

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Kurnjek, L. 2012. Ciklo – program za analizo rezultatov histereznega odziva zidov. Diplomski nalogi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorica Kržan, M.): 94 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Kurnjek, L. 2012. Ciklo – program za analizo rezultatov histereznega odziva zidov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisor Kržan, M.): 94 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

LUKA KURNJEK

**CIKLO – PROGRAM ZA ANALIZO REZULTATOV
HISTEREZNEGA ODZIVA ZIDOV**

Diplomska naloga št.: 3246/KS

**CIKLO – PROGRAM FOR THE ANALYSIS OF THE
MASONRY WALL HISTERESIS RESPONSE RESULTS**

Graduation thesis No.: 3246/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Meta Kržan

Član komisije:

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 25. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Luka Kurnjek izjavljam, da sem avtor te diplomske naloge z naslovom:

»Ciklo – program za analizo rezultatov histereznega odziva zidov«.

Izjavljam, da je elektronska različica enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 20.9.2012

Luka Kurnjek

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.2+692.2(043.2)
Avtor:	Luka Kurnjek
Mentor:	izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Naslov:	Ciklo – program za analizo rezultatov histereznega odziva zidov
Obseg in oprema:	94 str., 1 pregl., 13 graf., 65 sl., 38 en.
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Ključne besede:	kamnite zidane konstrukcije, ciklično obremenjevanje, robni pogoji preizkušanja, nivo predkompresije, tlačne napetosti, strižna togost, disipacija energije

Izvleček

V diplomski nalogi smo opisali eksperimentalne preiskave na kamnitih zidovih, ki smo jih izvedli v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju, UL FGG. Podrobneje smo opisali potek cikličnih strižnih preiskav. Grafično smo prikazali, kako smo na zidu merili pomike in v katerih smereh. Nato smo opisali teoretične osnove za obdelavo rezultatov. Za osnovo opisa histerezne zanke smo si izbrali značilne točke zanke, iz katerih smo določili strižno togost in nosilnost preskušanca. Določili smo energijo pri cikličnem obremenjevanju in smo izpeljali enačbe za izračun ekvivalentnega koeficienta viskoznega dušenja. Napisali smo enačbe za določitev upadanja togosti, elastičnega območja obnašanja preskušanca in izračuna duktilnosti zidu. Prikazali smo dva kriterija za idealizacijo ovojnice histereznih zank, pripadajoče posameznemu testu. V nadaljevanju smo prikazali delovanje programskega orodja razvitega v sklopu te diplome, za obdelavo rezultatov testov. Program je napisan v 10 datotekah, ki smo jih opisali zaporedno v desetih poglavjih. Obrazložili smo delovanje programa in tudi navodila za uporabo. Na koncu smo prikazali delovanje programa na 5 strižnih testih in rezultate, ki smo jih dobili s programom, med sabo primerjali. Te smo tudi grafično opremili, s slikami, ki nam jih izriše program.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 691.2+692.2(043.2)

Author: Luka Kurnjek

Supervisor: Assist. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph.D.

Title: Ciklo – program for the analysis of the masonry wall hysteresis response results

Notes: 94 p., 1 tab., 13 gr., 65 fig., 38 eq.

Type: Graduation thesis – University studies

Keywords: stone masonry buildings , cycled loading, boundary conditions of testing, level of precompression, compression stresses, shear rigidity, dissipation of energy

Abstract

In the graduation thesis we described the experiments on stone masonry walls, which were performed in the structural laboratory of UL FGG. In detail we described the shear tests under cyclic horizontal load. Graphically we presented how the displacements on the wall were measured, and in which directions were they measured. Then we described the theoretical background for the analysis of the results. For the basic description of the hysteresis curve we chose the typical points of the curve, from which we calculated the shear stiffness and the load-bearing capacity of the specimens. We set the criteria for the calculation of absorbed energy by cycled loading and we set the equations for the definition of the equivalent coefficient of viscous damping. We wrote down the equations for calculating the change of stiffness, evaluation of the elastic range and calculation of the ductility of the wall. We showed also two criteria's for the idealization of the envelope from all curves from a test. Further on, we showed the structure of the program developed in this graduation thesis, for processing the results of the tests. The program was written in 10 main files, which we sequentially described in then chapters. We explained how the program works and wrote the instructions how to use it. At the end we presented how the application of the program on 5 shear tests and we compared the results, that we got with the program. We also presented the results graphically, with the pictures that were outputted with the program.

