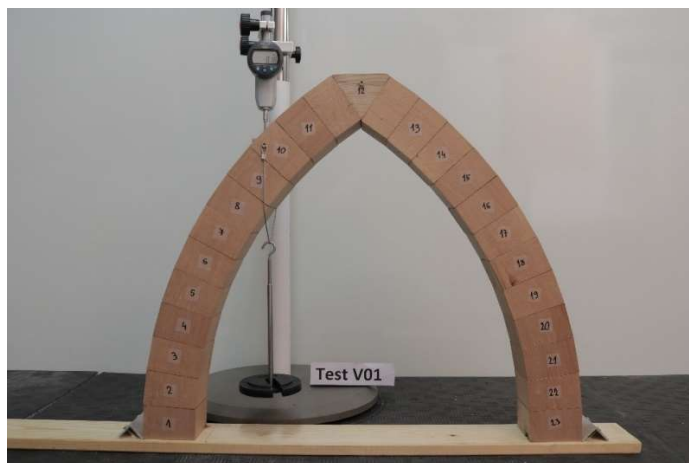


Slika 61. Model M03 – mehanizam sloma

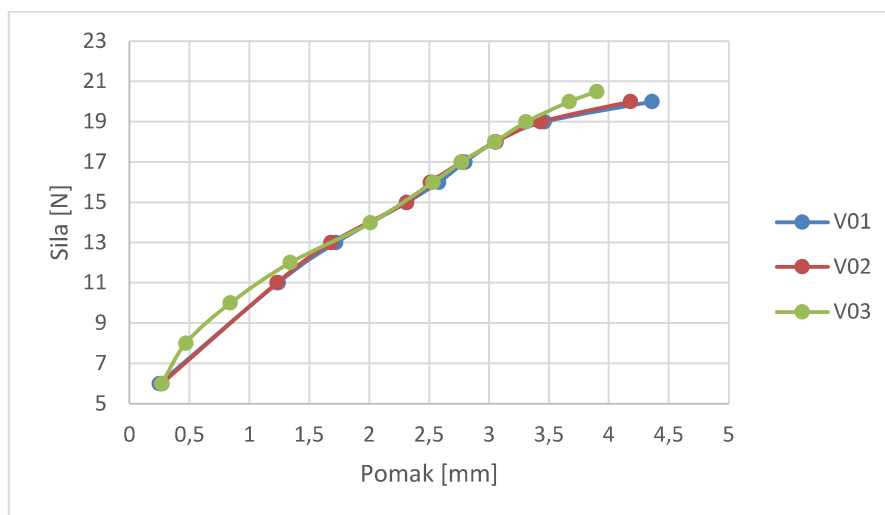
Na slikama je vidljivo kako su u svim ispitivanjima dobiveni isti mehanizmi sloma (otvoreni zglobovi između blokova 3 i 4, 10 i 11, 12 i 13 te 23 i oslonca).

3.1.2. Ispitivanje modela V

Istim postupkom ispitan je i model V (slika 62), opterećenje je nanošeno na četvrtini raspona do trenutka sloma, tokom nanošenja opterećenja mjereno je pomak u točki na kojoj se opterećenje nanosi. Dobiveni su slični rezultati mehanizama sloma kao i na nepojačanom modelu M. U nastavku je prikazan izgled modela prije ispitivanja, graf sa rezultatima ispitivanja te postepeni prikaz toka ispitivanja.

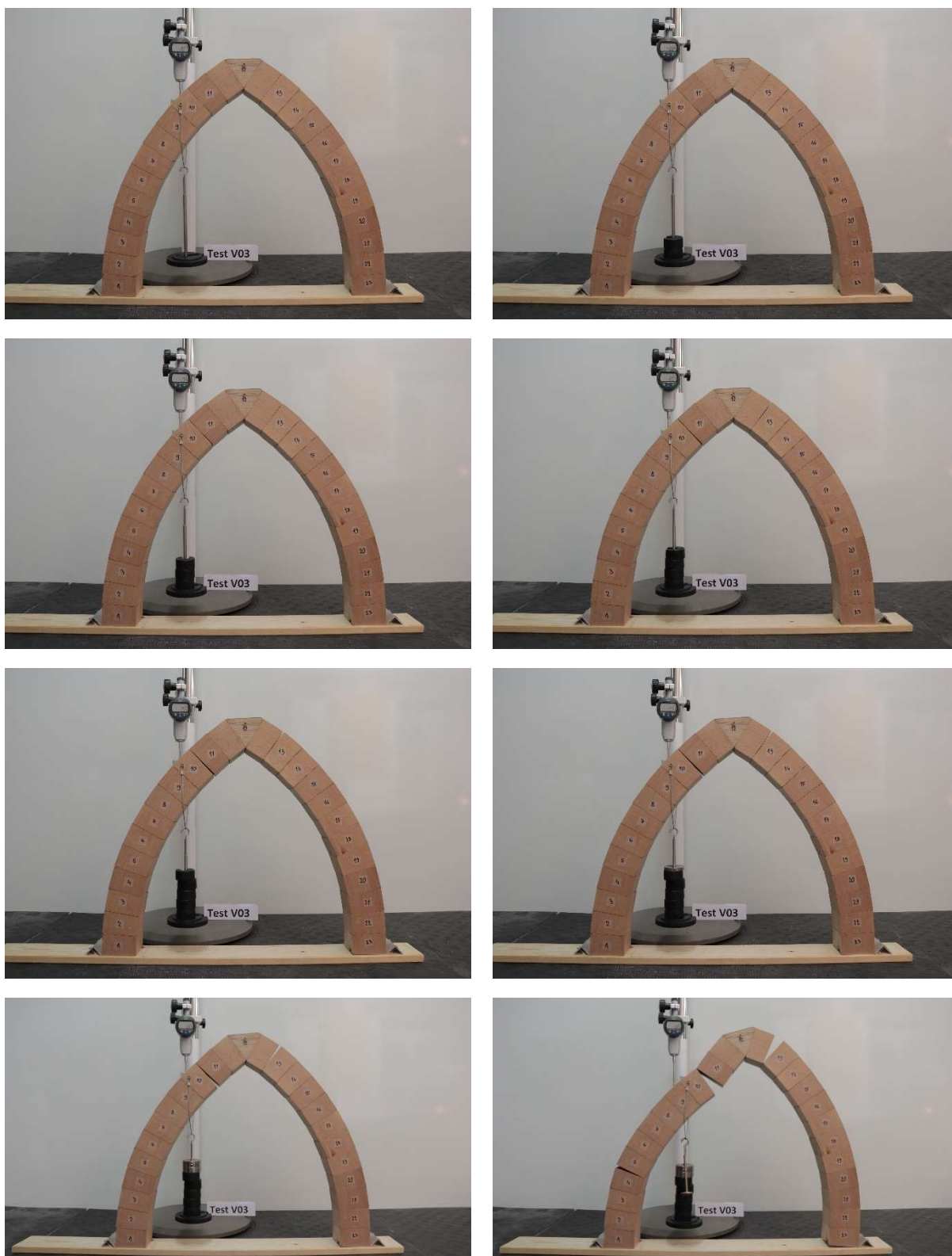


Slika 62. Model V prije ispitivanja



Graf 3. Prikaz rezultata modela V

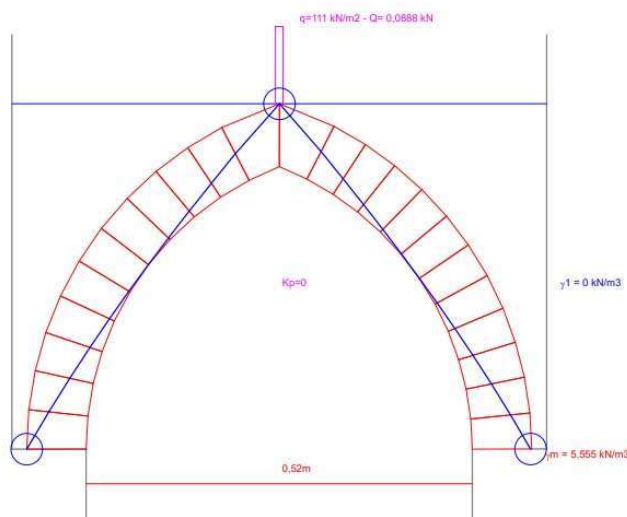
Kod grafa broj 2 za model V vidljivo je kako je granična sila između 19 i 21 N točnije oko 20 N uz pomak od 4 mm što nam daje rezultat poprilično jednak dobivenom u programu Arco koji je iznosio 20,8 N.



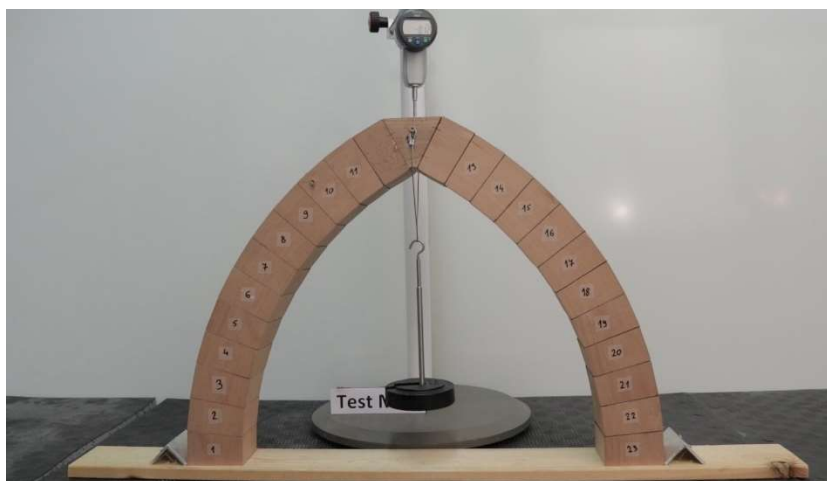
Slika 63. Prikaz toka ispitivanja modela V bez pojačanja

3.1.3. Model M opterećen koncentriranom silom na polovini raspona

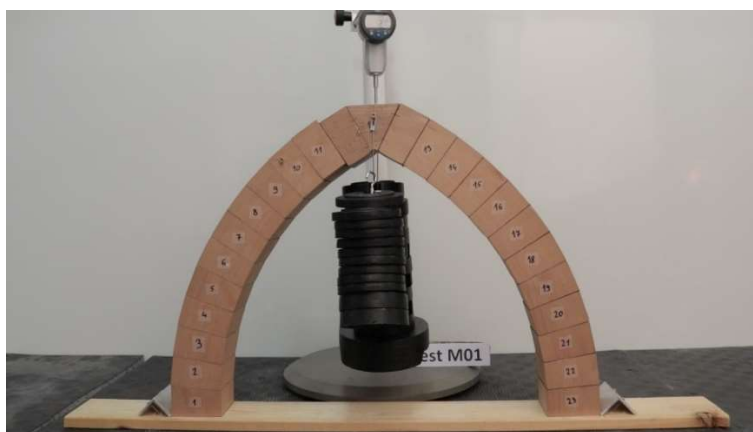
Provedeno je i jedno probno ispitivanje na nepojačanom modelu M kada opterećenje djeluje na polovini raspona konstrukcije. Također su dobiveni računski rezultati uz pomoć programa Arco [18] (slika 64), uz pomoć kojih je dobivena granična sila od 88,8 N. Tokom ispitivanja dobili smo podatke koji su upućivali na mnogo veću nosivost modela nego što je dobiveno u programu.



Slika 64. Granična sila i položaj tlačne linije dobivene programom Arco

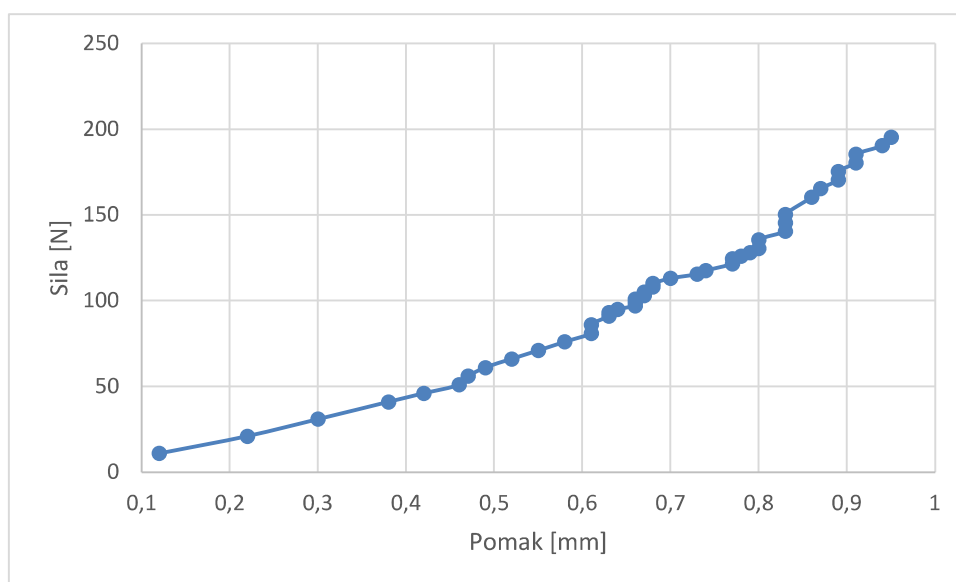


Slika 65. Model M prije ispitivanja koncentriranom silom u sredini raspona



Slika 66. Klizanje između blokova 11 i 12 na kraju ispitivanja

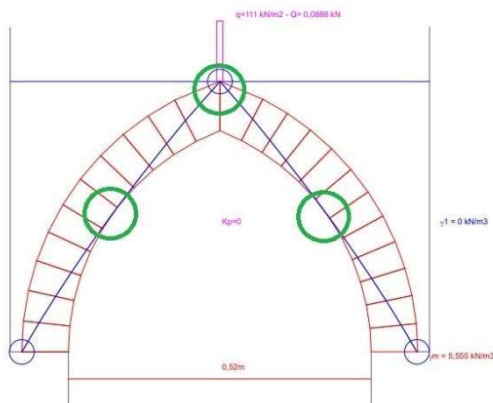
Na slici 66 vidljiva je velika količina korištenih utega za opterećenje modela, naime sila pri kojoj je model počeo popuštati iznosila je 200 N što je za 225% veća sila od dobivene računske od 88,8 N (graf 4). Zaključeno je kako je do velikog povećanja granične sile došlo zbog jednog faktora a to je geometrija zaglavnog kamena. Naime u programu Arco [18] zaglavni kamen ne postoji već se vrh luka sastoji od dva oslonjena bloka te se opterećenje nanosi na spoj tih dvaju blokova.



Graf 4. Prikaz rezultata nepojačanog modela M opterećenog na polovini raspona

Kad bi se navedeni model iz programa promatrao u stvarnosti zglob bi se otvorio na poziciji ekstradosa direktno ispod spoja dvaju blokova na kojem se nanosi opterećenje te zatim bi se otvorili blokovi na intradosu na pozicijama gdje potporna linija tangira intrados luka (slika 67).

Kod drvenog modela koji se razlikuje od prethodno navedenog ovo nije moguće zato jer postoji zaglavni kamen koji direktno ravnomjerno raspoređuje opterećenje u bočne blokove te nije moguće otvaranje zgloba direktno ispod mjesta opterećenja.



Slika 67. Pozicije otvaranja zglobova kod modela bez zaglavnog kamena

3.2. Ispitivanje modela s pojačanjem na ekstradosu

3.2.1. Ispitivanje modela M s pojačanjem na ekstradosu

Kao pojačanje modela korištena je ljepljiva traka pojačana vlaknima „TEXO American Duct Tape“, traka bi se položila na ekstrados te lagano utisnula kako bi se ravnomjerno zalijepila kontinuirano po cijeloj duljini ekstradosa luka, na kraju luka kod oslonca traka je usidrena u zadnji blok. Na slici 68 prikazan je oblik pojačanja uz pomoć ljepljive trak, dok je na slici 69 prikazan je oblik sidrenja.



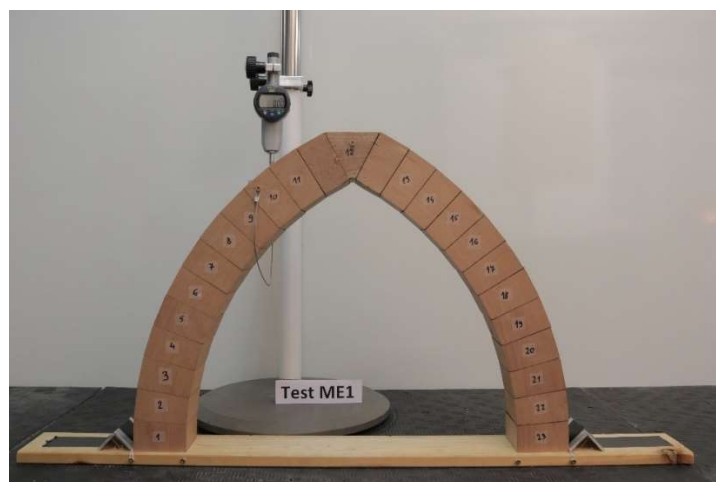
Slika 68. Pojačanje ekstradosa



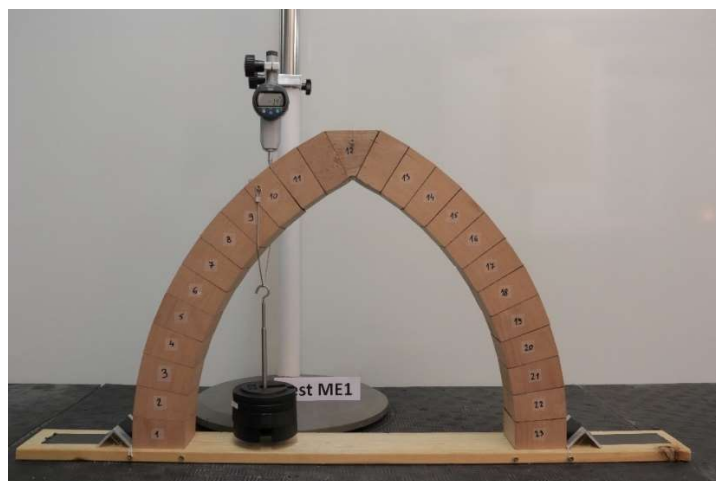
Slika 69. Detalj sidrenja pojačanja na osloncu

Kao što je prethodno navedeno za modele bez pojačanja, svaki model jednako je dokumentiran u nastavku su prikazani rezultati modela pojačanog na ekstradosu (sveukupno tri modela ME1, ME2, ME3).

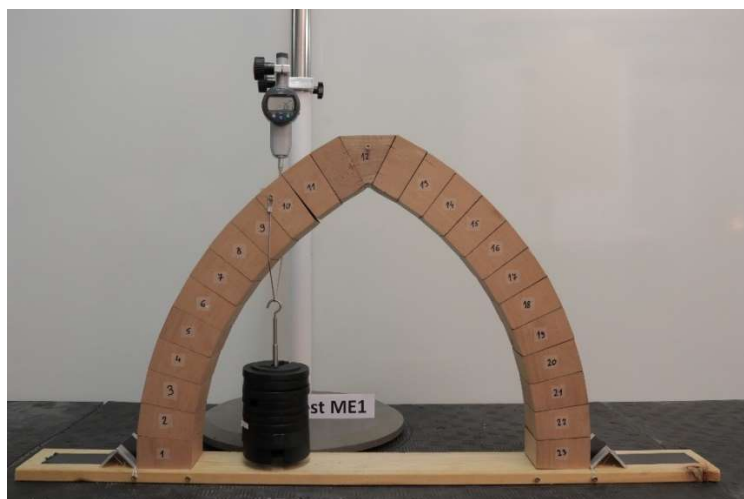
Kod modela sa pojačanjem također dolazi do mehanizma otvaranja zglobova no osim toga dolazi i do klizanja između blokova te odljepljivanja pojačanja.



Slika 70. Model M : izgled modela prije ispitivanja

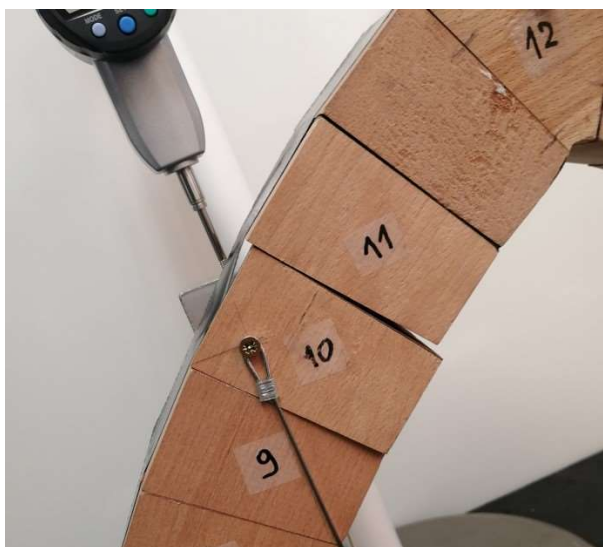


Slika 71. Model M : otvaranje prvog zgloba između blokova 10 i 11



Slika 72. Model M : otvaranje drugog zgloba između bloka 23 i oslonca

Zbog pojačanja na poziciji ekstradosa nije moguće otvaranje zgloba između blokova 12 i 13 na ekstradosu kao na modelu bez pojačanja zato što pojačanje preuzima vlačna naprezanja te onemogućava otvaranje zgloba. Tokom ispitivanja na poziciji nanošenja opterećenja došlo je do odljepljivanja pojačanja od konstrukcije (slika 73). Nakon odljepljivanja uslijedilo je i postepeno klizanje bloka 10 te na kraju do sloma klizanjem (slika 74).