ZAHVALA

Izdelava diplomske naloge je potekala v sklopu projekta PERPETUATE-Performance based approach to the earthquake protection of cultural heritage in Europe and Mediteranean countries FP7-ENV-2009 št. pogodbe no. 244229.

Moji somentorici uni. dipl. Meti Kržan in mojemu mentorju izr. prof. dr. Vlatku Bosiljkovu se zahvaljujem za koristne napotke in vse korekture pri nastajanju diplome. Za občasne nasvete se zahvaljujem tudi ostalim članom Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij. Hvala še Franciju Čeponu, Janezu Korpiču in Meti Kržan za dobro vzdušje med delom v laboratoriju.

Zahvaljujem se tudi članom Katedre za mehaniko, ki so mi izčrpno odgovarjali na vsa moja vprašanja v 2. letniku mojega študija, me sprejeli medse in mi tako prvi pokazali veselje raziskovalnega dela. Posebej se zahvaljujem prof. dr. Dejanu Zupanu, ki me je z nalogami in občasnimi nasveti postavil na pravo pot, kjer sem se naučil programirat.

Zahvala gre tudi članom Katedre za matematiko in fiziko, ki so nas kot prvi s svojimi predavanji in vajami naučili natančnejšega razmišljanja in dojetanja stvari, ter z dodatnimi nalogami za bonus točke vedno znova motivirali za delo.

Hvala vsem prijateljem, študijskim in drugim, ki ste mi z dobro družbo in pametnimi nasveti dali voljo in navdih, da sem zmozel opraviti z vsemi težkimi nalogami na tej poti.

Še posebej hvala mojima staršema. Skozi leta sta mi pokazala, da če delaš z veseljem in vztrajnostjo, se da tudi najtežje delo opraviti. Brez tega danes ne bi bil kjer sem.

Vsem prav lepa hvala!

KAZALO VSEBINE:

1	UVOD.....	1
1.1	Potresi v Sloveniji	3
1.2	Obnašanje zidanih konstrukcij med potresom.....	5
1.3	Potrebe po raziskavah in programskem orodju za obdelavo rezultatov	7
2	CIKLIČNE PRISKAVE KAMNITIH ZIDOV	11
2.1	Opis eksperimenta	11
2.1.1	Preizkušanci	12
2.1.2	Sistem preizkušanja in merjenje pomikov	17
2.2	Obdelava rezultatov.....	25
2.2.1	Značilne točke histerezne zanke	26
2.2.2	Strižna togost in nosilnost	27
2.2.3	Energija pri cikličnem obremenjevanju	29
2.2.4	Ekvivalentni koeficient viskoznega dušenja	30
2.2.5	Upadanje nosilnosti in togosti.....	35
2.2.6	Ovojnica vseh histereznih zank.....	38
2.2.7	Elastično območje zidu	39
2.2.8	Idealizacije ovojnice	40
2.2.9	Duktilnost zidu.....	43
3	DELOVANJE PROGRAMA	45
3.1	Branje podatkov	53
3.2	Izločitev neuporabnih točk	55
3.3	Določitev računskih amplitud	57
3.4	Razvrstitev točk v matrike posameznih ciklov.....	58

3.5	Računanje padanja togosti in dušenja	59
3.6	Račun ovojnic	60
3.7	Idealizacija po kriteriju maksimalne sile	60
3.8	Idealizacija po kriteriju 1. strižne razpoke	62
3.9	Risanje vseh ciklov in izbranega	62
3.10	Izpis rezultatov	63
4	PRIMERJAVA POSAMEZNIH TESTOV	65
4.1	Različna robna pogoja	82
4.2	Nivoji predkompresije	82
4.3	Porušni mehanizmi	84
4.4	Disipacija energije po posameznem ciklu	86
5	ZAKLJUČEK	91
VIRI		93

KAZALO PREGLEDNIC:

Preglednica 2.1: Primer odseka rezultatov za Test 1	25
---	----

KAZALO GRAFIKONOV:

Grafikon 2.1: Sila v odvisnosti od časa za tlačni preizkus zidu	17
Grafikon 2.2: Protokol vodenja pomika v odvisnosti od časa	24
Grafikon 3.1: Pomik bata v odvisnosti od časa za celoten test.....	54
Grafikon 3.2: Sila bata v odvisnosti od časa za celoten test.....	55
Grafikon 4.1: Nosilnosti zidov iz idealiziranih diagramov	80
Grafikon 4.2: Elastični pomiki zidov iz idealiziranih diagramov	80
Grafikon 4.3: Duktilnost zidov iz idealiziranih diagramov	81
Grafikon 4.4: Togosti zidov iz idealiziranih diagramov	81
Grafikon 4.5: Disipacija energije za test 1	86
Grafikon 4.6: Disipacija energije za test 1.2	87
Grafikon 4.7: Disipacija energije za test 4	88
Grafikon 4.8: Disipacija energije za test 7	88
Grafikon 4.9: Disipacija energije za test 13	89

KAZALO SLIK:

Slika 1.1: Kraška hiša v Štanjelu	1
Slika 1.2: Zid iz laporja (levo) in zid iz apnenca (desno)	2
Slika 1.3: Karta nadžarišč potresov - magnitude	3
Slika 1.4: Evropsko-mediteranska potresna karta nevarnosti	4
Slika 1.5: Porušeni objekt v severni Italiji zaradi potresa 20. maja 2012.	6
Slika 1.6: Vertikalne armiranobetonske vezi s horizontalno AB ploščo	7
Slika 2.1: Kamniti zidaki, uporabljeni za zidanje vzorcev za testiranje	12
Slika 2.2: Apneni omet in maltni stik med kamni.....	13
Slika 2.3: Zid, pripravljen za transport z delno porisanim ometom.....	14
Slika 2.4: Zid, vpel v napravo za strižne preiskave	15
Slika 2.5: Sistem za prenašanje zidu	16
Slika 2.6: Manjši zid, pripravljen za tlačni preizkus	18
Slika 2.7: Naprava za strižno preizkušanje	19
Slika 2.8: Načrt naprave za strižne preizkuse	20
Slika 2.9: Voziček, ki se lahko pelje po spodnjih dveh nosilcih.....	21
Slika 2.10: Ogrodje in servo-hidravlični bat za potiskanje preizkušancev v horizontalni smeri	22
Slika 2.11: Induktivni merilniki za zajem pomikov.....	23
Slika 2.12: Histerezna zanka z značilnimi točkami	27
Slika 2.13: Naklonski premici togosti histerezne zanke	28
Slika 2.14: Površina histerezne zanke, ki predstavlja disipirano energijo	30
Slika 2.15: Povečevanje padca nosilnosti med cikli pri večanju amplitudnih pomikov.....	35
Slika 2.16: Točke pozitivnih togosti in interpolacijska krivulja	37
Slika 2.17: Vse histerezne zanke.....	38
Slika 2.18: Pozitivna in negativna ovojnica vseh histereznih zank	39
Slika 2.19: Idealizacija pozitivne ovojnice odziva zidu z upogibnim.....	42
Slika 2.20: Idealizacija pozitivne ovojnice odziva zidu z upogibnim mehanizmom po kriteriju maksimalne sile.....	43
Slika 3.1: Klicanje programa z ukazom CikloGo in izpis rezultatov.....	46
Slika 3.2: Vnos Excelove datoteke za branje vhodnih podatkov	47

Slika 3.3: Matrika ekvivalentnih koeficientov viskoznega dušenja za vse obremenitve v pozitivni smeri	51
Slika 3.4: Izpis matrike računskih amplitud ter matrike <i>performance</i>	52
Slika 3.5: Histerezne zanke za izbrani amplitudni pomik	63
Slika 4.1: Vse histerezne zanke za test 1	66
Slika 4.2: Ovojnice za test 1	66
Slika 4.3: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 1	67
Slika 4.4: Upadanje togosti za test 1	67
Slika 4.5: Vse histerezne zanke za test 1.2	68
Slika 4.6: Ovojnice za test 1.2	68
Slika 4.7: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 1.2	69
Slika 4.8: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 1.2	69
Slika 4.9: Upadanje togosti za test 1.2	69
Slika 4.10: Porušitev zidu med zgornjima vrstama kamnov za test 1.2	70
Slika 4.11: Detajlna slika porušitve zidu za test 1.2	70
Slika 4.12: Vse histerezne zanke za test 4	71
Slika 4.13: Ovojnice za test 4	71
Slika 4.14: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 4	72
Slika 4.15: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 4	72
Slika 4.16: Upadanje togosti za test 4	72
Slika 4.17: Strižna porušitev na obeh straneh zidu pri testu 4	73
Slika 4.18: Razpokan omet na zidu pri testu 4	73
Slika 4.19: Vse histerezne zanke za test 7	74
Slika 4.20: Ovojnice za test 7	74
Slika 4.21: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 7	75
Slika 4.22: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 7	75
Slika 4.23: Upadanje togosti za test 7	75
Slika 4.24: Strižna porušitev na obeh straneh zidu pri testu 7	76
Slika 4.25: Odstopanje ometa od zidu pri testu 7	76
Slika 4.26: Vse histerezne zanke za test 13	77
Slika 4.27: Ovojnice za test 13	77

Slika 4.28: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 13.....	78
Slika 4.29: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 13	78
Slika 4.30: Upadanje togosti za test 13	78
Slika 4.31: Strižna diagonalna porušitev zidu pri testu 13.....	79
Slika 4.32: Razpoka v srednji ravnini zidu pri testu 13	79
Slika 4.33: Ovojnica strižnega obnašanja zidu v odvisnosti od nivoja tlačnih obremenitev.....	84
Slika 4.34: Mehanizmi porušitve za zidove, obremenjene v ravnini.....	85

1 UVOD

Hiše, grajene v preteklih stoletjih, se močno razlikujejo od teh, ki smo jih začeli graditi v drugi polovici 20. stoletja in v 21. stoletju. Danes imamo večinoma opečnate zidane stavbe, ojačene z armirano betonskimi elementi in opremljene z lesenimi strešnimi nosilci. Včasih pa se je veliko gradilo tudi iz zidakov, ki niso bili iz opeke, temveč iz različnih vrst tako ali drugače obdelanega kamna.

Slovensko ozemlje nima veliko ohranjenih kamnitih zidanih stavb iz zgodnjega obdobja romanike. Ohranilo se je le nekaj fragmentov reprezentativnih stavb tedanjega časa, kot so bile cerkve, gradovi in samostani. A tudi te objekte so v kasnejših obdobjih gotike ter renesanse največkrat obnovili ali prezidali. Leta 1515 je močan potres v osrednji Sloveniji na gradovih in mestih povzročil precejšnjo škodo, kar je spet pospešilo obnovo oz. novogradnjo porušenih stavb. Kamnite stavbe, ki so se pri nas ohranile, zato izvirajo večinoma iz 18., 19. ter 20. Stoletja. Starejše hiše pa najdemo predvsem ob obalnem pasu, na Krasu in Slovenski Istri, kjer je ohranjena tudi ena najstarejših kamnitih hiš, Kraška hiša v Štanjelu (Slika 1.1). Ta je bila grajena brez malte.



Slika 1.1: Kraška hiša v Štanjelu

(http://kraj.eu/slovenija/stanjel_kraska_hisa/DSC_8054_stanjel_kraska_hisa/slo)

Tipična je bila, iz laporja grajena, Istrska hiša. Kamen, uporabljen pri gradnji, je izviral iz okoliških kamnolomov in so ga ročno obdelovali (Slika 1.2, levo). Včasih pa se je gradilo tudi iz belega kamna (apnenca), ki je bil znan po obstojnosti površine in svetlosti barve (Slika 1.2, desno). Ker spadajo starejši objekti, ki so v preteklosti imeli pomembno družbeno vlogo, pod kulturno dediščino, jih je potrebno ohranjati in renovirati. Mnogo od njih je tudi pod spomeniškim varstvom. Pri prenovah se pogosto posvetimo le zunanji in notranji podobi stavbe, ne pa nosilni konstrukciji. Prav ta pa ima pomembno vlogo, saj zagotavlja stabilnost objekta in varno uporabo. Če konstrukcija ne kaže posebnih znakov poškodb, je za običajne razmere navadno varna za uporabo. Kar pa ne velja zagotovo pri izrednih razmerah, kot je potres, pri katerem so konstrukcije močno obremenjene in se lahko tudi zrušijo.