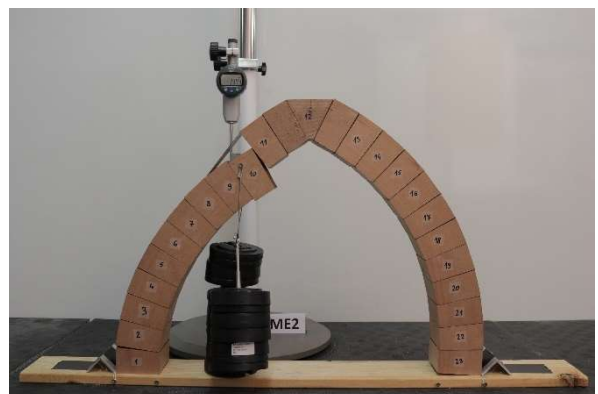
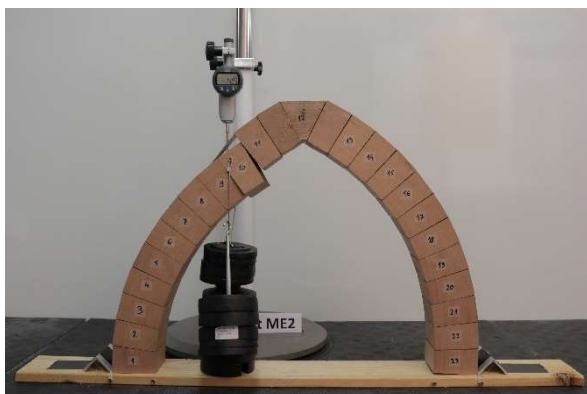
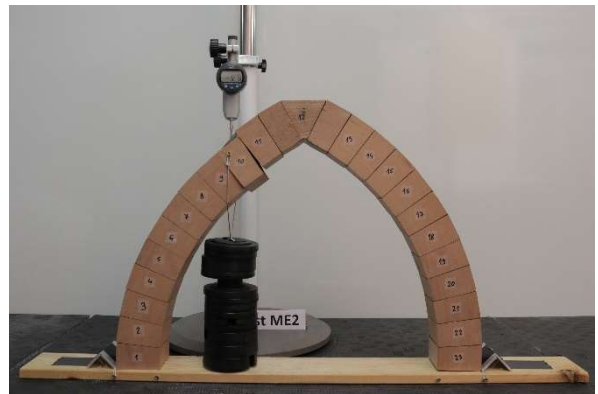
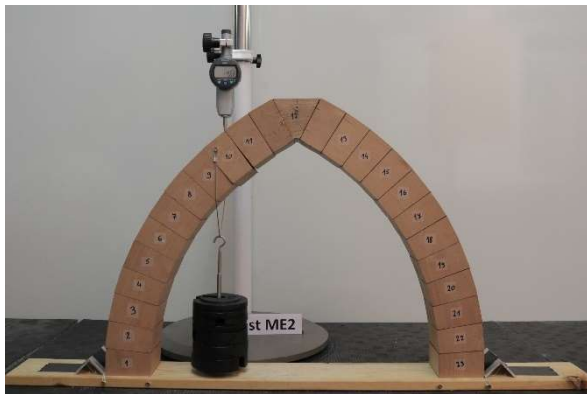
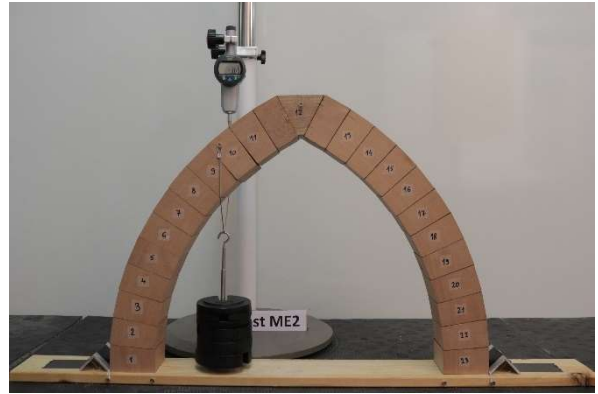
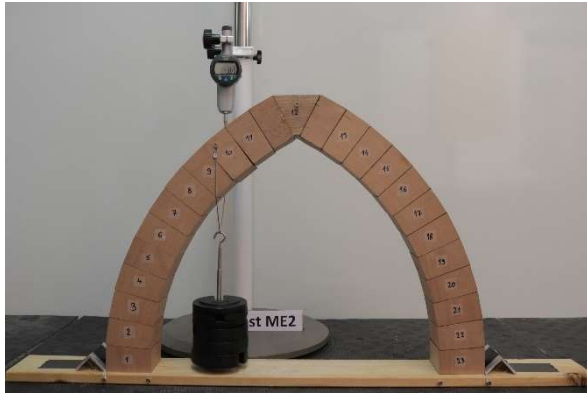
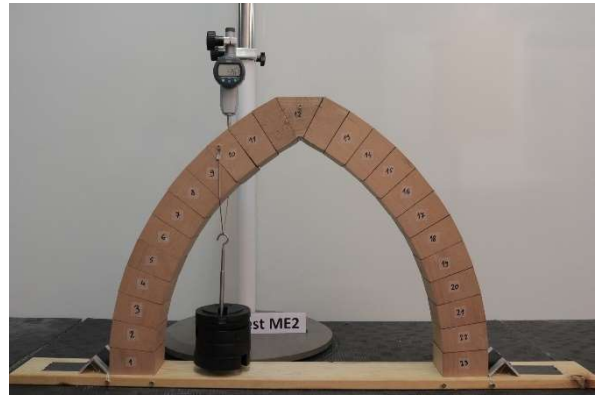
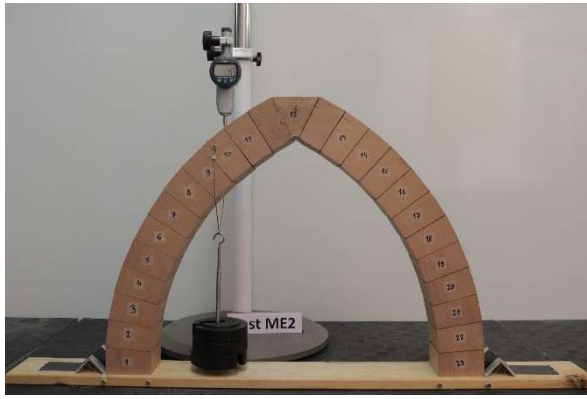


Slika 743 Odljepljivanje pojačanja od bloka

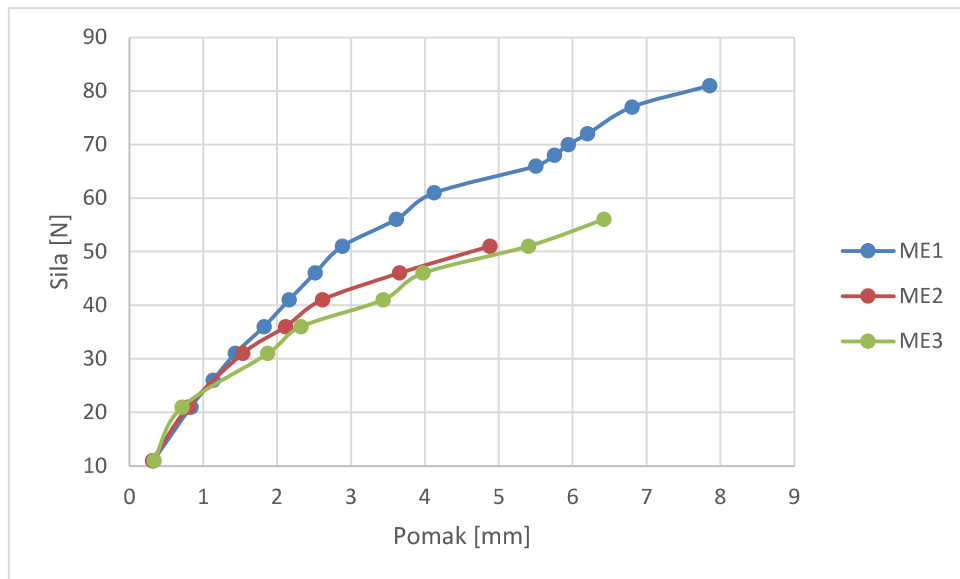


Slika 74. Slom klizanjem i odljepljivanjem

U nastavku je prikazan tok ispitivanja modela ME2.



Slika 75. Ispitivanje modela ME2

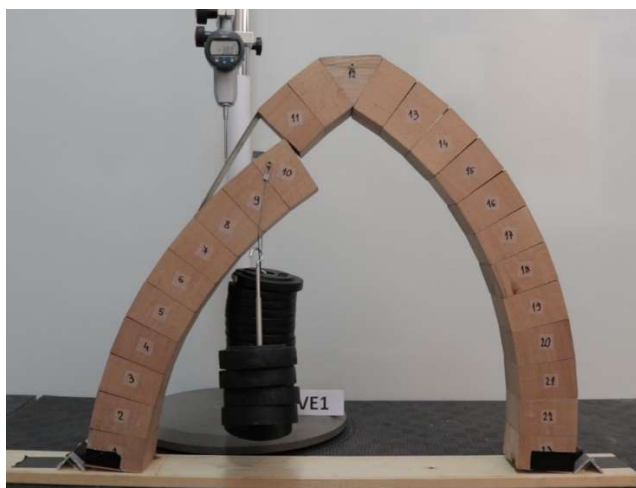


Graf 5. Prikaz rezultata pojačanih modela na poziciji ekstradosa – model M

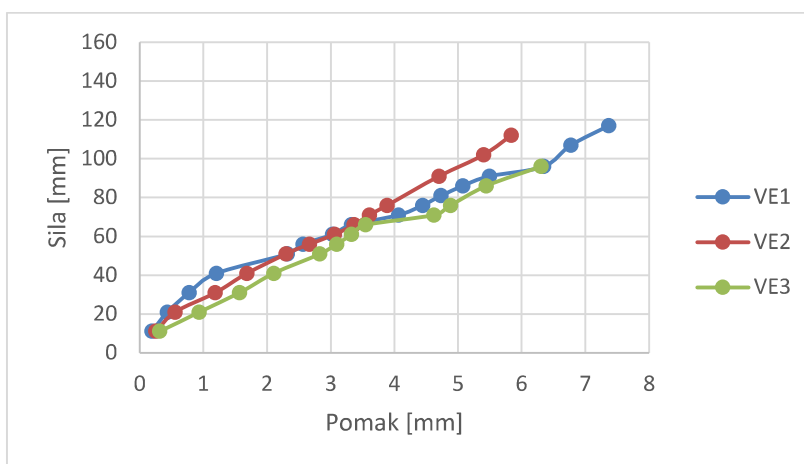
Iz grafa 5 vidljivo je kako su modeli preuzeli puno veća opterećenja od nepojačanih modela. Također je na grafu vidljiv i skok kod vrijednosti pomaka za ME1 između 60 i 65 N, na modelu ME3 između 45 i 50 N. Navedeni skok se odnosi na početak odljepljivanja i klizanja bloka 10 kao na slici 75. Model je bio u mogućnosti preuzeti još opterećenja no isti u stvarnosti ne bi bio uporabljen zbog sve većih pomaka i klizanja te je zaključeno kako je granična sila sloma upravo ta prije nastupanja klizanja blokova, u ovom slučaju srednja vrijednost bila bi oko 50 N što je za 100% veće granično opterećenje nego kod nepojačanog modela M.

3.2.2. Ispitivanje modela V s pojačanjem na ekstradosu

Kod modela V do sloma je došlo istim mehanizmom, otvaranjem zglobova te postepenim odljepljivanjem pojačanja i klizanjem blokova. U nastavku slijedi prikaz luka nakon ispitivanja, te prikaz toka ispitivanja.

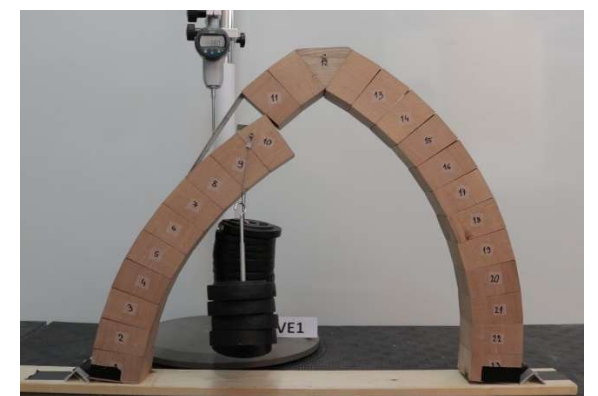
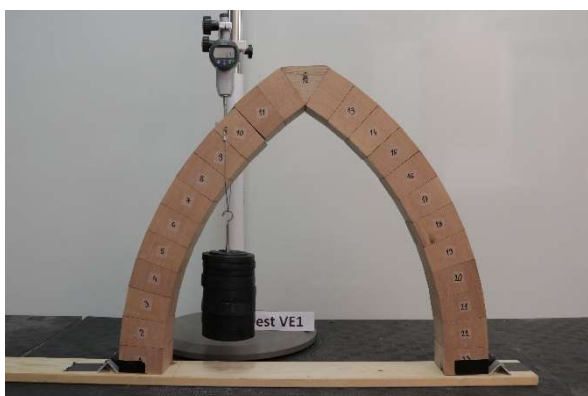


Slika 76. Model VE1 nakon sloma klizanjem i odljepljivanjem



Graf 6. Prikaz rezultata modela V s pojačanjem na ekstradosu

Kao i kod modela M modeli V preuzeli su puno veća opterećenja od nepojačanih modela. Također je ponovno vidljiv skok kod pomaka za model VE1 između 40 i 50 N te model VE3 između 60 i 70 N. Navedeni skok se odnosi na početak odljepljivanja i klizanja bloka 10. Kao i kod modela M granična sila sloma je on prije nastupanja klizanja blokova, u ovom slučaju srednja vrijednost iznosila bi 50 N što je 150% veća vrijednost od nepojačanog modela V.



Slika 77. Ispitivanje modela VE1

3.3. Ispitivanje modela s pojačanjem na intradosu

3.3.1. Ispitivanje modela M s pojačanjem na intradosu

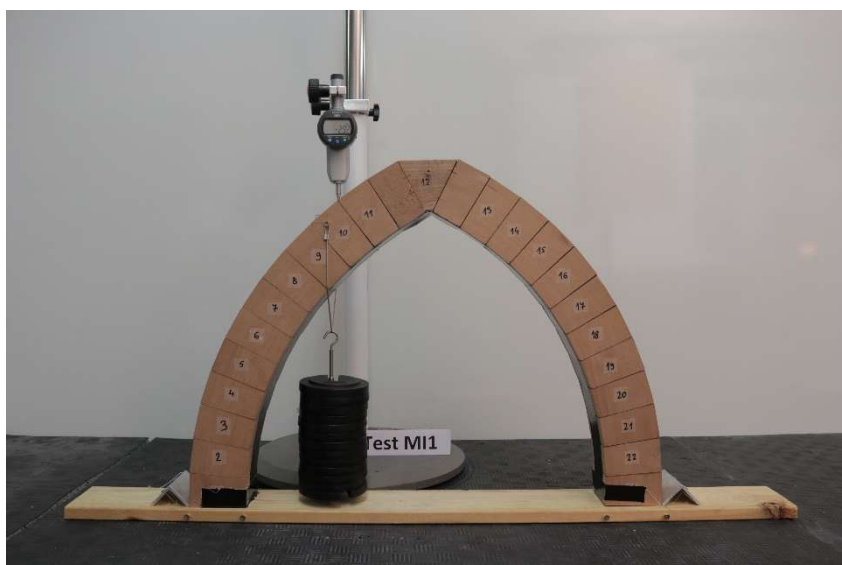
U nastavku je prikazano ispitivanje modela M pojačanih na poziciji intradosa (Slika 78).



Slika 78. Model M s pojačanjem na intradosu

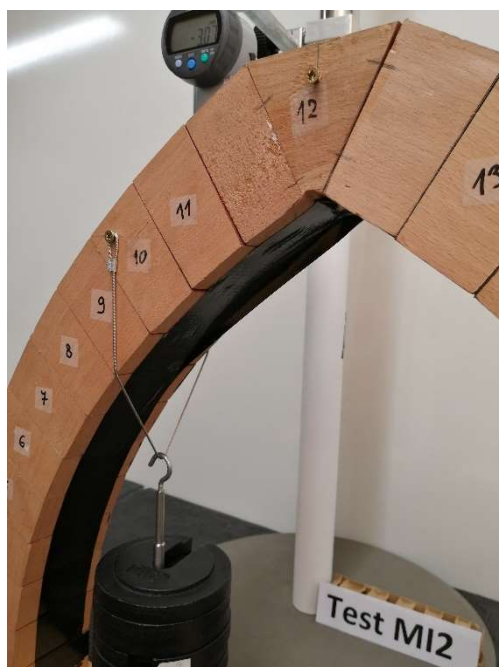
Oblik sidrenja korišten je kao i na pojačanju ekstradosa, sidrenje je provedeno samo na zadnjem bloku kako ne bi došlo do odljepljivanja trake sa zadnjeg bloka. U stvarnosti bi se koristila slična metoda detaljnije opisana u uvodnom poglavlju rada.

Kod pojačanja intradosa dolazimo do interesantnog zaključka, naime nije moguće otvaranje zglobova na između blokova 10 i 11 kao kod prethodnih slučajeva nepojačanog modela te modela pojačanog na poziciji ekstradosa. Navedeno uvelike doprinosi nosivosti konstrukcije zato jer je potrebno da se otvori navedeni zglob kako bi se postepeno otvarali ostali zglobovi, no u ovom slučaju budući da se prvi zglob na intradosu između blokova 10 i 11 ne otvara time se ne otvara niti jedan zglob na ekstradosu između blokova 12 do 17 već se otvara samo zglob na osloncu kod bloka 23 (slika 79).

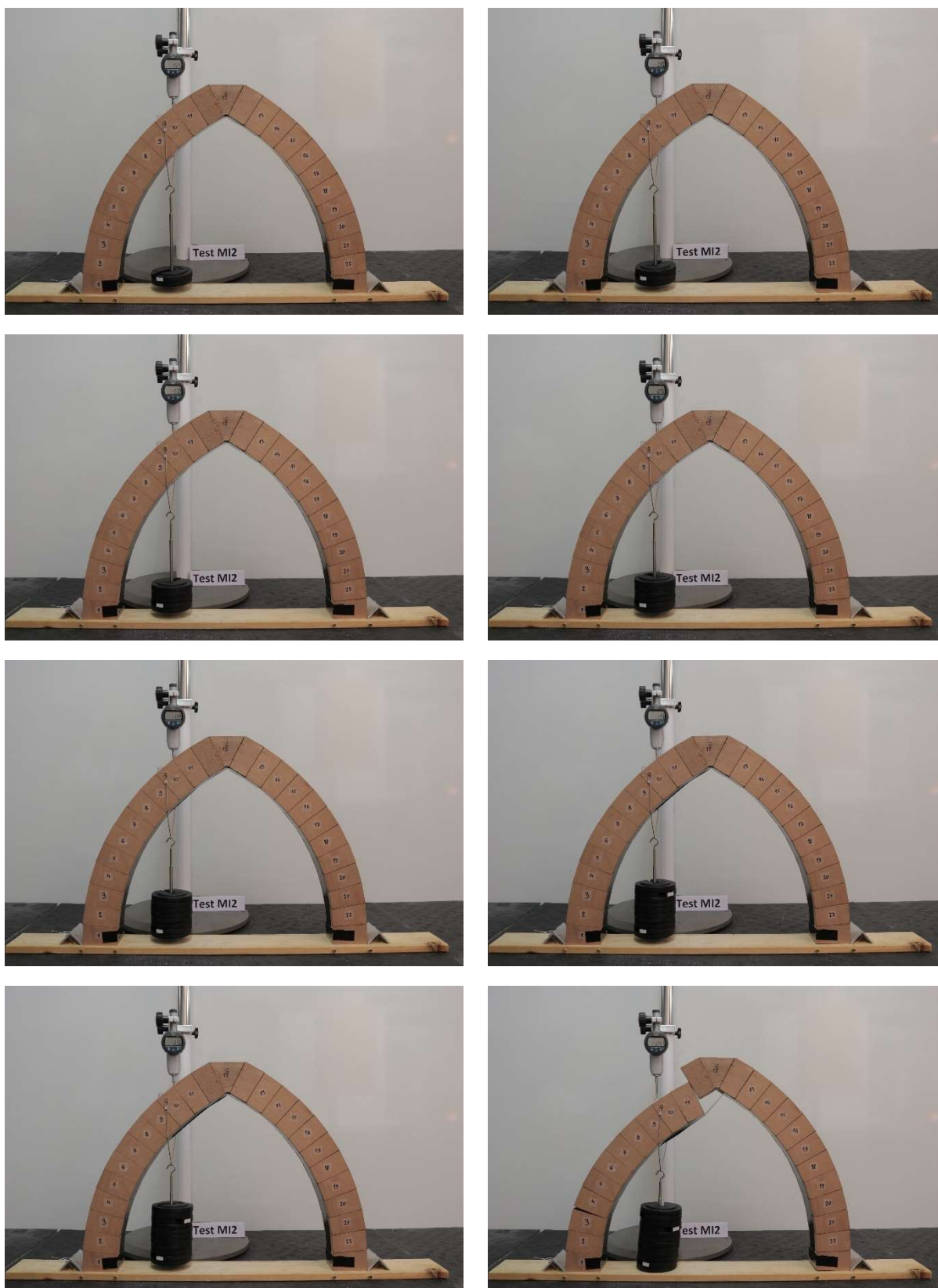


Slika 79. Model M: otvaranje zgloba između bloka 23 i oslonca

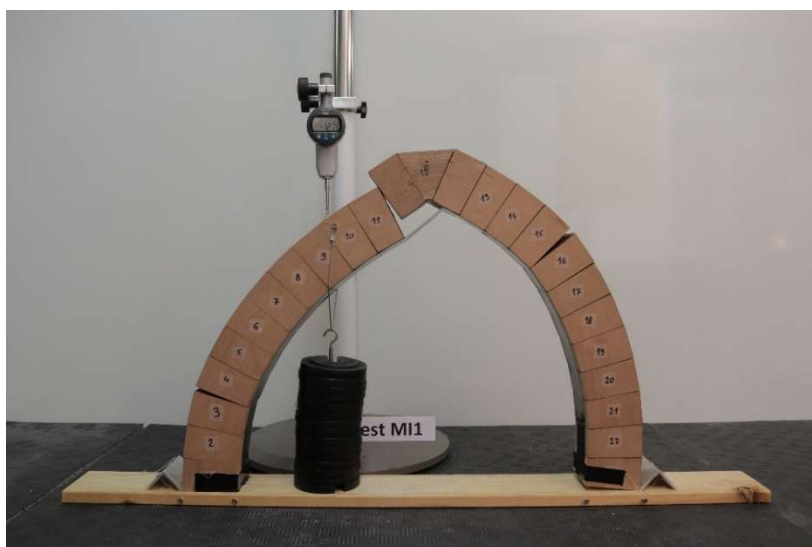
Povećanjem sile postepeno se otvaraju zglobovi na ekstradosu kod blokova 12 do 17 te postepeno dolazi do odljepljivanja trake kod blokova 12 i 11 (slika 80). Postepenim odljepljivanjem dolazi do klizanja blokova te na poslijetku do sloma konstrukcije. Na slici 82 je jasno vidljivo kako su se otvorili zglobovi te došlo do klizanja kod bloka 11.



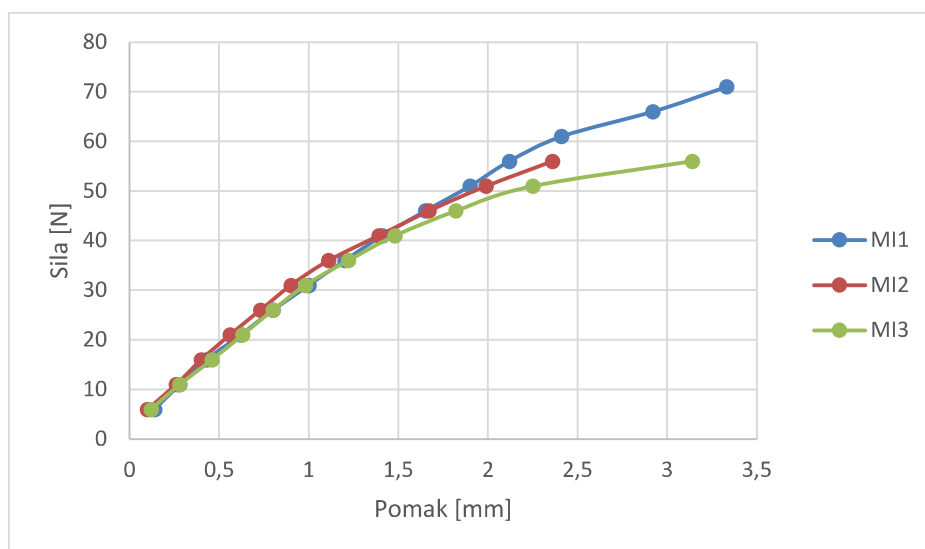
Slika 80. Model M: odljepljivanje pojačanja između blokova 11 i 12



Slika 81. Ispitivanje modela MI2



Slika 82. Model M nakon provedenog ispitivanja

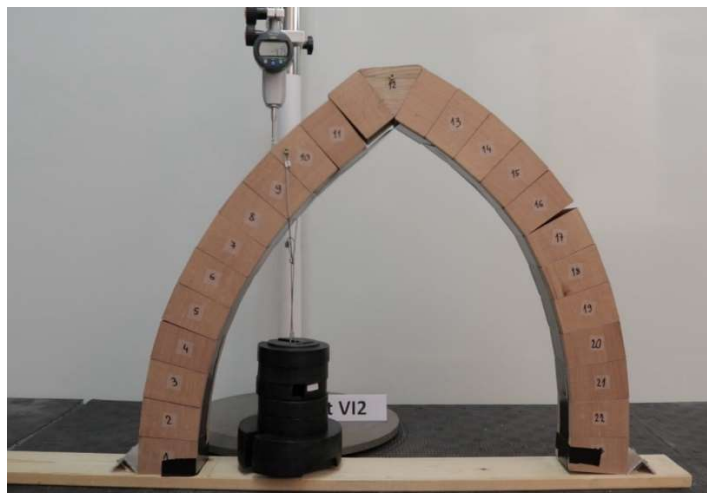


Graf 7. Prikaz rezultata modela M s pojačanjem na intradosu

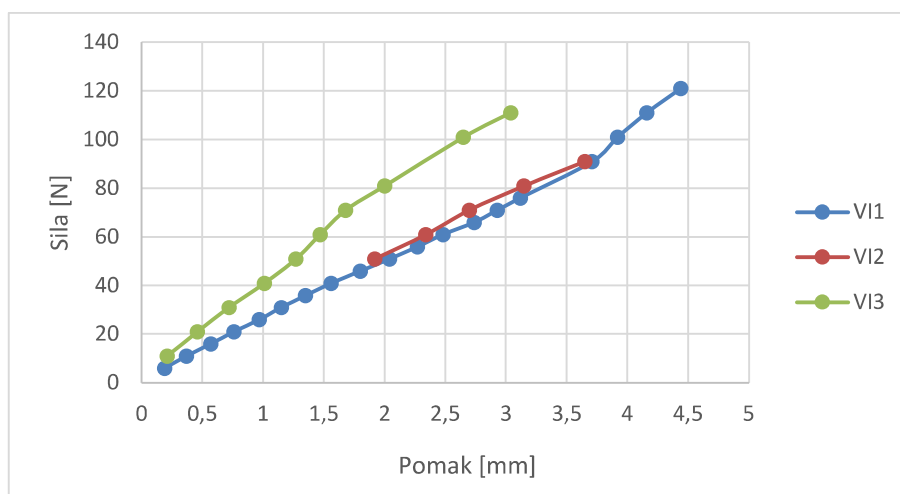
Iz grafa 7 vidljivo je kako modeli s pojačanjem na intradosu mogu izdržati puno veću silu nego nepojačani modeli. Također je na grafovima vidljivo kako je odnos sile i pomaka linearan do trenutka kada se traka počinje odljepljivati i blokovi klizati, kod modela M granična sila sloma 50 N što je povećanje od 100% granične sile u usporedbi sa nepojačanim modelom.

3.3.2. Ispitivanje modela V s pojačanjem na intradosu

Kod modela V dolazi do istih mehanizama sloma kao i kod modela M koji su vidljivi na slici 83. Vidljivo je otvaranje zglobova kod bloka 23, između blokova 16 i 17, između blokova 4 i 5 te vidljivo je klizanje bloka 11 i odljepljivanje trake od blokova 12 i 11. U nastavku slijedi prikaz rezultata ispitivanja na pojačanom modelu V.

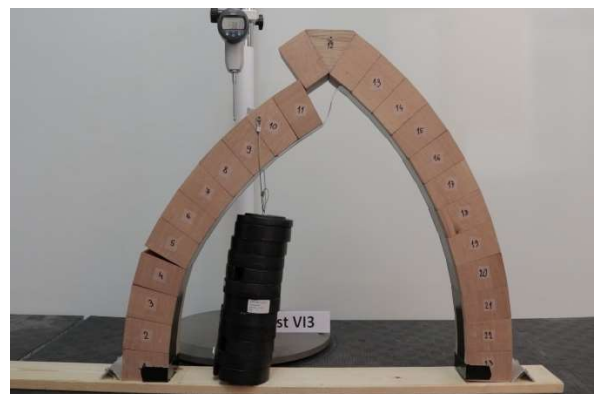
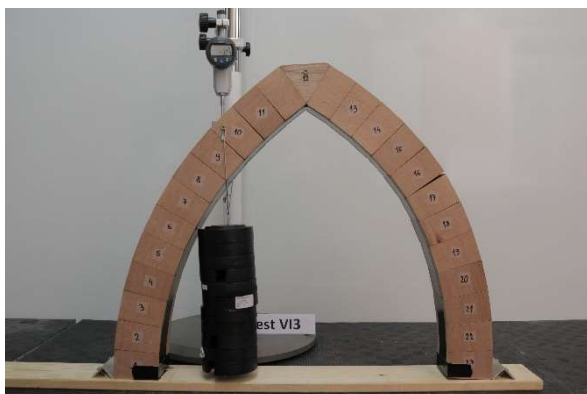
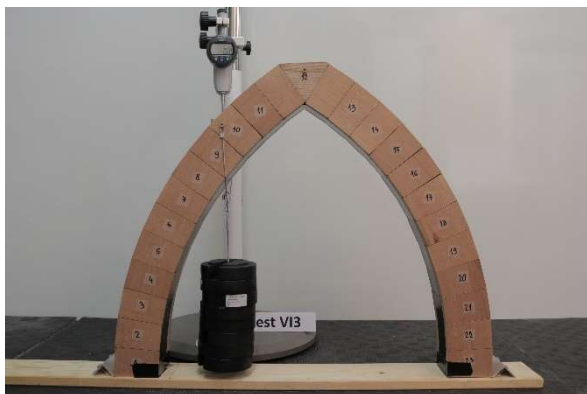
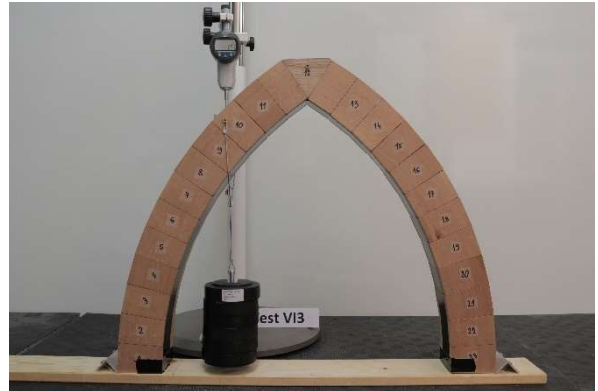
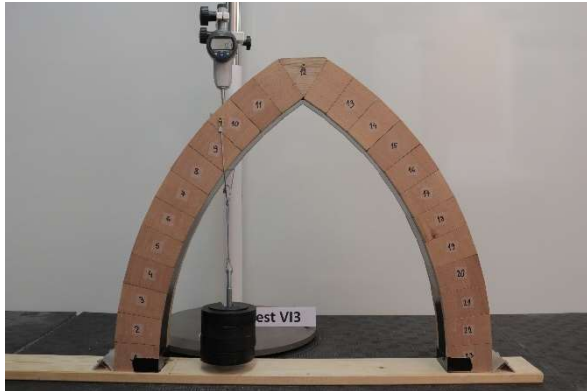
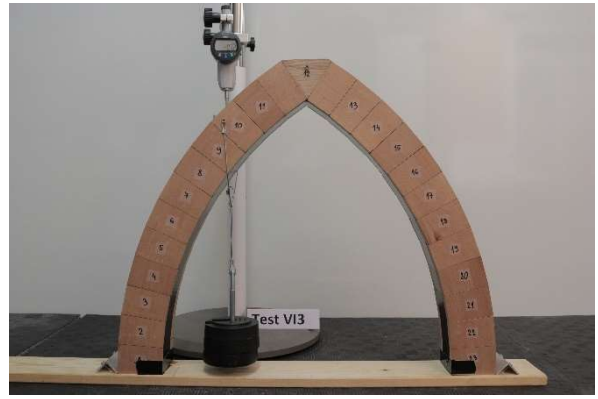
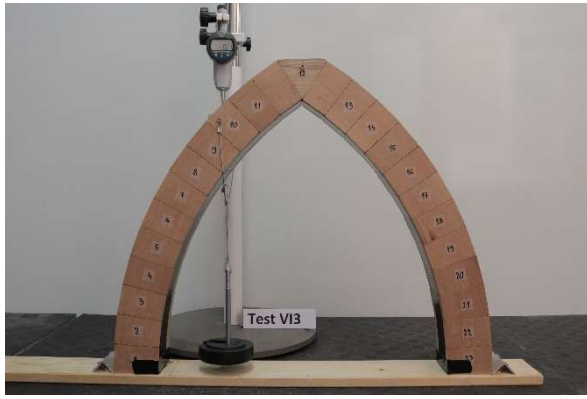


Slika 83. Slom modela V klizanjem i odljepljivanjem



Graf 8. Prikaz rezultata modela V s pojačanjem na intradosu

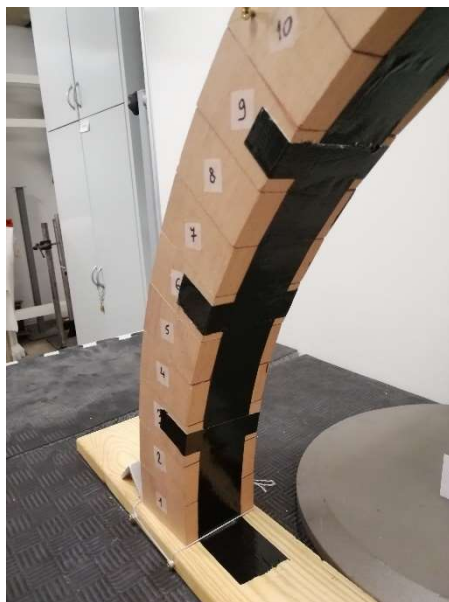
Kao i kod modela M na grafu je vidljivo kako modeli pojačani na intradosu mogu izdržati veću silu nego nepojačani modeli. Također je i u ovom slučaju odnos sile i pomaka linearan do trenutka kada se traka počinje odljepljivati i blokovi klizati. Kod modela V granična sila je između 60 i 70 N što je povećanje od 200% u usporedbi sa nepojačanim modelom.



Slika 84. Ispitivanje modela VI3

3.3.3. Model M pojačan na intradosu sa dodatnim sidrenjem

Provedeno je i ispitivanje na probnom modelu pojačanom na poziciji intradosa u kojem je simulirano dodatno sidrenje pojačanja (sa dodatnim komadima ljepljive trake koji su zalijepljeni blokove), (Slika 85).

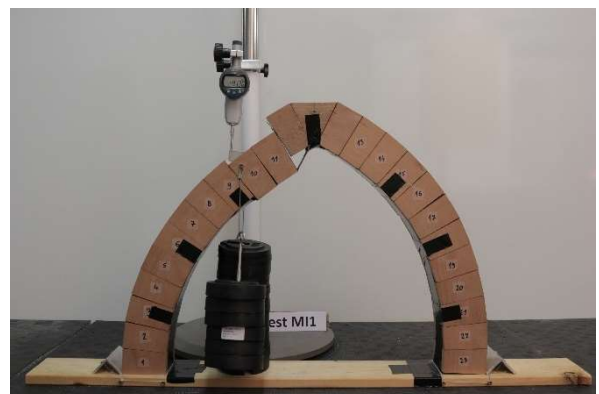
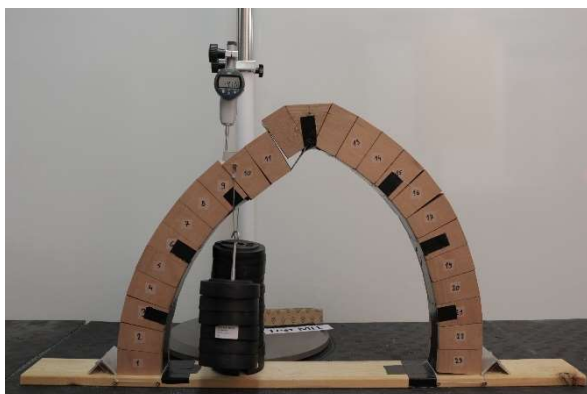
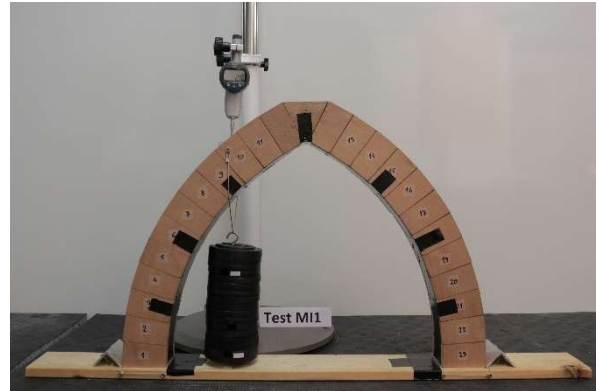
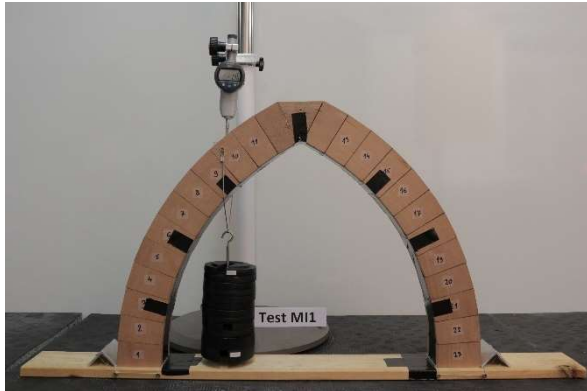
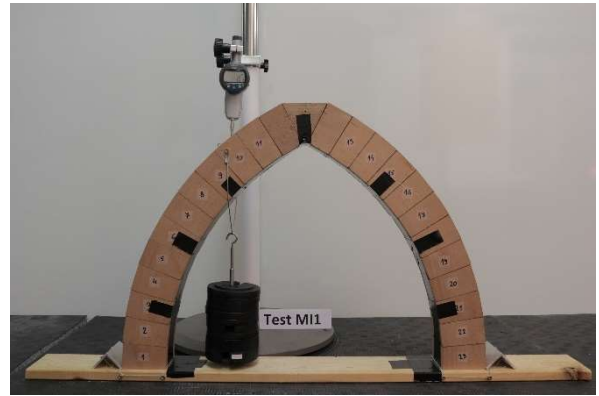
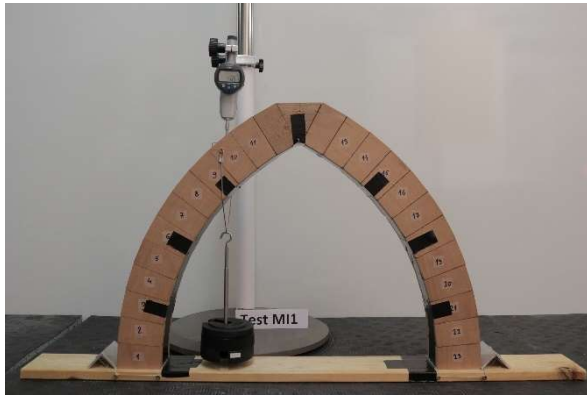


Slika 85. Izgled dodatnog sidrenja na blokovima

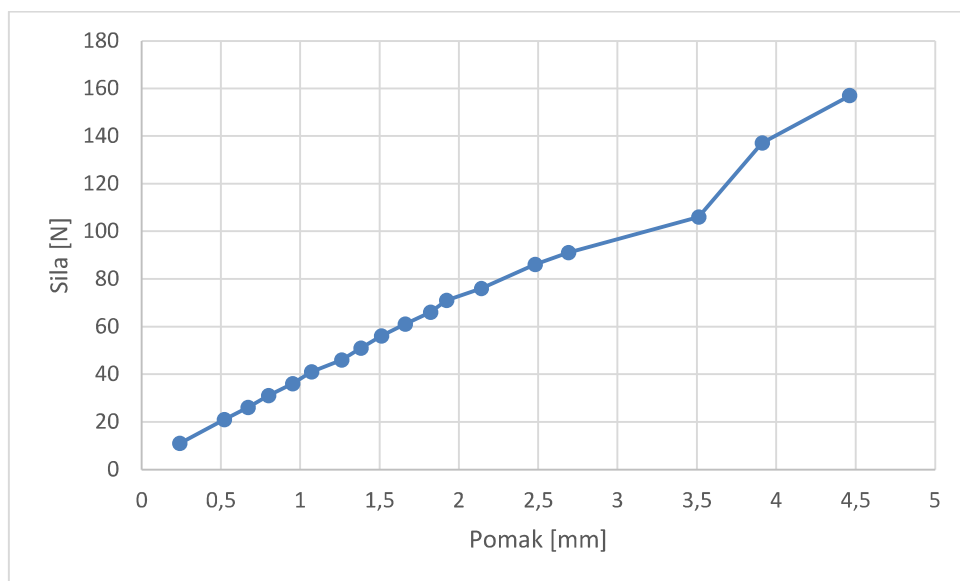
Model je ispitan kao i svi ostali modeli (na četvrtini raspona je nanesena sila). Ispitivanjem su dobiveni nerealno veliki rezultati zato jer sama traka ima dovoljno adhezijsko lijepljenje na model te uz dodatna sidrenja na blokovima model je dodatno pojačan. Isto tako ovako efikasan način sidrenja u stvarnosti ne bi mogao biti izveden jer bi to značilo ugradnju prevelikog broja sidara.

Model je prihvatio veliku silu koja nije proporcionalna ovakvom modelu te zato ovo ispitivanje ne uvažavamo već ga prikazujemo kao primjer za dodatna moguća ispitivanja sidrenja.

U nastavku je prikazan tok ispitivanja sa dobivenim rezultatima.



Slika 86. Ispitivanje modela M sa dodatnim sidrenjem



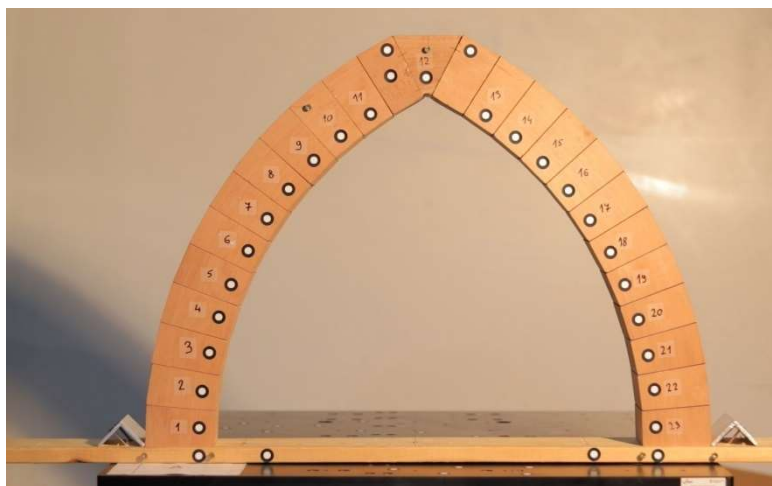
Graf 9. Rezultati ispitivanja modela M sa dodatnim sidrenjem

3.4. Ispitivanje modela na potresnom stolu

3.4.1 Ispitivanje modela M bez pojačanja

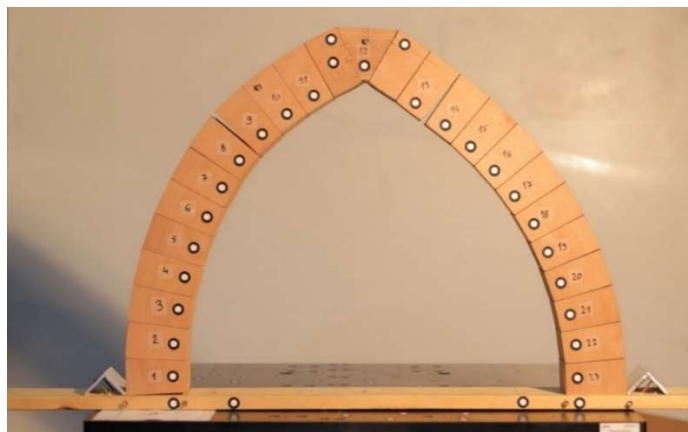
Osim ispitivanja koncentriranim opterećenjem modeli su ispitani i na dinamičko opterećenje na potresnom stolu. Potresni stol simulira horizontalno pomicanje podloge koje bi nastalo uslijed potresa, moguće je kontrolirati amplitudu te frekvenciju pomicanja podloge stola. Ispitivanje je provedeno na modelu M bez i sa pojačanjem.