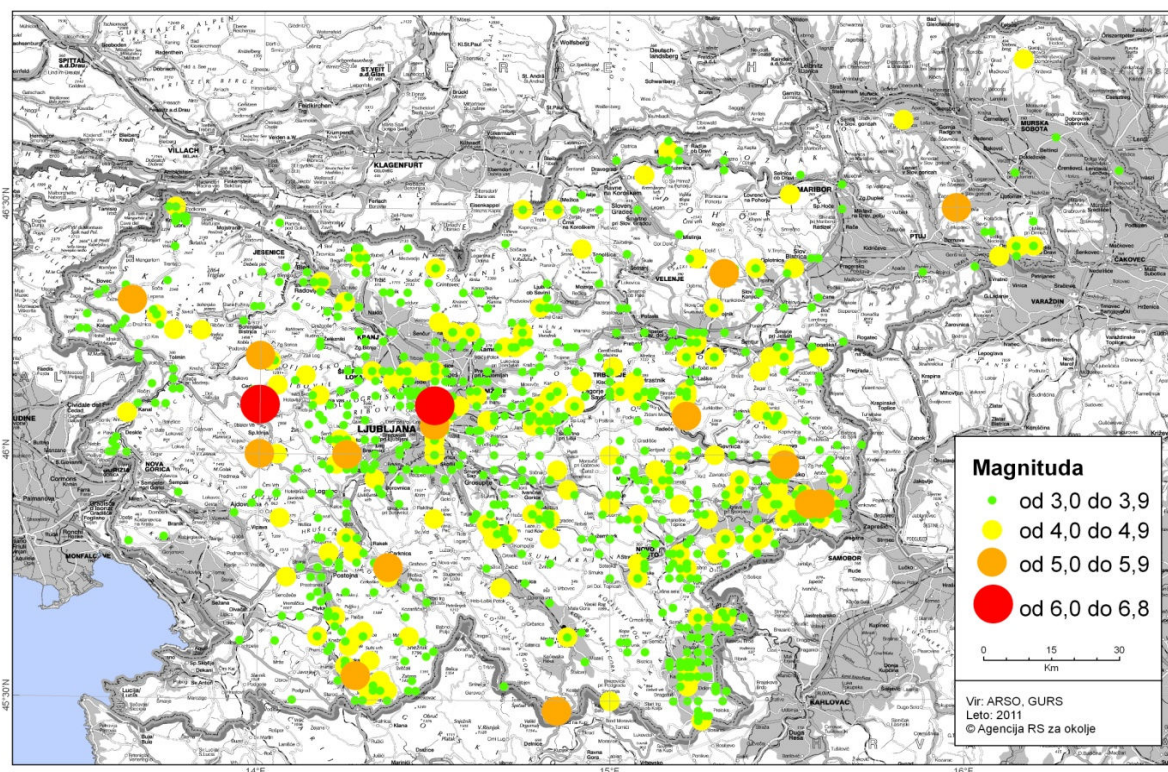
Slika 1.2: Zid iz laporja (levo) in zid iz apnenca (desno)

Za močnejše potrese se zavedamo, da je verjetnost dokaj majhna, da se zgodijo v življenjski dobi običajne konstrukcije, ki znaša približno 50 let. Novi objekti so običajno projektirani na potrese s povratno dobo 475 let, katerih verjetnost v 50 letih je 10.5%. Pri obravnavi obstoječih objektov se moramo zavedati, da so nekatere stavbe kulturne dediščine lahko stare po več 100 let in so zato že verjetno doživele v svoji življenjski dobi kakšen blažji oziroma močnejši potres. Ti potresi običajno oslabijo nosilno konstrukcijo stavbe, kar še dodatno poveča tveganje uporabe zgradbe. Zato je smiselno take objekte temeljito pregledati in njihovo stabilnost ponovno preračunati ob upoštevanju potresnih obremenitev. Problematika obstoječih objektov, ki so že bili ojačeni, je ta, da pri ponovnem izračunu statike, ne poznamo detajlov izvedbe zidov, ki so lahko skriti v stenah in tudi ne materialnih karakteristik, katere nujno rabimo za račun potresne odpornosti. Zato se pojavi potreba po raziskavah, pri katerih

se z cikličnimi obremenitvami, analizira posamezne konstrukcijske elemente, kamnitih zidanih objektov, ob znanih materialnih karakteristikah uporabljenih materialov in znanim načinom zidanja objekta. Na tak način smo si tudi zastavili naše raziskave, katerih cilj je bil, da s pridobljenimi rezultati pripomoremo k razumevanju obnašanja zidanih kamnitih zidov med potresom, ki se pogosto najdejo pri starejših gradovih in graščinah.