Kao dinamičko opterećenje koristila se sinusna pobuda na potresnom stolu. Tokom ispitivanja povećavala se frekvencija pomicanja stola te se bilježila frekvencija i ubrzanje pri kojoj je došlo do sloma, svi modeli ispitani su sa početnom frekvencijom od 0,25 Hz. U nastavku slijedi prikaz ispitivanja.

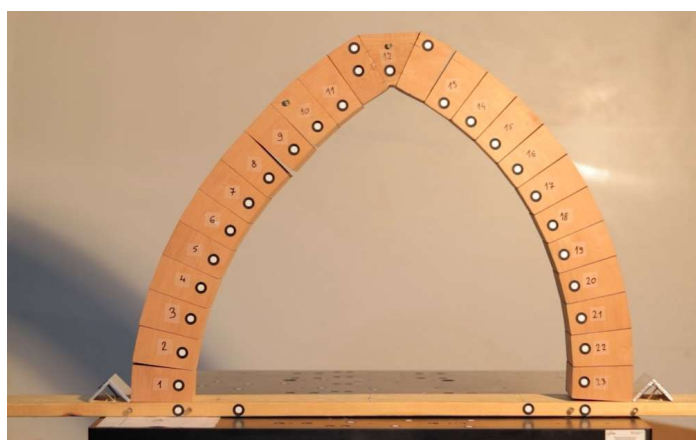


Slika 87. Model M01P na potresnom stolu

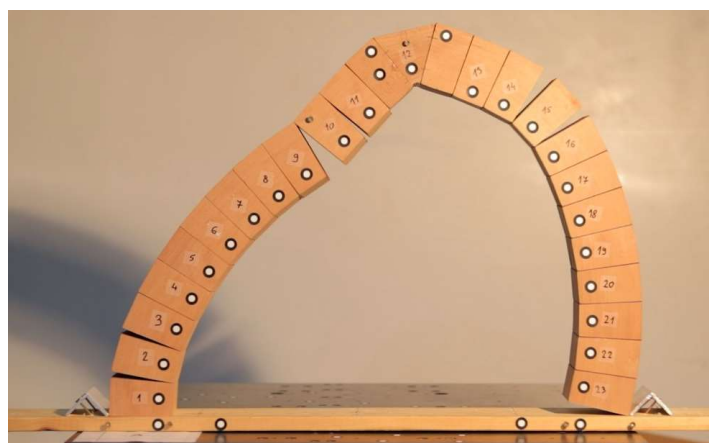
Prilikom povećanja frekvencije na nepojačanom modelu dolazi do harmoničnog otvaranja zglobova. Na slici 88 vidljivo je kako su se otvorila tri zglobova, u trenutku otvaranja zglobova sinusoidna funkcija pri kojoj se kreće potresni stol bila je sa amplitudom od 2,5 te frekvencijom od 1,65 Hz, zglobovi su se otvorili u trenutku kada je stol dosegnuo maksimum (brijeg) funkcije te prelaskom u donji dio funkcije (dol) dolazi do harmoničnog otvaranja zglobova te na posljétku i do rušenja (slike 89 i 90).



Slika 88. Formirana su tri zgloba

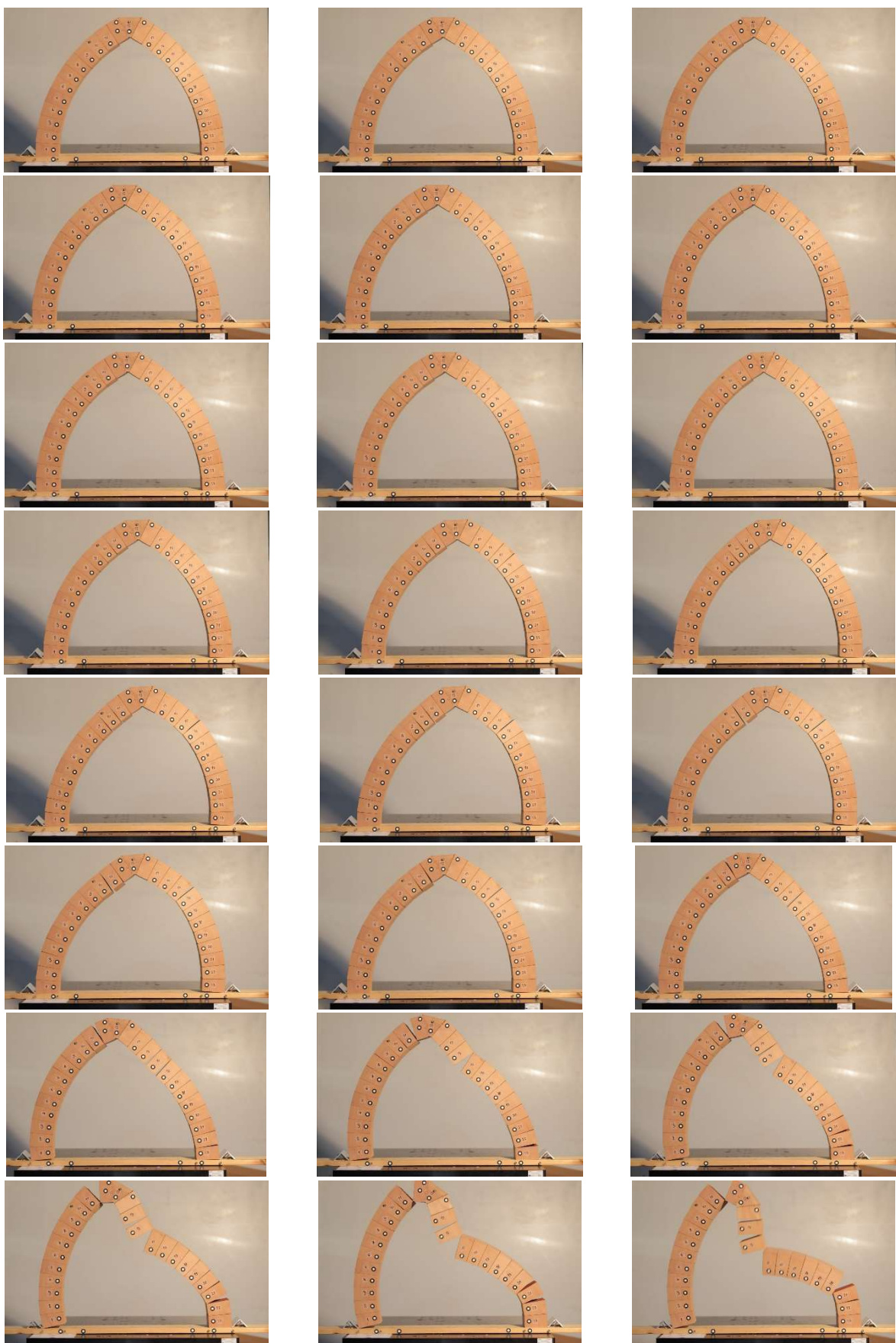


Slika 89. Prelazak sa brijega u donji dio funkcije – početak harmoničnog otvaranja zglobova



Slika 90. Harmonično otvaranje zglobova i rušenje modela

Na slikama je vidljivo kako je uvijek očuvana kontaktna površina između blokova to jest potporna linija sve do trenutka sloma kada potporna linija „izade“ van granica luka. U nastavku slijedi detaljniji prikaz toka ispitivanja.



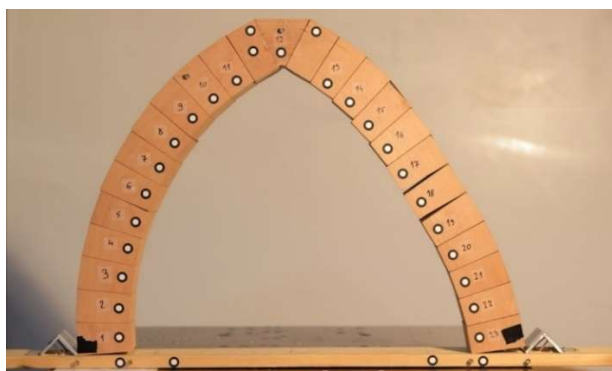
Slika 91. Ispitivanje modela M01P na potresnom stolu

3.4.2. Ispitivanje modela M pojačanog na ekstradosu

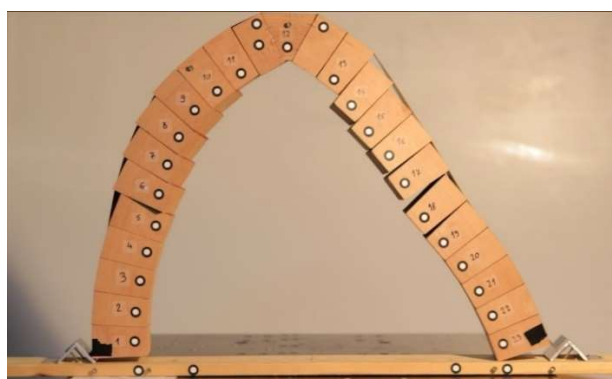
Kod modela pojačanog na poziciji ekstradosa također dolazi do otvaranja zglobova no na većoj frekvenciji (2,25 Hz) nego kod nepojačanog modela. Osim otvaranja zglobova dolazi i do odljepljivanja pojačanja od blokova te klizanja između blokova. Traka pojačanja je zalijepljena za blokove 1 i 23, te dodatno produžena i preko oslonca. U nastavku slijedi prikaz rezultata te toka ispitivanja. I



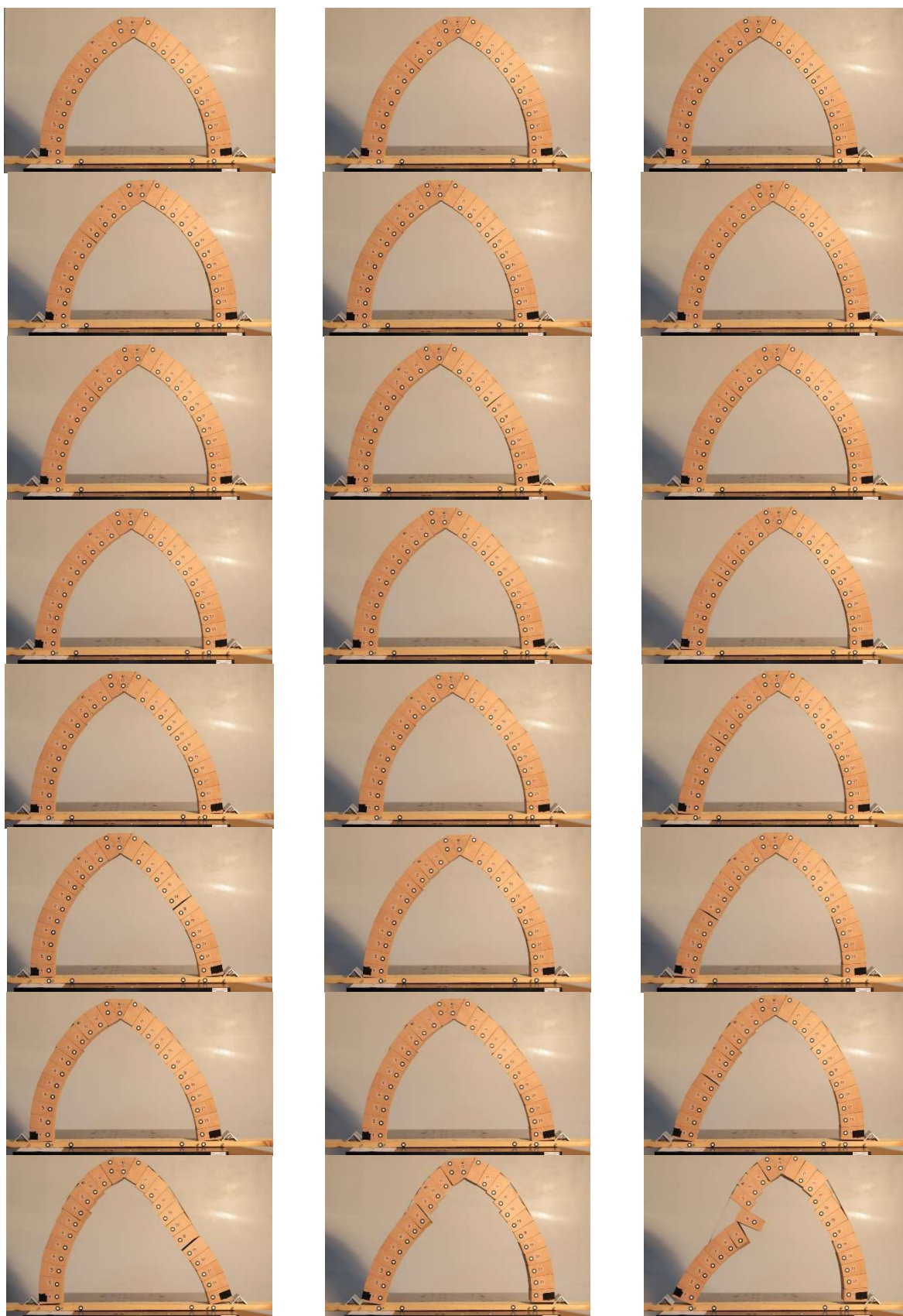
Slika 92. Otvaranje zglobova na modelu ME1P



Slika 93. Početak odljepljivanja pojačanja



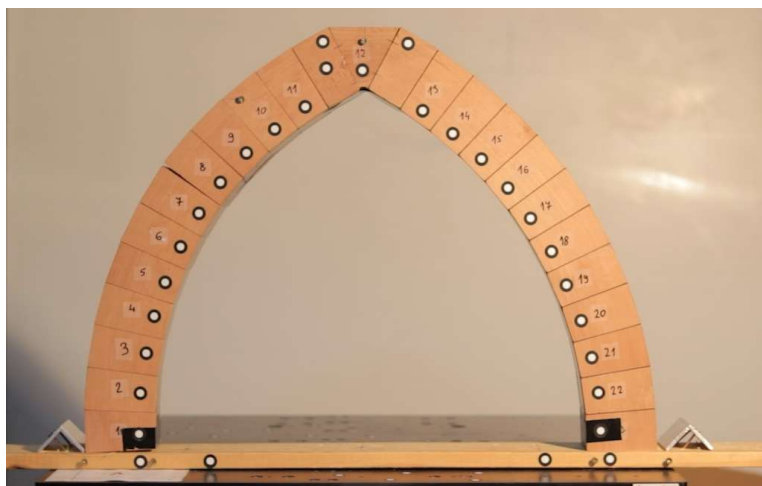
Slika 94. Odljepljivanje pojačanja i klizanje blokova neposredno pred slom modela



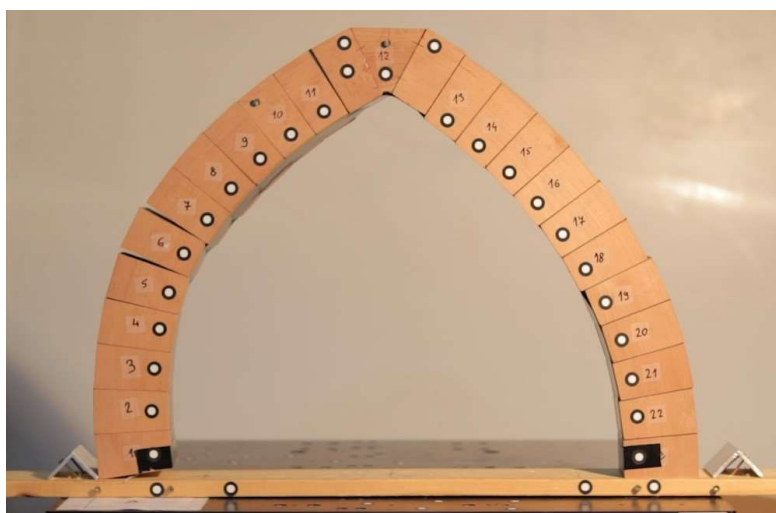
Slika 95. Ispitivanje modela ME1P na potresnom stolu

3.4.3. Ispitivanje modela M pojačanog na intradosu

Kod modela pojačanog na poziciji intradosa dolazi do istog mehanizma sloma kao i kod modela pojačanog na poziciji ekstradosa. Model je uistinu pojačan te može prihvatiti frekvenciju pomicanja podloge od 2,5 Hz. Kod ovog modela pojačanje nije sidreno na osloncima te je došlo do pomicanja oslonaca, točnije do smanjenja raspona luka. U nastavu su prikazane rezultati i tok ispitivanja.



Slika 96. Model MI1P : pomicanje desnog oslonca i otvaranje zgloba



Slika 97. Model MI1P : harmonično otvaranje zglobova te početak klizanja i odljepljivanja

Kao i na prethodnom modelu postepenim povećanjem frekvencije pomicanja podloge dolazi do klizanja između blokova te odljepljivanja pojačanja od intradosa te u konačnici i do sloma modela (slika 100)



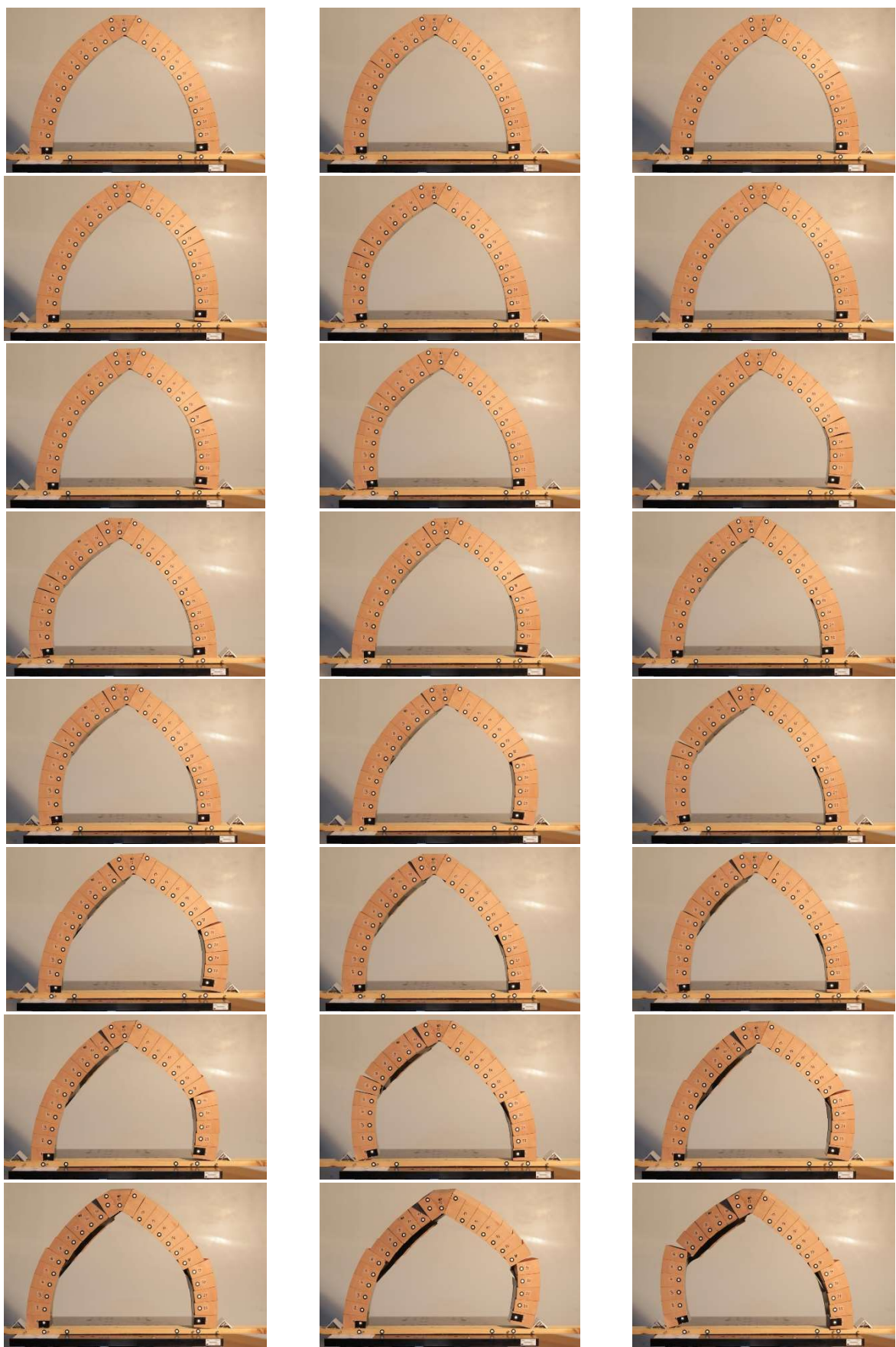
Slika 97. Slom modela MI1P

U konačnici nakon svih ispitivanja dobili smo sljedeće rezultate:

MODEL	POMAK [cm]	FREKVENCIJA [Hz]	UBRZANJE [m/s ²]
M01P	2,5	1,75	3,01
M02P	2,5	1,65	2,68
ME1P	2,5	2,25	4,99
ME2P	2,5	2,5	6,16
MI1P	2,5	2,5	6,16

Tablica 5. Prikaz rezultata ispitivanja na potresnom stolu

Kako bi točnije prikazali tok ispitivanja te otvaranje zglobova pomakom oslonaca u nastavku slijedi prikaz ispitivanja modela MI1P.