1.1 Potresi v Sloveniji

Večino ozemlja Slovenije je srednje potresno ogroženega. Kot je razvidno iz karte nadžarišč potresov – magnitude (Slika 1.3), sta območji okoli Ljubljane in Idrije doživeli že močnejši potres. Pri nas potresi nimajo velikih vrednosti magnitud, so pa njihovi učinki toliko večji zaradi plitvih žarišč, ki se gibljejo najpogosteje od 7 do 15 km pod površino zemlje. Pasovno območje z največjo potresno nevarnostjo poteka po osrednjem delu Slovenije od severozahoda proti jugovzhodu države. Z oddaljevanjem od tega pasu proti severovzhodu in jugozahodu se potresna nevarnost vidno zmanjšuje.



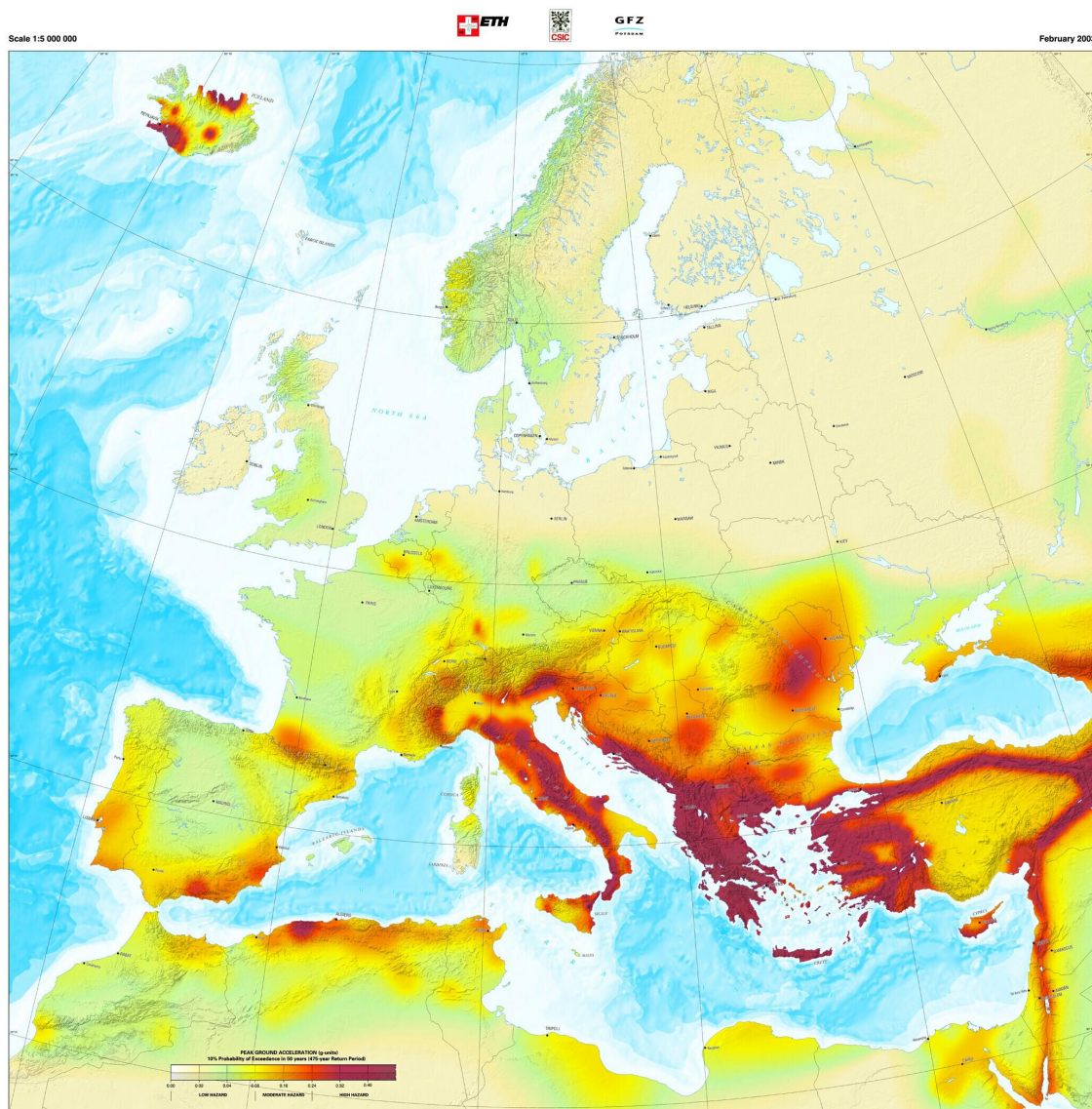
Slika 1.3: Karta nadžarišč potresov - magnitude