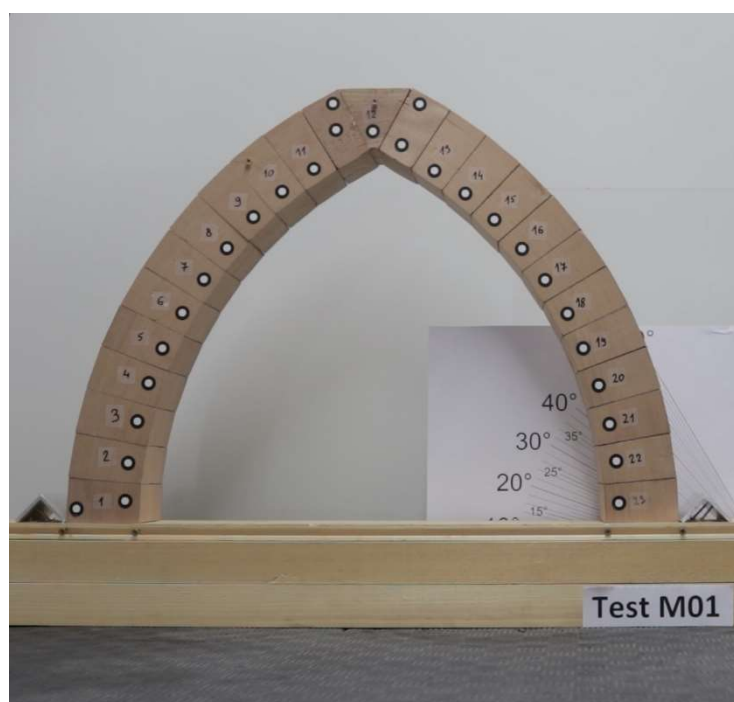
Slika 98. Ispitivanje modela MI1P na potresnom stolu

3.5. Nagibni test

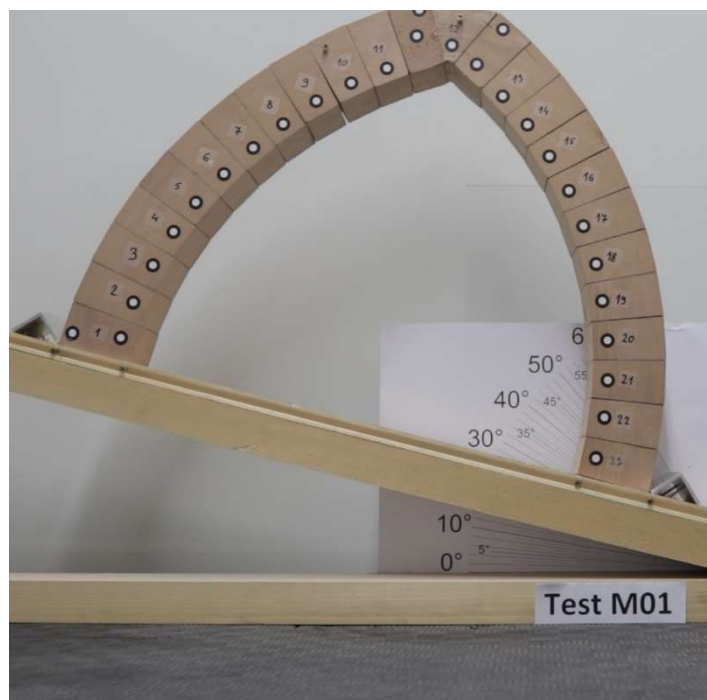
Kao posljednje ispitivanje u ovom radu provedeno je statičko ispitivanje koje ima cilj simulirati potresno djelovanje sa povećanjem nagiba podloge konstrukcije takozvani „Tilt test“. Ispitivanje se provodi na način da je podloga konstrukcije sa jedne strane zglobno oslonjena kako bi joj bila moguća rotacija oko tog oslonca dok je sa druge strane slobodna kako bi bilo moguće podizati podlogu do određenog nagiba. Rezultat dobiven ovim ispitivanjem je kut nagiba podloge pod kojim se konstrukcija sruši. Tangens dobivenog kuta odgovara ubrzanju pri kojem će se model pretvoriti u mehanizam

Ovim testom ispitan je nepojačani model M. Na slici 99 prikazan je izgled modela prije ispitivanja, na slici 100 prikazan je model prilikom otvaranja prvog zgloba dok je na slici 101 prikazan model u trenutku urušavanja.

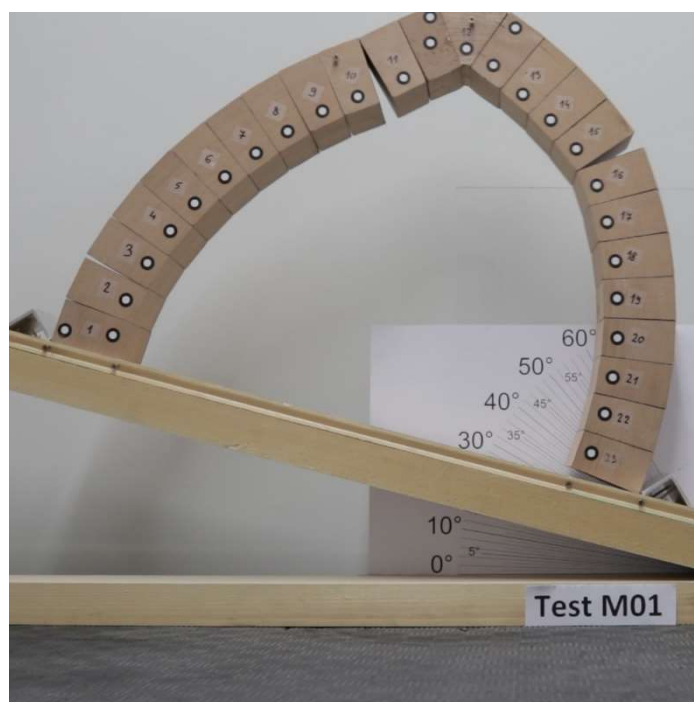
Model je ispitan tri puta te su dobiveni rezultati nagiba podloge između 16 i 18°, što odgovara ubrzanju od 0,286g do 0,325g



Slika 99. Izgled modela prije ispitivanja



Slika 100. Otvaranje prvog zgloba na modelu



Slika 101. Trenutak formiranja 4. zgloba i pretvaranje luka u mehanizam

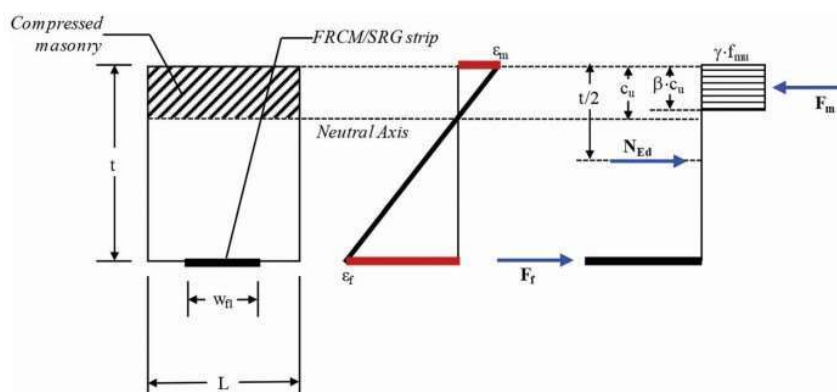
4. NUMERIČKA ANALIZA MODELA LUKA KINEMATIČKIM POSTUPKOM

4.1. Osnove proračuna TAM pojačanja

U nastavku su prikazani postupci proračuna TAM pojačanja prema ACI 549.6R-20 [15] dane su pretpostavke za proračun TAM pojačanja kod polukružnog luka, navedeno je kako se kod konstrukcije pojačane sa TAM-om slom može dogoditi otkazivanjem materijala luka (uslijed klizanja blokova ili uslijed drobljenja materijala) ili otkazivanjem pojačanja uslijed vlačnog sloma tkanine ili odvajanja pojačanja zbog loših adhezijskih svojstava.

Pretpostavke proračuna:

1. Postoji kompatibilnost naprezanja između zidanog luka i TAM-a.
2. Poprečni presjeci ostaju nepromijenjeni



Slika 102. Poprečni presjek luka sa pojačanjem [15]

2.1. Geometrijska svojstva presjeka luka su t =visina, L =širina.

2.2. Geometrijska svojstva pojačanja su w_β = širina trake pojačanja, t_f = debljina pojačanja ; ukoliko se pojačanje sastoji od više slojeva debljina slojeva se dobije na način da se broj traka tkanine n_f pomnoži sa debljinom tkanine t_ξ

3. Slijedeća mehanička svojstva pretpostavljaju se za zidane blokove konstrukcije:

3.1. Zide nema vlačnu čvrstoću dok je ponašanje tlačne čvrstoće opisano pravokutnim dijagramom naprezanja na slici 44 gdje je tlačno naprezanje konstantne vrijednosti $\gamma \cdot f_{mu}$ (gdje je f_{mu} tlačna čvrstoća zida, $\gamma=0,85$) na visini od $\beta \cdot c_u$ (gdje je c_u visina neutralne ose, $\beta=0,8$)

4. TAM pojačanje nema tlačne čvrstoće dok je vlačna čvrstoća definirana osnim naprezanjem ϵ_{fd}

Za navedeni mehanizam dana je jednačba virtualnog rada :

Gdje je P_i za i od 1 do 3, težina pojedinog bloka smještenog između četiri zglobova, dok su η_i i η_F vertikalne komponente pomaka rezultante opterećenja P_i i koncentriranog opterećenja λF . Prema navedenoj pretpostavki kako žiđe nema vlačnu čvrstoću zglobovi ne utječu na virtualni rad i multiplikator sloma $\lambda_{c,URM}$ koji za dani mehanizam glasi :

Kod pojačanog luka sa TAM sustavom, dio zgloba koji se otvara te je pojačan TAM-om pridonosi ukupnom radu za W_{MRj} , za j od 1 do n gdje je n jednak 2 kad je pojačanje na jednoj strani (intrados ili ekstrados) te jednak 4 kad je obostrano pojačan, onda se virtualni rad zapisuje:

83

te onda multiplikator opterećenja glasi:

$$\lambda_c = \frac{-(\sum_{i=1}^3 P_i \eta_i + \sum_{j=1}^n W_{MRj})}{F \eta_F} \quad (4)$$

gdje bi W_{MRj} glasio:

$$W_{MRj} = 0,85t * F_f * \Delta\theta_j \quad (5)$$

$F_f = w_f * t_f * \varepsilon_{fd} * E_f$ – vlačna sila u pojačanju

0,85t – pretpostavljeni krak unutarnjih sila

$\Delta\theta_j$ – relativna rotacija između dva dijela luka u zglobu j

U pojačanim lukovima uvelike se povećava posmik između blokova te u nekim slučajevima može doći do sloma zbog smicanja blokova. Najveći posmik očekuje se na zglobovima koji se formiraju na ekstradosu luka, referirajući se na sliku 46 to su zglobovi 2 i 4. Zbog navedenoga potrebno je odrediti posmičnu čvrstoću V_{Rdt} za dva poprečna presjeka za dobiveni multiplikator sloma.

$$V_{Rdt} = \mu N_{Edt} + c L c_u \quad (6)$$

Gdje su N_{Edt} – osna sila na mjestu zgloba u polovici poprečnog presjeka, μ i c koeficijenti trenja i kohezije zidanih blokova, te c_u visina neutralne osi poprečnog presjeka. Konzervativna pretpostavka posmične čvrstoće između blokova odgovara nedostatku kohezije ($c=0$) i koeficijentu trenja u rangu od 0,4 do 0,6. Ukoliko je posmična čvrstoća u jednom od zglobova (2 ili 4) manja nego zahtijevana granična posmična čvrstoća, očekuje se posmični slom konstrukcije [15].

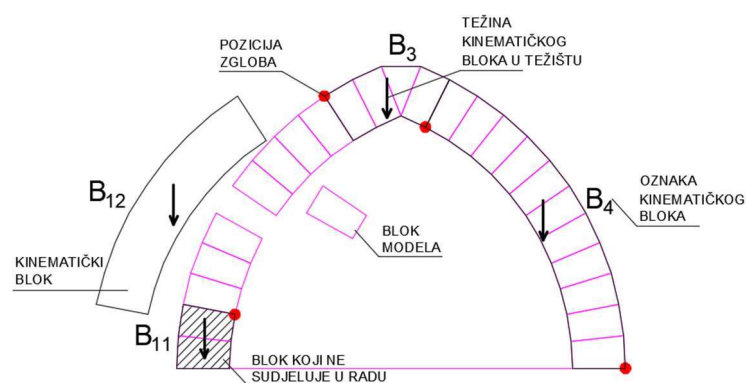
Opisana metoda može se analogno primijeniti i na PAV pojačanja

U ovom poglavlju biti će numerički analizirani modeli luka M i V kinematičkim postupkom. Ovim postupkom ili teoremom dobije se opterećenje sloma u gornjoj granici tj. veće opterećenje od graničnog pri nastanku sloma (slika 10). Stoga se za granično opterećenje odabire najmanja vrijednost opterećenja dobivena razmatranjem svih kinematički dopustivih mehanizama.

Navedenim postupkom proračunati su modeli ispitani u poglavlju 3. Geometrije modela i virtualni planovi pomaka nacrtani su u AutoCAD-u, dok su proračuni programirani u Excelu. Proračun se zasniva na principu virtualnog rada u koji je uključena vlastita težina blokova luka, koncentrirana sila u četvrtini raspona te u slučaju pojačanja i sila u pojačanju.

4.2. Proračun modela bez pojačanja

Kod proračuna modela bez pojačanja, kinematički teorem zasniva se na virtualnom radu vlastite težine kinematičkih blokova na virtualnom pomaku u težištu pojedinog kinematičkog bloka. Kinematički blok sastoji se od određenog broja blokova modela, geometrija i težina kinematičkog bloka se mijenja ovisno o položaju zglobova na modelu. Na slici 104 prikazan je kinematički blok i blok modela na jednom od nekoliko desetaka mogućih mehanizama sa ostalim korištenim oznakama u proračunu.



Slika 104. Prikaz korištenih oznaka u proračunu

Prije početka proračuna potrebno je u mjerilu nacrtati modele sa različitim kinematičkim dopustivim mehanizmima za koje će se izvoditi proračun. U ovom slučaju kao početni (referentni) mehanizam odabrani su mehanizmi dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem u poglavlju 3. Za početak proračuna potrebno je dobiti težine kinematičkih blokova te položaj njihovih težišta kako bi se kasnije na tim pozicijama očitale vrijednosti virtualnih pomaka blokova. Za proračun nepojačanih modela potrebne su slijedeće vrijednosti:

w_i - težina pojedinog bloka modela

w_{Bi} - težina „kinematičkih“ blokova u težištu, ovisna o težini pojedinog bloka modela

F - sila u četvrtini raspona (granično opterećenje koje tražimo)

v_{Bi} - virtualni pomak „kinematičkog“ bloka

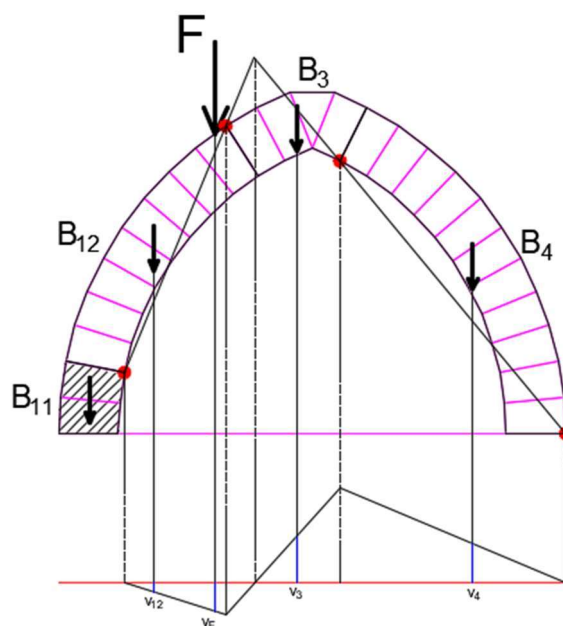
v_F - virtualni pomak na poziciji vanjskog opterećenja

Mase blokova modela M iznose 206,9 g, osim zaglavnog bloka koji iznosi 652,9 g.

Mase blokova modela V iznose 231,6 g, osim zaglavnog bloka koji iznosi 667,4 g.

4.2.1. Proračun modela M

Nacrtani su u mjerilu svi modeli sa mehanizmima bliski onom mehanizmu dobivenom u eksperimentu, sveukupno trinaest modela. Virtualni plan pomaka dobiva se tako da se blok B12 zarotira za jedinični kut zaokreta θ_1 (1 rad tj. $57,3^\circ$). Na mjestu gdje se pojavljuje zglob na osloncima ili kod nepomičnog kinematičkog bloka B₁₁ (onaj koji ne sudjeluje u virtualnom radu) vrijednost virtualnog pomaka mora biti jednaka nuli dok se na ostatku modela vrijednost pomaka mijenja ovisno o kutu zaokreta θ_1 . Tako je na slici 105 prikazan virtualni plan ovisan o pozicijama zglobova za jedan mehanizam korišten u proračunu.



Slika 105. Prikaz virtualnog plana pomaka za mehanizam M01

Na slici je vidljivo kako osim na osloncima vrijednost pomaka jednaka je nuli i u točki koja spaja dva pravca koja povezuju pozicije zglobova na svakoj strani luka. Također je vidljivo kako je na poziciji težišta pojedinog kinematičkog bloka vrijednost pomaka različita od nule te ovisi o kutu rotacije θ_1 . Kako je i prikazano na slici 105 na isti način obrađeni su i ostali modeli koji su uzeti u obzir, sveukupno 13 modela sa različitim pozicijama zglobova. Kao konačni rezultat usvojen je onaj mehanizam koji ima najmanju graničnu silu.

Svi proračuni bazirali su se na istom postupku koji je detaljnije prikazan u poglavlju 4.1.:

1. Proračun težine pojedinog kinematičkog bloka W_i
2. Očitavanje vrijednosti vertikalnog pomaka u težištu bloka δv
3. Izračun virtualnog rada vlastite težine w_{KA} (=sila*pomak; $\sum W_i * \delta v_i$)

Tablica 6. Prikaz proračun virtualnog rada nepojačanog modela M01

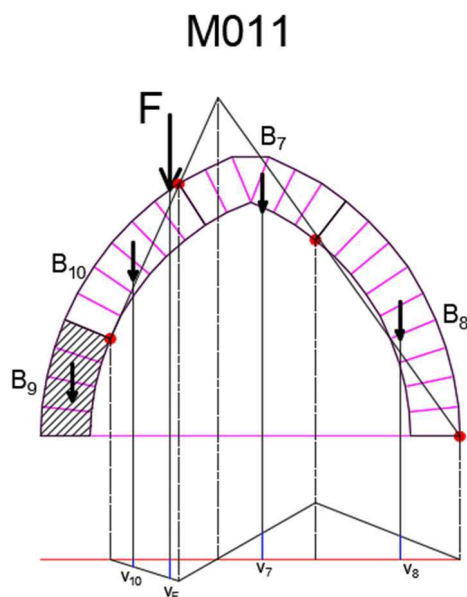
PRORAČUN M01			
Blok	W [N]	δv_F [mm]	Virtualni rad vlastite težine [Nmm]
B11	4,06	0	0
B12	16,24	12,52	203,28
B3	8,43	-61,94	-522,48
B4	22,33	-51,87	-1158,16
$\Sigma =$			-1477,37

Svi modeli proračunati su na isti način te su dobivene vrijednosti virtualnog rada kao zbroj svih umnožaka težine blokova i virtualnih. U tablici 7 prikazani su svi proračunati modeli M bez pojačanja te dobiveni najmanji rezultat koji je najbliži graničnoj sili opterećenja prije sloma.

Tablica 7. Prikaz rezultata proračuna nepojačanih modela M

Mehanizam	$\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i$ [Nmm]	δv_F [mm]	$F = \frac{-\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i}{\delta v_F}$ [N]
M01	-1477,37	39,00	37,88
M02	-1547,24	39,00	39,67
M03	-1555,87	39,00	39,89
M04	-1596,93	39,00	40,95
M05	-1375,88	35,78	38,46
M06	-1363,99	35,78	38,13
M07	-1371,60	35,78	38,34
M08	-1408,31	35,78	39,36
M09	-1205,65	31,31	38,51
M010	-1195,14	31,31	38,17
M011	-1072,10	31,31	34,24
M012	-1234,09	31,31	39,42
M013	-933,25	25,64	36,40

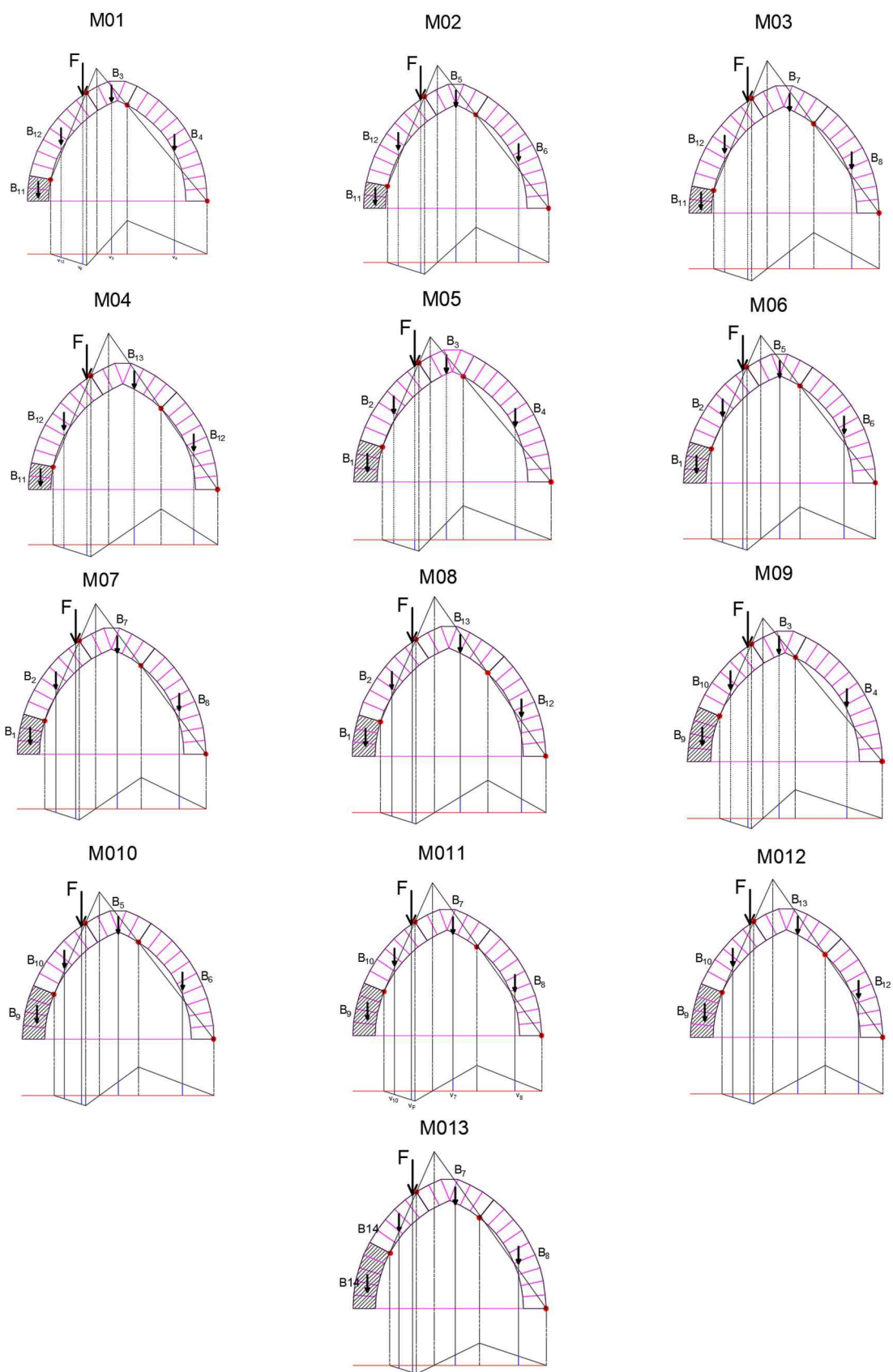
Kao rezultat kinematičkog proračuna dobiven je model M011 koji ima najmanju graničnu silu (slika 106).



Slika 106. Prikaz mehanizma M011

Iz tablice 7 vidljivo je kako je dobiveni rezultat od 34,24 N blizak rezultatu onom dobivenom programom Arco koji je iznosio 33,6 N. Program Arco rezultat dobiva statičkim teoremom te je dobivena donja vrijednost granične sile dok kinematičkim teoremom dobivamo gornju vrijednost granične sile tako da se može zaključiti kako je granična sila modela M između 33,5 i 34,5 N.

U nastavku su na slici 107 prikazani svi analizirani mehanizmi modela M.



Slika 107. Razmatrani mehanizmi modela M bez pojačanja

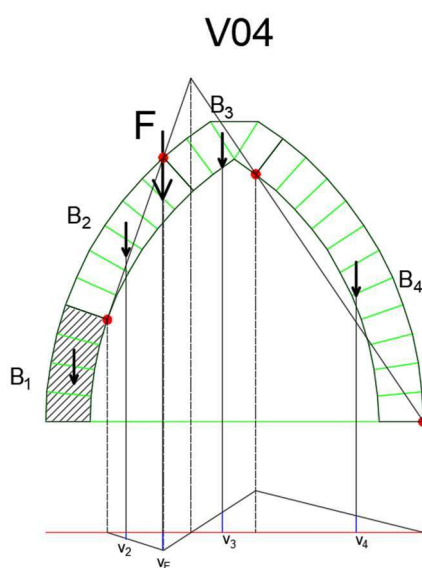
4.2.2. Proračun modela V

Istim postupkom kao i za model M proračunat je i model V. Kod proračuna modela V razmatrano je 9 mehanizama približnih mehanizmu sloma iz poglavlja 3, svi su prikazani na slici 109. Postupak proračuna je isti kao i kod modela M, prvo je potrebno izračunati težine svih sudjelujućih kinematičkih blokova, očitati vrijednost virtualnih pomaka u točki težišta kinematičkog bloka te pomnožiti dobivene vrijednosti sila i pomaka kako bi dobili virtualni rad. U tablici 8 prikazani su rezultati proračuna za model V bez pojačanja.

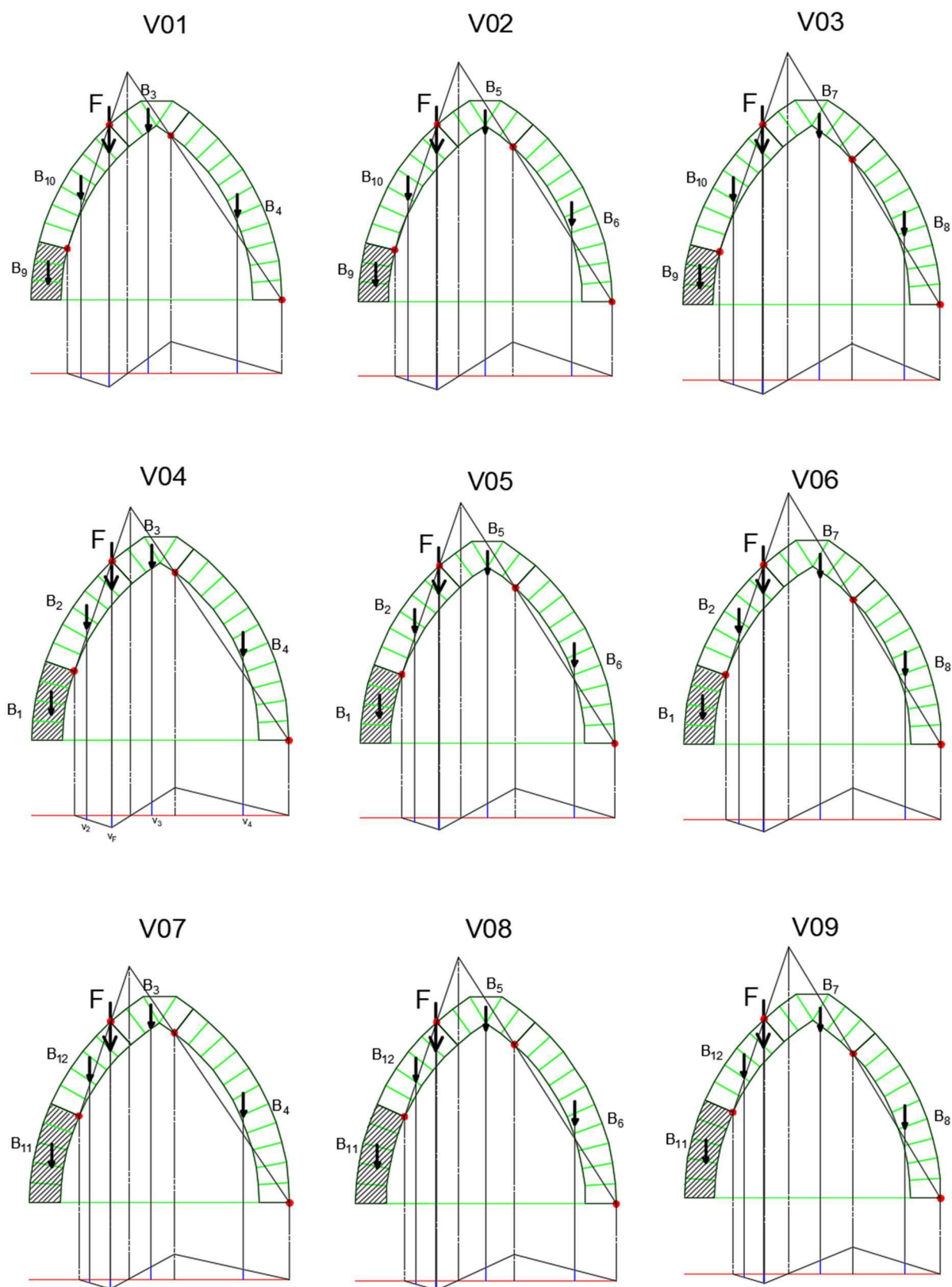
Tablica 8. Prikaz rezultata proračuna modela V

Mehanizam	$\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i [Nmm]$	δv_F [mm]	$F = \frac{-\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i}{\delta v_F} [N]$
V01	-1068,79	35,97	29,71
V02	-1170,07	35,97	32,53
V03	-1256,55	35,97	34,93
V04	-936,67	31,63	29,61
V05	-1024,81	31,63	32,40
V06	-1100,08	31,63	34,78
V07	-816,58	26,10	31,28
V08	-891,03	26,10	34,13
V09	-954,60	26,10	36,57

Iz tablice je vidljivo kako je mjerodavan model V04 kojem je mehanizam sloma prikazan na slici 108. Usporedi li se dobiveno granično opterećenje od 29,61 N sa rezultatima dobivenim programom Arco (20,8 N) može se primijetiti malo veće odstupanje.



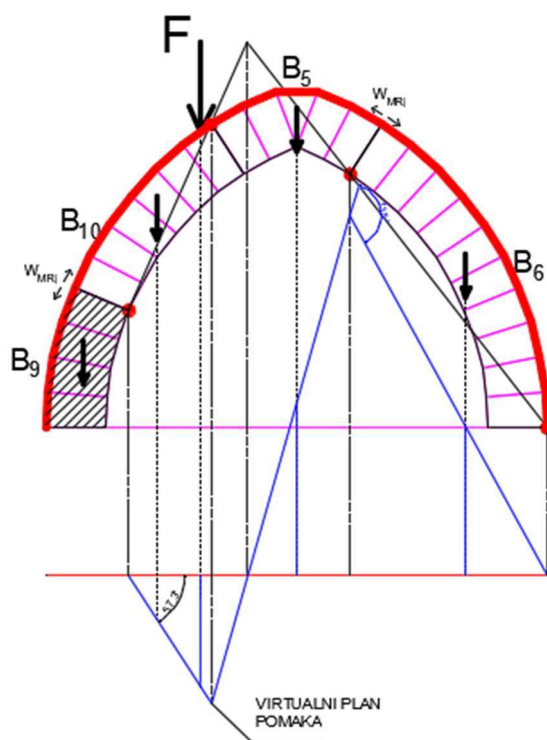
Slika 108. Prikaz mehanizma V04



Slika 109. Razmatrani mehanizmi modela V bez pojačanja

4.3. Proračun modela s pojačanjem na ekstradosu ili intradosu

Kod proračuna pojačanih modela, u jednadžbu virtualnog rada uz rad vlastite težine kinematičkih blokova dodaje se doprinos virtualnog rada pojačanja (W_{MRj}). Na slici 110 prikazan je jedan od pojačanih modela sa označenim pojačanjem i pretpostavljenim pozicijama nastanka zglobova približno jednakom mehanizmu sloma iz poglavlja 3.



Slika 110. Prikaz grafičkog dijela proračuna modela

Kao i kod svih modela potrebno je dobiti težine kinematičkih blokova te položaj njihovih težišta kako bi se očitale vrijednosti virtualnog pomaka blokova. Za proračun pojačanih modela osim vrijednosti vlastite težine potrebne su i slijedeće vrijednosti:

$\Delta\theta_n$ – relativni kut zaokreta između 2 dijela luka u zglobu n

n - broj spriječenih zglobova

v_{MRj} – relativni pomak u zglobu zbog kuta rotacije

W_{MRj} – virtualni rad pojačanja ovisan o pomaku i nosivosti pojačanja

v_F - virtualni pomak na poziciji vanjskog opterećenja

4.3.1. Proračun modela M pojačanog na ekstradosu

Kao što je prethodno navedeno osim proračuna virtualnog rada vlastite težine za pojačane modele potrebno je proračunati i virtualni rad pojačanja. Kao mjerodavni mehanizmi za proračun uzeti su isti oni nepojačani modeli koji sadrže približan mehanizam sloma kao iz ispitivanja kako bi konačni rezultati bili realni.

Kod proračuna pojačanih modela M sveukupno je razmatrano devet modela sa različitim pozicijama zglobova. U tablici 9 prikazani su rezultati virtualnog rada vlastite težine dok su u tablici 10 prikazi rezultati virtualnog rada pojačanja te posljednje u tablici 11 prikazan je sveukupan doprinos pojačanja na modele.

Tablica 9. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela ME

Mehanizam	$\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i [Nmm]$	δV_F [mm]	$F = \frac{-\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i}{\delta v_F} [N]$
ME1	-5817,58	152,39	38,17
ME2	-5218,65	152,39	34,24
ME3	-6007,14	152,39	39,42
ME4	-6639,47	174,15	38,13
ME5	-6676,51	174,15	38,34
ME6	-6855,22	174,15	39,36
ME7	-7531,45	189,84	39,67
ME8	-7573,49	189,84	39,89
ME9	-7773,37	189,84	40,95

Tablica 10. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela ME

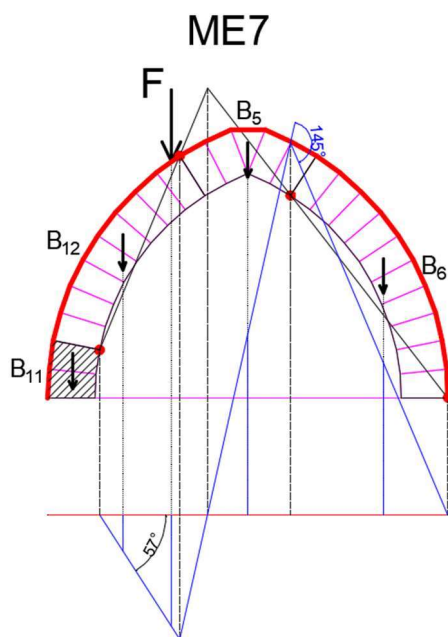
Mehanizam	$\Delta\theta_1$ [°]	$\Delta\theta_2$ [°]	V_{MRj1} [mm]	V_{MRj2} [mm]	n	W_{MRj1}	W_{MRj2}	$\sum_{j=1}^n W_{MRj}$	δV_F [mm]	$F = \frac{\sum_{j=1}^n W_{MRj}}{\delta v_F} [N]$
ME1	57	135	67,65	160,22	2	12176,81	28839,82	41016,63	152,39	230,98
ME2	57	132	67,65	156,66	2	12176,81	28198,94	40375,75	152,39	230,70
ME3	57	136	67,65	161,41	2	12176,81	29053,45	41230,26	152,39	231,13
ME4	57	141	67,65	167,34	2	12176,81	30121,59	42298,4	174,15	204,76
ME5	57	141	67,65	167,34	2	12176,81	30121,59	42298,4	174,15	204,55
ME6	57	142	67,65	168,53	2	12176,81	30335,22	42512,03	174,15	204,75
ME7	57	145	67,65	172,09	2	12176,81	30976,1	43152,92	189,84	187,63
ME8	57	145	67,65	172,09	2	12176,81	30976,1	43152,92	189,84	187,41
ME9	57	145	67,65	172,09	2	12176,81	30976,1	43152,92	189,84	186,36

Tablica 11. Ukupno granično opterećenje za model ME

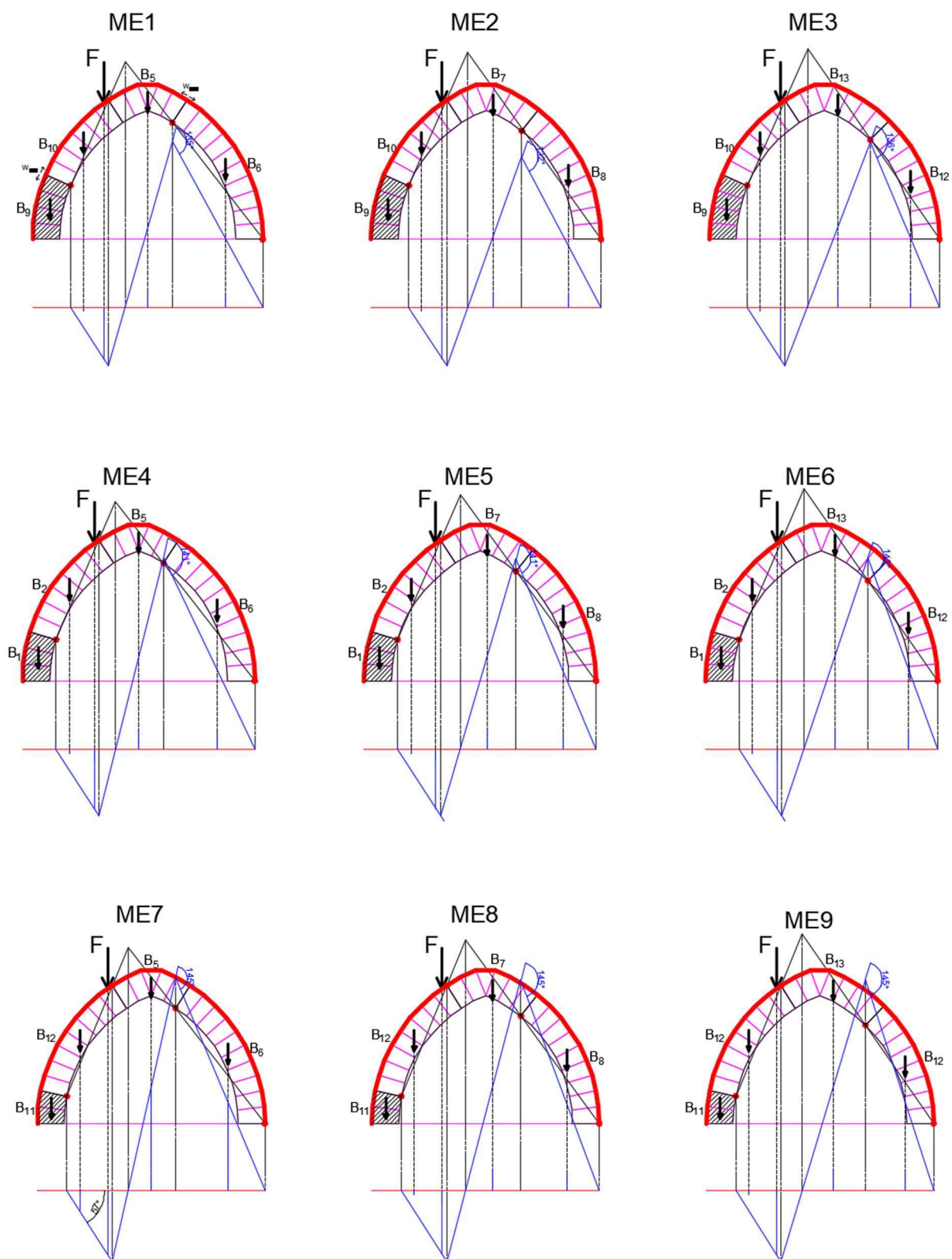
Mehanizam	$F = \frac{-(\sum_{i=1}^3 W_i * v_i + \sum_{j=1}^n W_{MRj})}{\delta v_F}$
ME1	269,15
ME2	264,94
ME3	270,55
ME4	242,89
ME5	242,89
ME6	244,11
ME7	227,31
ME8	227,31
ME9	227,31

Iz tablice 9 vidljivo je kako sam model bez pojačanja ima jako malu nosivost od svega 34 N. U tablici 10 prikazano je kako pojačanje može izdržati silu od 187 N te u konačnici u tablici 11 prikazan je ukupan doprinos pojačanja. Mjerodavan je model sa najmanjom graničnom silom jer kinematičkim postupkom dobivamo sile veće od prave granične sile sloma. U nastavku na slici 111 prikazan je mjerodavan mehanizam dok su na slici 112 prikazani svi mehanizmi korišteni u proračunu.

Usporedbom dobivenog rezultata od 227,31 N i rezultata dobivenog u ispitivanju u iznosu od 50 N za početak klizanja blokova te 80 N za urušavanje modela vrijednosti se uvelike razlikuju zato jer se kinematičkim proračunom ne uzima u obzir mehanizam sloma klizanjem već samo mehanizam vlačnog sloma pojačanja kod nekog od mogućih zglobova. Tako da je navedena sila od 227,31 N sila koja bi bila potrebna za slom konstrukcije kada bi u idealnim uvjetima slom nastao u pojačanju (kidanjem pojačanja).



Slika 111. Prikaz mjerodavnog mehanizma ME7



Slika 112. Razmatrani mehanizmi modela M s pojačanjem na ekstradosu

4.3.2. Proračun modela V pojačanog na ekstradosu

Proračun modela V s pojačanjem na ekstradosu isti je prethodnom proračunu pojačanog modela M tako da zbog sličnosti proračuna u nastavku su prikazani samo dobiveni rezultati.

Tablica 12. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela VE

Mehanizam	$\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i [Nmm]$	δv_F [mm]	$F = \frac{-\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i}{\delta v_F} [N]$
VE1	-3974,87	127,06	31,28
VE2	-4337,26	127,06	34,13
VE3	-4646,67	127,06	36,57
VE4	-4559,39	153,96	29,61
VE5	-4988,47	153,96	32,40
VE6	-5354,83	153,96	34,78
VE7	-5202,55	175,08	29,71
VE8	-5695,53	175,08	32,53
VE9	-6116,46	175,08	34,93

Tablica 13. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela VE

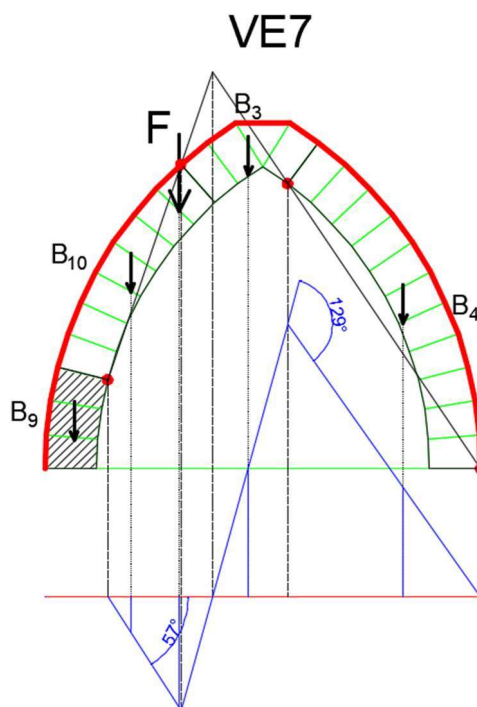
Mehanizam	$\Delta\theta_1$ [°]	$\Delta\theta_2$ [°]	V_{MRj1} [mm]	V_{MRj2} [mm]	n	W_{MRj1}	W_{MRj2}	$\sum_{j=1}^n W_{MRj}$	δv_F [mm]	$F = \frac{\sum_{j=1}^n W_{MRj}}{\delta v_F} [N]$
VE1	57	116	67,65	137,67	2	12176,81	24780,88	36957,7	127,06	290,86
VE2	57	118	67,65	140,05	2	12176,81	25208,14	37384,95	127,06	294,22
VE3	57	120	67,65	142,42	2	12176,81	25635,4	37812,21	127,06	297,59
VE4	57	123	67,65	145,98	2	12176,81	26276,28	38453,09	153,96	249,76
VE5	57	126	67,65	149,54	2	12176,81	26917,17	39093,98	153,96	253,92
VE6	57	128	67,65	151,91	2	12176,81	27344,42	39521,24	153,96	256,69
VE7	57	129	67,65	153,10	2	12176,81	27558,05	39734,86	175,08	226,95
VE8	57	132	67,65	156,66	2	12176,81	28198,94	40375,75	175,08	230,61
VE9	57	134	67,65	159,03	2	12176,81	28626,19	40803,01	175,08	233,05

Tablica 14. Ukupno granično opterećenje za model VE

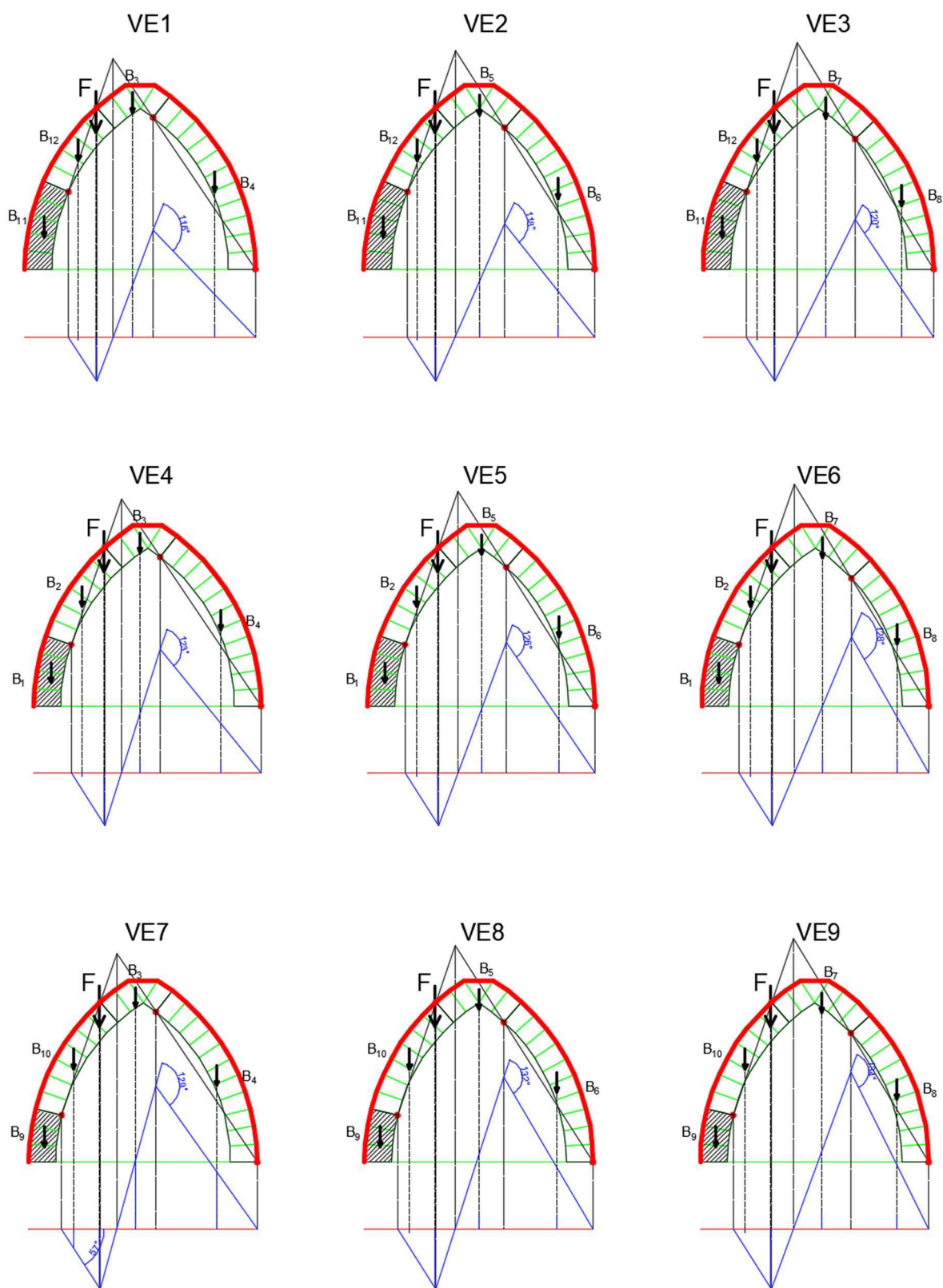
Mehanizam	$F = \frac{-(\sum_{i=1}^3 W_i * v_i + \sum_{j=1}^n W_{MRj})}{\delta v_F} [N]$
VE1	322,14
VE2	328,36
VE3	334,16
VE4	279,37
VE5	286,32
VE6	291,47
VE7	256,66
VE8	263,14
VE9	267,98

Kao i kod pojačanog modela M vidljivo je kako je konačna vrijednost sile od 256,6 N mnogo veća od one dobivene u ispitivanju u iznosu od 50 N za početak klizanja blokova te 100 N za urušavanje modela. Zaključno kao i za prethodni model, dobivena sila kinematičkim proračunom jednaka je onoj sili koja bi bila potrebna da dođe do sloma u pojačanju u nekim savršenim uvjetima kad ne bi došlo do proklizavanja, već do pucanja pojačanja.

Na slici 113 prikazan je mjerodavan mehanizam te na slici 114 prikazani su svi mehanizmi uzeti u obzir u proračunu.



Slika 113. Prikaz mjerodavnog mehanizma VE7



Slika 114. Razmatrani mehanizmi modela V s pojačanjem na ekstradosu

4.3.3. Proračun modela M pojačanog na intradosu

Provedeni su i proračuni za model M pojačanog na intradosu. Kao i za modele sa pojačanjem na ekstradosu osim proračuna virtualnog rada vlastite težine za pojačane modele potrebno je proračunati i virtualni rad pojačanja. Jedina razlika u proračunu modela sa pojačanjem intradosa i ekstradosa je u tome što se kod pojačanja intradosa sprječava otvaranje samo jednog zgloba koji se nalazi neposredno pored pozicije nanošenja opterećenja dok kod modela pojačanog ekstradosa sprečava se otvaranje dva zgloba.

U tablici 15 prikazani su rezultati virtualnog rada vlastite težine dok su u tablici 16 prikazi rezultati virtualnog rada pojačanja te zaključno u tablici 17 prikazan je sveukupan doprinos pojačanja na modelu.

Tablica 15. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela MI

Mehanizam	$\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i [Nmm]$	δV_F [mm]	$F = \frac{-\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i}{\delta v_F} [N]$
MI1	-5817,58	152,39	38,17
MI2	-5218,65	152,39	34,24
MI3	-6007,14	152,39	39,42
MI4	-6639,47	174,15	38,13
MI5	-6676,51	174,15	38,34
MI6	-6855,22	174,15	39,36
MI17	-7531,45	189,84	39,67
MI8	-7573,49	189,84	39,89
MI9	-7773,37	189,84	40,95
MI10	-8767,77	189,84	46,18

Tablica 16. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela MI

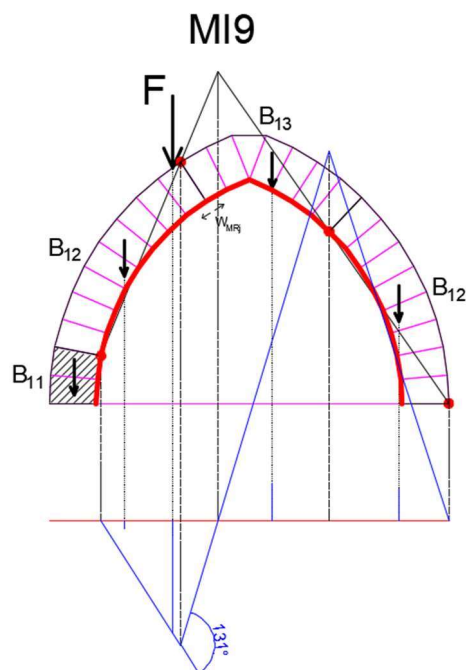
Mehanizam	$\Delta\theta$ [°]	n	V_{MRj} [mm]	W_{MRj1}	$\sum_{j=1}^n W_{MRj}$	δV_F [mm]	$F = \frac{\sum_{j=1}^n W_{MRj}}{\delta v_F} [N]$
MI1	131	1	155,47	27985,31	27985,31	152,39	183,64
MI2	128	1	151,91	27344,42	27344,42	152,39	179,43
MI3	126	1	149,54	26917,17	26917,17	152,39	176,63
MI4	133	1	157,85	28412,56	28412,56	174,15	163,15
MI5	131	1	155,47	27985,31	27985,31	174,15	160,70
MI6	129	1	153,10	27558,05	27558,05	174,15	158,24
MI17	133	1	157,85	28412,56	28412,56	189,84	149,66
MI8	135	1	160,22	28839,82	28839,82	189,84	151,91
MI9	131	1	155,47	27985,31	27985,31	189,84	147,41
MI10	129	1	153,10	27558,05	27558,05	189,84	145,16

Tablica 17. Ukupno granično opterećenje za model MI

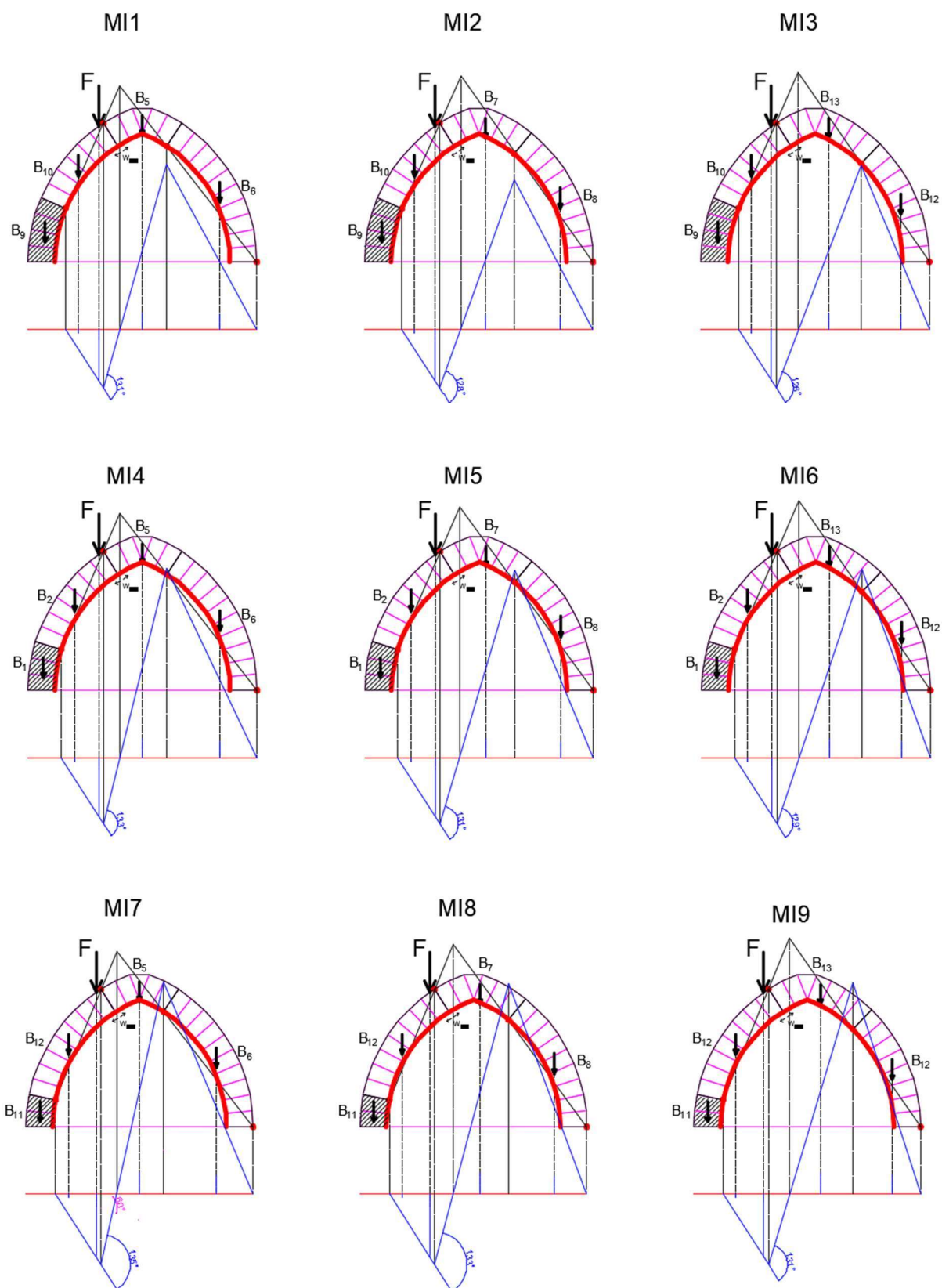
Mehanizam	$F = \frac{-(\sum_{i=1}^3 W_i * v_i + \sum_{j=1}^n W_{MRj})}{v_F}$
MI1	221,81
MI2	213,68
MI3	216,05
MI4	201,28
MI5	199,04
MI6	197,61
MI17	189,33
MI8	191,81
MI9	188,36
MI10	191,34

Kod pojačanog modela M na poziciji intradosa prema tablicama vidljivo je kako je konačna vrijednost sile od 188,3 N mnogo veća od one dobivene u ispitivanju u iznosu od 50 N za početak klizanja blokova te 60 N za urušavanje modela. Kao i za sve ostale pojačane modele dobivena sila kinematičkim postupkom jednaka je onoj sili koja bi bila potrebna da dođe do sloma u pojačanju u nekim savršenim uvjetima kad ne bi došlo do proklizavanja.

Na slici 115 prikazan je mjerodavan mehanizam dobiven kinematičkim proračunom dok su na slici 116 prikazani svi modeli uzeti u obzir u proračunu.



Slika 115. Prikaz mjerodavnog mehanizma MI9



Slika 116. Razmatrani mehanizmi modela M s pojačanjem na intradosu

4.3.4. Proračun modela V pojačanog na intradosu

Zbog sličnosti proračuna sa modelom M pojačanog na intradosu u nastavku su prikazani samo rezultati proračuna.

Tablica 18. Prikaz rezultata virtualnog rada vlastite težine modela VI

Mehanizam	$\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i [Nmm]$	δv_F [mm]	$F = \frac{-\sum_{i=1}^3 W_i * \delta v_i}{\delta v_F} [N]$
VI1	-3974,87	127,06	31,28
VI2	-4337,26	127,06	34,13
VI3	-4646,67	127,06	36,57
VI4	-4559,39	153,96	29,61
VI5	-4988,47	153,96	32,40
VI6	-5354,83	153,96	34,78
VI7	-5202,55	175,08	29,71
VI8	-5695,53	175,08	32,53
VI9	-6116,46	175,08	34,93

Tablica 19. Prikaz rezultata virtualnog rada pojačanja modela VI

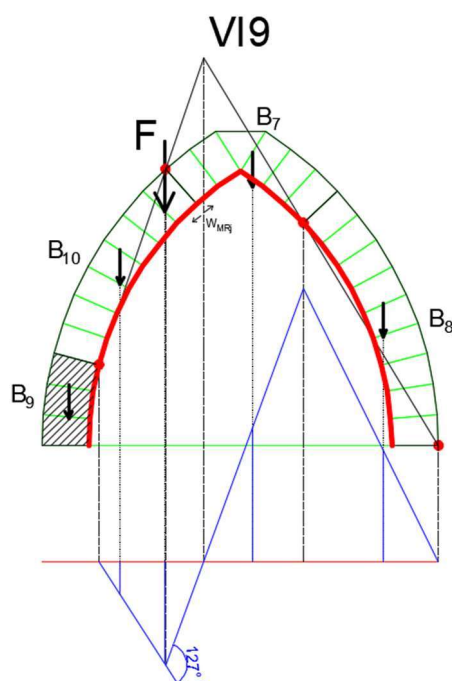
Mehanizam	$\Delta\theta$ [°]	n	V_{MRj} [mm]	W_{MRj1}	$\sum_{j=1}^n W_{MRj}$	δv_F [mm]	$F = \frac{\sum_{j=1}^n W_{MRj}}{\delta v_F} [N]$
VI1	126	1	149,54	26917,17	26917,17	127,06	211,84
VI2	124	1	147,17	26489,91	26489,91	127,06	208,48
VI3	121	1	143,61	25849,02	25849,02	127,06	203,44
VI4	130	1	154,29	27771,68	27771,68	153,96	180,38
VI5	127	1	150,73	27130,79	27130,79	153,96	176,22
VI6	125	1	148,35	26703,54	26703,54	153,96	173,44
VI7	132	1	156,66	28198,94	28198,94	175,08	161,06
VI8	129	1	153,10	27558,05	27558,05	175,08	157,40
VI9	127	1	150,73	27130,79	27130,79	175,08	154,96

Tablica 20. Ukupno granično opterećenje za model VI

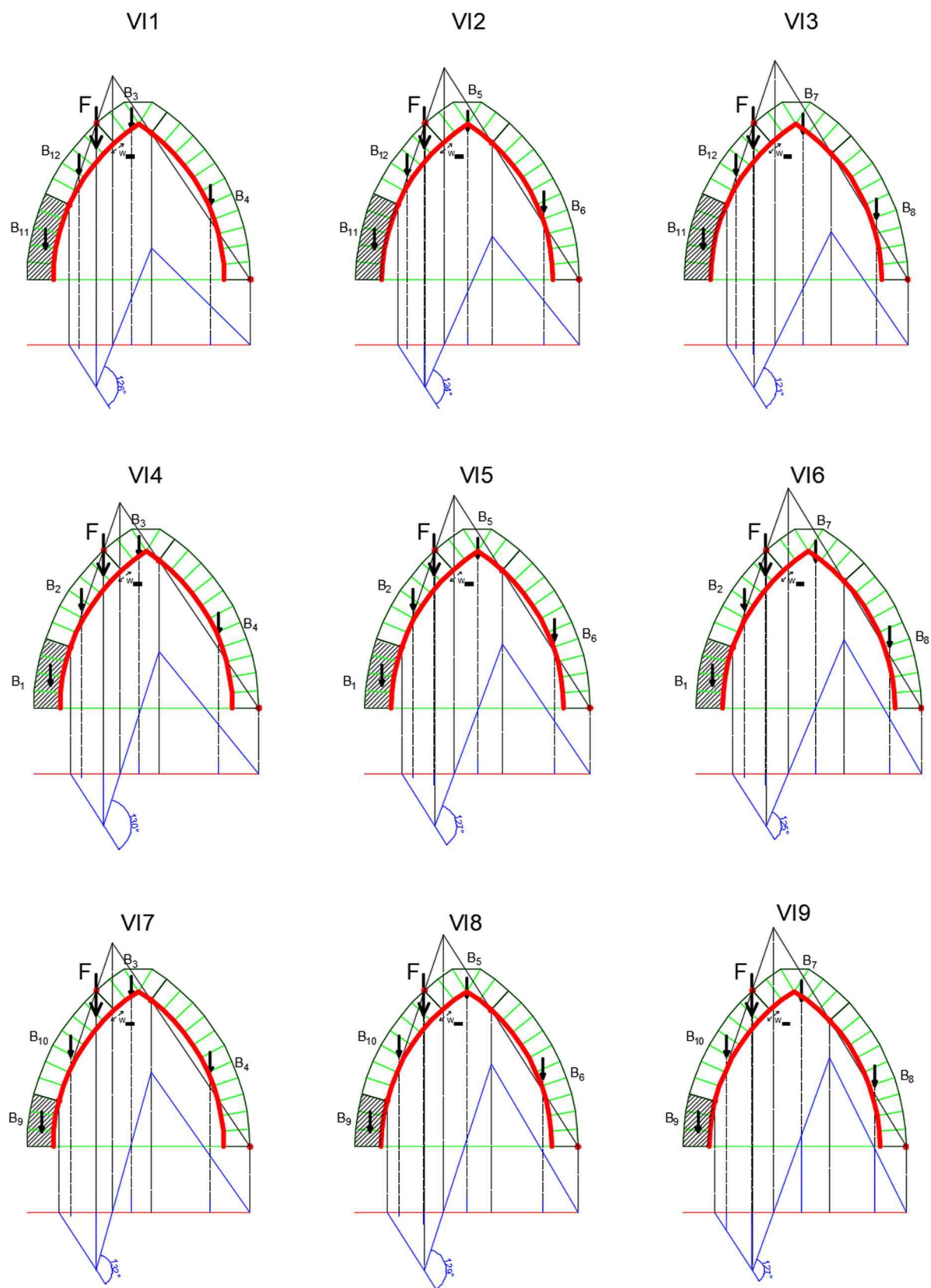
Mehanizam	$F = \frac{-(\sum_{i=1}^3 W_i * v_i + \sum_{j=1}^n W_{MRj})}{\delta v_F}$
VI1	243,12
VI2	242,61
VI3	240,01
VI4	209,99
VI5	208,62
VI6	208,22
VI7	190,77
VI8	189,93
VI9	189,89

Ponovno vidimo i zaključujemo kako dobivena granična sila u iznosu od 189,9 N ona sila pri kojoj bi došlo do sloma u pojačanju pri savršenim uvjetima u modelu (bez klizanja), velika je razlika između kinematički dobivenih rezultata granične sile od 189,9 N u usporedbi sa ispitivanjem gdje je sila pri početku klizanja 60 N i sila prilikom urušavanja modela 110 N.

Na slici 117 prikazan je mjerodavan mehanizam te na slici 118 prikazani su svi modeli uzeti u obzir u proračunu.



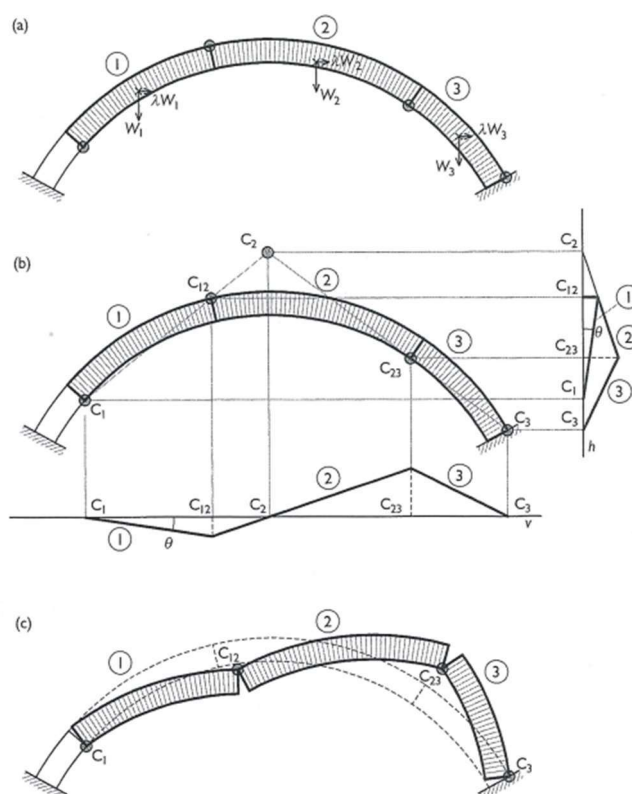
Slika 117. Prikaz mjerodavnog mehanizma VI9



Slika 118. Razmatrani mehanizmi modela V s pojačanjem na intradosu

4.4. Proračun modela na potres

Principom virtualnog rada određena je i granična vrijednost ubrzanja koja će luk pretvoriti u labilni mehanizam. Uz vlastitu težinu luka W_i koja djeluje u težištu kinematičkog bloka, djeluje i horizontalna sila λW_i , proporcionalna vlastitoj težini, pri čemu je λ traženo ubrzanje. Proračun se zasniva kako je i prethodno navedeno tako da zbrojimo virtualni rad vlastite težine na virtualnom vertikalnom pomaku uz doprinos pojačanja ukoliko ga ima te dodatno virtualni rad horizontalne sile na horizontalnom virtualnom pomaku. Na slici 119 prikazan je utjecaj potresa i mehanizam, sa prikazanim vertikalnim i horizontalnim virtualnim planom pomaka.



Slika 119. Luk uslijed potresnog opterećenja: a) blokovi i opterećenje, b) virtualni plan pomaka, c) prikaz mehanizma [1]

Slika 119 prikazuje opterećenje vlastite težine u težištu blokova zajedno sa horizontalnim nepoznatim opterećenjem proporcionalnim sa težinom blokova koja će izazvati rušenje.

Uz poznate vrijednosti vlastitih težina blokova, položaja težišta te njihovog virtualnog pomaka moguće je proračunati virtualni rad.

$$L_w + L_s = 0 \quad (7)$$

Gdje je L_w (8) virtualni rad vlastite težine blokova te L_s (9) virtualni rad nepoznate horizontalne sile proporcionalnoj vlastitoj težini.

$$L_w = \sum_{i=1}^3 W_i * v_i \quad (8)$$

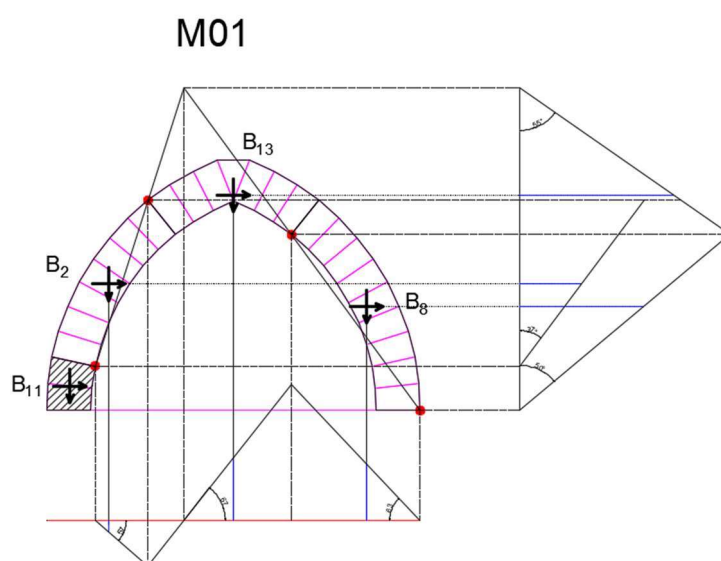
$$L_s = \lambda \sum_{i=1}^3 W_i * h_i \quad (9)$$

Iz navedenih jednažba dobije se vrijednost λ koja je proporcionalna ubrzanju.

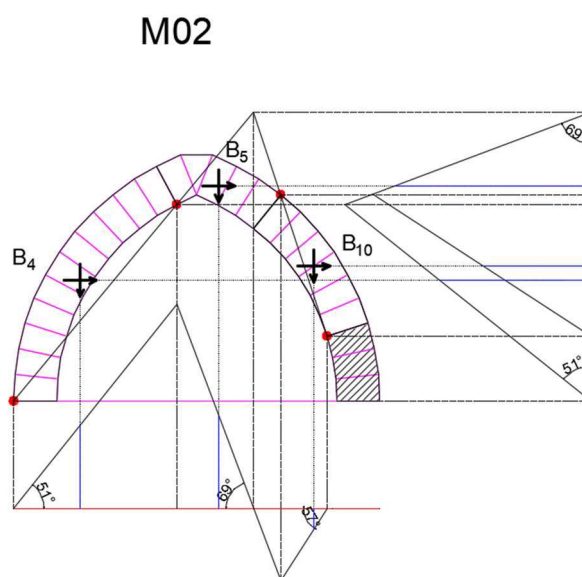
$$\lambda = \frac{\sum W_i * v_i}{\sum W_i * h_i} \quad (10)$$

4.4.1. Proračun modela M bez pojačanja

U ovom poglavlju biti će prikazano određivanje graničnog ubrzanja modela M bez pojačanja kinematičkim postupkom. Proveden je proračun za dva mehanizma koja su se pojavila u eksperimentu na potresnom stolu (desni i lijevi mehanizam). Proračun se provodi isto kao i prethodni proračuni samo uz dodatak rada horizontalne sile na horizontalnom virtualnom pomaku. Na slici 120 prikazan je model M01 (desni mehanizam) sa pripadajućim virtualnim planom dok je na slici 121 prikazan model M02 (lijevi mehanizam).



Slika 120. Model M01: desni mehanizam



Slika 121. Model M02: lijevi mehanizam

U nastavku su prikazani rezultati dobiveni proračunom.

Tablica 21. Proračun mehanizma M01 na potres

MEHANIZAM M01							
Blok	W [N]	v_v [mm]	Virtualni rad vlastite težine	v_H [mm]	Virtualni rad horizontalnih sila	λ	Ubrzanje [m/s ²]
B11	4,06	0	0	0	0	0,37	3,7
B2	14,21	38,79	551,09	233,03	3310,85		
B13	14,52	-214,44	-3114,48	451,47	6557,02		
B8	18,27	-191,85	-3504,64	364,86	6664,97		
		$\Sigma=$	-6068,020366	$\Sigma=$	16532,83705		

Tablica 22. Proračun mehanizma M02 na potres

Mehanizam M02							
Blok	W [N]	v_v [mm]	Virtualni rad vlastite težine	v_H [mm]	Virtualni rad horizontalnih sila	λ	Ubrzanje [m/s ²]
B1	6,09	0	0	0	0	-0,38	-3,8
B4	22,33	-155,65	-3475,13	-279,80	-6246,98		
B5	10,46	-171,18	-1791,28	-364,90	-3818,43		
B10	12,18	38,61	470,20	-199,18	-2425,64		
		$\Sigma=$	-4796,217763	$\Sigma=$	-12491,05046		

Iz tablica je vidljivo kako su dobivena ubrzanja malo veća od onih dobivenih u eksperimentu na potresnom stolu što nije neočekivano zbog nesavršenosti modela, proračun se zasniva na idealnom modelu dok u eksperimentu postoje nesavršenosti.

4.5. Usporedba rezultata

U nastavku prikazani su dobiveni rezultati svih provedenih ispitivanja i proračuna. U tablici 23 prikazani su dobiveni rezultati statičkog eksperimenta i kinematičkog proračuna principom virtualnog rada dok su u tablici 24 prikazani rezultati dobiveni ispitivanjem na potresnom stolu te kinematičkim proračunom na potres.

Tablica 23. Usporedba graničnog opterećenja eksperimenta i numeričke analize

Model	Bez pojačanja		Pojačanje ekstradosa		Pojačanje intradosa	
	Eksperiment	Kinematički postupak	Eksperiment	Kinematički i postupak	Eksperiment	Kinematički postupak
M	24 N	34,2 N	50 N	227,3 N	50 N	188,4 N
V	20 N	29,6 N	50 N	256,6 N	65 N	189,9 N

Tablica 24. Usporedba graničnog ubrzanja na potresnom stolu i numeričke analize

Model	Eksperiment potresni stol	Tilt test	Kinematički postupak
M	2,7-3,0 m/s ²	2,8-3,2 m/s ²	3,6-3,8 m/s ²
MI	6,2 m/s ²	/	/
ME	4,9-6,2 m/s ²	/	/

Iz tablice 23 vidljiva je razlika u rezultatima eksperimenta i proračuna zato jer se kod proračuna uzima u obzir idealni model u idealnim uvjetima dok na rezultate eksperimenta utječe nesavršenost modela. Osim navedenog na numeričke rezultate utječe i to što je korišteno pojačanje ljepljive trake „TEXO American Duct Tape“ koja ima neproporcionalno veliku nosivost za izrađeni model te proračunom su dobivene velike vrijednosti sila koje su potrebne da dođe do sloma u pojačanju dok u eksperimentu nije bilo moguće dostići tako velike iznose opterećenja nego je do urušavanja luka došlo puno prije zbog drugačijih mehanizama sloma (odljepljivanja trake i klizanja blokova).

Usporedbom rezultata za dva modela M i V iz tablice 23 vidljivo je kako kod modela bez pojačanja model M ima veću nosivost od modela V (takav rezultat dobiven je i u programu Arco prikazan u poglavlju 3) dok kod modela sa pojačanjem veću nosivost ima model V. Što se tiče

ponašanja modela tokom ispitivanja, modeli su se ponašali slično. Kod modela bez pojačanja na oba modela došlo je do nastanka prvog zgloba na ekstradosu iznad bloka na kojem se nanosi opterećenje te zatim postepeno otvaranje drugog zgloba na intradosu između blokova 12 i 13, zatim otvaranje trećeg zgloba na ekstradosu između bloka 23 i oslonca te zadnji četvrti zglob kod pretvorbe luka u mehanizam kod modela M javljao se između blokova 3 i 4 dok kod modela V između blokova 4 i 5. Kod modela sa pojačanjima slom luka može se općenito očekivati na dva načina: prvi je slom u materijalu luka (najčešće drobljenje veziva na spojevima blokova ili samih blokova te klizanje blokova duž sljubnica) dok je drugi slom u pojačanju (odljepljivanje pojačanja ili pak kidanje pojačanja). U ispitivanju mehanizam sloma nije bio otvaranje zglobova (no navedeno otvaranje bilo je vidljivo za zglobove koji nisu spriječeni pojačanjem) već je bilo dvojno djelovanje postepenog odljepljivanja pojačanja i klizanja blokova. Pri određenom opterećenju (iz tablice 23 za vrijednosti 50-65 N) u ispitivanju je dolazilo do odljepljivanja pojačanja, te sa daljnjim povećanjem opterećenja do širenja zone odljepljivanja te zbog adhezije pojačanja na blokove i klizanja blokova. Modeli su bili u mogućnosti prihvatiti veće opterećenje do konačnog sloma no mjerodavno je bilo ono pri početku klizanja i odljepljivanja (onda kada konstrukcija ne bi bila više upotrebljiva).

Iz tablice 24 vidljiva je razlika u rezultatima nepojačanih modela iz dinamičkog eksperimenta i numeričke analize zato jer kao što je prethodno navedeno u numeričkoj analizi promatramo idealan model dok je u eksperimentu nesavršenost modela faktor za navedenu razliku u rezultatima. Osim navedenog vidljivo je kako se rezultati potresnog stola i nagibnog tilt testa podudaraju, što znači da se i nagibni test kao puno jednostavnija metoda može koristiti za procjenu graničnog ubrzanja koje konstrukciju pretvara u mehanizam.

U ispitivanju na potresnom stolu uočeno je harmonično otvaranje zglobova tj. zglob koji se otvori na jednom mjestu npr. na ekstradosu između blokova 3 i 4 postepeno se „seli“ ili mijenja položaj po ekstradosu prema vrhu luka što znači da kako se stol pomiče lijevo i desno, prilikom prelaska sa jednog smjera u drugi dolazi do navedenog otvaranja zgloba te sve dok se ponovno ne promijeni smjer kretanja stola dolazi do pomicanja zgloba po ekstradosu sa blokova 3 i 4 na 4 i 5, 5 i 6 itd. (vidljivo na slici 90 i 91).

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je analiza ponašanja nepojačanih i pojačanih lukova na ekstradosu i intradosu. U prvom djelu rada ukratko su prikazane metode za pojačanje lukova i svodova, prikazane su one metode koje su najzastupljenije te je provedena kratka usporedba metoda u kojoj je zaključeno kako se prelaskom na modernije načine pojačanja sa kompozitnim materijalima (PAV i TAM) uvelike doprinosi povećanju nosivosti konstrukcije. No to ne znači da bi ostale metode trebale biti zanemarene već korištene ovisno o potrebi sanacije i pojačanja (svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke te potrebno ju je koristiti gdje se takve prednosti i nedostaci zahtijevaju). Osim teorijskog djela postojećih metoda prikazan je način izvedbe nekih tehnika pojačanja danih od strane različitih proizvođača.

U drugom dijelu rada provedeno je eksperimentalno ispitivanje na umanjenim modelima. Provedena su statička i dinamička ispitivanja na dva modela šiljastih lukova, u statičko ispitivanje spada nanošenje koncentriranog opterećenja na četvrtini raspona luka dok u dinamičko ispitivanje spada nagibni tilt test te ispitivanje na potresnom stolu. Kod eksperimentalnog dijela utvrđeno je kako pojačanje doprinosi nosivosti i duktilnosti lukova. Osim toga utvrđeno je kako kod pojačanog luka potporna linija može izaći van granica luka bez da se neki zglobovi otvore što nije moguće kod luka bez pojačanja gdje se zglobovi otvore kada potporna linija tangira granice luka. Sa navedenim zaključeno je kako je pojačanje na intradosu i ekstradosu luka učinkovit način pojačanja konstrukcije te povećanja njene nosivosti, u ispitivanjima dobivena su povećanja nosivosti u iznosu od 100 do 150%. Osim povećanja nosivosti pojačanje doprinosi i povećanju duktilnosti luka koje je prikazano u tablicama sila/pomak u poglavlju 3 gdje je vidljivo kako se kod pojačanim modelima na ekstradosu pomak povećao za 100 do 150% dok je kod pojačanja na intradosu pomak ostao nepromijenjen u usporedbi sa modelima bez pojačanja.

Načini sidrenja korišteni u ispitivanju bile su simulacije sidrenja pojačanja u zadnji blok na osloncu te u jednom ispitivanju i pokušaj sidrenja u određenim blokovima na intradosu (pokazao se nerealno veliki rezultat). Navedeno sidrenje u zadnji blok korišteno je tako da bi se omogućilo otvaranje zgloba na osloncu koje bi se dogodilo i u stvarnosti. Ukoliko bi u stvarnosti imali slučaj da je luk oslonjen na zidove te pojačanje sidreno preko zadnjeg bloka na zidove također bi se otvorio zglob na osloncu samo ne bi bilo na poziciji zadnjeg bloka već negdje niže u zidu.

Dobiveni rezultati poklapali su se sa očekivanim rezultatima iz uvodnog dijela rada gdje je opisano kako je učinkovitije pojačanje na ekstradosu. U ispitivanjima dobivena je nešto veća nosivost modela pojačanog na ekstradosu nego kod modela pojačanog na intradosu (u pogledu opterećenja potrebnog za rušenje modela) dok je u pogledu opterećenja potrebnog za početak stvaranja mehanizma sloma dobiveno opterećenje bilo jednako ili nešto veće kod pojačanja kod ekstradosa. Tokom ispitivanja uočeno je zanimljivo ponašanje modela pojačanih na intradosu. Naime kod modela pojačanih na ekstradosu odmah je bio vidljiv zglob koji se otvori iznad bloka na kojem se nanosi opterećenje dok kod modela pojačanih na intradosu navedeni zglob nije bio u mogućnosti otvoriti se zbog pojačanja. Zbog nemogućnosti otvaranja tog zgloba nisu se otvorili niti ostali zglobovi koji bi se postepeno otvarali kod modela bez pojačanja i modela pojačanog na ekstradosu već se samo malo otvorio zglob između bloka 23 i oslonca. No u konačnici veću nosivost i veću duktilnost imali su modeli pojačani na ekstradosu tako da se može zaključiti kako je uistinu djelotvornije pojačanje na ekstradosu kao što je navedeno i u uvodu rada.

U trećem djelu rada provedena je numerička analiza lukova kinematičkim postupkom. Razmatrani su različiti mehanizmi koji su kinematički dopustivi, a od svih mehanizama odabrano je najmanje granično opterećenje, dobiveni su očekivani rezultati. Kod modela bez pojačanja dobivene su veće vrijednosti nego u ispitivanju i u programu Arco zato jer kod ispitivanja na rezultat utječe nesavršenost drvenog modela dok u usporedbi rezultata iz programa Arco u kojem je dobiven položaj potporne linije i graničnog opterećenja statičkim teoremom (dobivene su manje vrijednosti) i numeričkom analizom kinematičkim teoremom (dobivene su veće vrijednosti). Kod modela sa pojačanjima iz tablica u poglavlju 4.5 vidljivo je kako su proračunom dobivene mnogo veće vrijednosti granične sile nego u ispitivanjima. Razlog navedenom je što u proračunu razmatramo idealan model u kojem do rušenja dolazi u slomu pojačanja dok je u ispitivanju došlo do odljepljivanja pojačanja i klizanja blokova. Osim provedenog proračuna za granično opterećenje proveden je i proračun na potres za modele bez pojačanja u kojem su dobiveni očekivani rezultati (nešto veći od onih kod ispitivanja).

Što se tiče modela izrađenih od drva, modeli su se pokazali kao dobro rješenje za potrebe ovog diplomskog rada u kojem je glavni cilj opisivanje ponašanja luka budući da njegovo ponašanje ne ovisi o materijalu već o geometriji tj. položaju potporne linije. Drveni modeli pokazali su se „zgodni“ jer je moguće isti model ponovno složiti te upotrebljavati više puta. Osim navedenog model izrađen od drva jeftiniji je od zidanog te je lakša izrada i sastavljanje modela.

U slučaju budućih ispitivanja, pošto su se ispitivanja iz ovog rada pokazala kao dovoljno dobra, za nastavak ovakvih oblika ispitivanja preporučuje se pažljivija izrada modela kako bi geometrija blokova bila što točnija te korištenje pojačanja (trake) manje nosivosti kako bi uistinu došlo do traženog mehanizma sloma.

6. LITERATURA

- [1] Roca, P., Lourenco P., Gaetani A., Historic Construction and Conservation Materials, Systems and Damage, Routledge Taylor & Francis Group, 2019.
- [2] Tomasoni, R., Analisi, verifiche e consolidamento strutturale di archi e volte, Manuale per la valutazione della sicurezza e per la progettazione degli interventi, Dario Flaccovio Editore, 2015.
- [3] Heyman, J., The masonry arch, Cambridge University, Ellis Horwood Limited, 1982.
- [4] Proračun zidanih lučnih i svođenih konstrukcija, Paulo Šćulac, Obnova zgrada nakon potresa, www.hcpi.hr, pristup: 01.07.2022.
- [5] Zampieri P., Simoncelo N., Tetougueni C.D., Pellegrino C.: A review of methods for strengthening of masonry arches with composite materials, Engineering Structures 171, 154-169, 2018.
- [6] Jurina, L., Interventi „Rispettosi“ per il consolidamento di archi, volte e cupole in muratura, www.jurina.it, pristup: 02.07.2022.
- [7] Jurina, L., Strengthening of masonry arch bridges with “RAM” – Reinforced Arch Method, www.jurina.it, pristup: 02.07.2022.
- [8] Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atlić, J., Šavor-Novak, M., Lakušić, S., Potresno inženjerstvo, obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [9] Rinforzo strutturale, Mapei, www.mapei.it, pristup: 01.07.2022.
- [10] Seizmički priručnik Saint-Gobain, www.weber.hr, pristup: 01.07.2022.
- [11] Kerakoll katalog, www.kerakol.com, pristup: 01.07.2022.
- [12] Blasi C., Borri A., Di Pasquale S., Malesani P., Nigro G., Parducci A., Tampone G., Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione postsismica degli edifici, Regione dell'Umbria, DEI Tipografia del genio civile, 1999.
- [13] Povelja ICOMOS-a – Principi analize, konzervacije i restauracije konstrukcije graditeljskog nasljeđa, (ICOMOS CHARTER – Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage), International council on monuments and sites (ICOMOS), 2003.
- [14] FIB Bulletin 90, Externally applied FRP reinforcement for concrete Structures, International Federation for Structural Concrete (fib), 2019.
- [15] ACI 549.6R-20: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (TRM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures, American Concrete Institute, 2020.
- [16] Kišiček, T., Stepinac, M., Renić, T., Hafner, I., Lulić, L., „Pojačanje zida na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a, Građevinar 72, 937-953, 2020.
- [17] Pecchenino, A., Le volte in muratura: analisi, modellazione e rinforzo con FRP, Grafill, 2015. g.
- [18] Program „Arco“, <https://gelfi.unibs.it/arco.htm>, pristup, 08.07.2022.