(http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20aktivnost/magnitude_potresov.html)

Poudariti je treba, da magnituda meri količino sproščene energije pri potresu in se izraža preko določene enačbe. Pri potresu A, ki ima magnitudo za 1 večjo od potresa B, se sprosti $(10^1)^{3/2} = 31.6$ krat več energije. Povratne dobe zabeleženih potresov v Sloveniji se razlikujejo glede na magnitude potresov in tudi na kraje, kjer so se pojavili. Ljubljana na primer, ki je izrazito potresno območje, je zadnji rušilni prizadel leta 1895, ki je do zdaj bil edini zabeležen na tem območju s magnitudi večjo od 6. Takrat je bilo veliko tedanjih objektov poškodovanih.

EUROPEAN-MEDITERRANEAN SEISMIC HAZARD MAP

Editors: D. Giardini, M. J. Jiménez and G. Grünthal



Slika 1.4: Evropsko-mediteranska potresna karta nevarnosti

(<http://wija.ija.csic.es/gt/earthquakes/>)

Na Evropsko-mediteranski potresni karti nevarnosti (Slika 1.4) so razvidna potresna območja v Evropi in ob vsej mediteranski obali. Barve prikazujejo različne stopnje pričakovanih horizontalnih pospeškov tal med potresom s povratno dobo 475 let, izraženih v enoti težnostnega pospeška g . Tako označuje vijolična barva pospeške v območju od 0,30 do 0,50 g , oranžna od 0,20 do 0,30 g , rumena od 0,05 do 0,10 g in bela od 0,0 do 0,05 g .

1.2 Obnašanje zidanih konstrukcij med potresom

Učinkovito projektiranje konstrukcij na potres se je pri nas začelo s novimi jugoslovanskimi potresnimi predpisi leta 1963, po takratnem potresu v Skopju v Jugoslaviji istega leta (Kilar, 2004). Zato za stavbe, ki so bile pri nas grajene do leta 1964, ni nujno, da so ustrezno potresno zgrajene. Kar pa še ne pomeni, da se bodo te stavbe tudi porušile, če jih prizadene potres. Na potresni odziv stavbe namreč vpliva veliko parametrov, med katerimi so magnituda potresa, globina žarišča, kvaliteta zemljine ter karakteristike stavbe, kot so geometrija objekta, izvedbeni detajli, uporabljeni materiali, statični sistem konstrukcije (možnost konstrukcije, da prerazporedi notranje sile) in še kaj. Naslednji mejnik je bil leta 1979, ko se je zgodil potres v Črni Gori. Leta 1981 so tako izšli novi potresni predpisi. Ti so bolj natančno opredelili konstrukcijske zahteve za potresno odporno gradnjo. Po letu 1999 pa so se postopoma začeli uveljavljati Evrokodi. To so sedaj poenoteni evropski standardi za projektiranje vseh vrst inženirskih konstrukcij, ki veljajo na celotnem območju Evropske unije in se za posamezne države razlikujejo le po nacionalnih dodatkih. Skupaj jih je 9. Prva dva se osredotočata na določitev vseh vrst obtežb, ki nastopijo v življenjski dobi konstrukcije (lastna teža, stalna teža, koristna obtežba, sneg, veter in potres), ter njihovih kombinacij za projektiranje. Naprej si Evrokodi sledijo po različnih vrstah uporabljenih materialov za konstrukcije. To so armirano betonske (AB) konstrukcije, jeklene konstrukcije, sovprežne konstrukcije iz AB in jekla, lesene konstrukcije, zidane konstrukcije in geotehnične konstrukcije (konstrukcije, ki podpirajo zemljino ali so na kak drug način povezane z njo). Na koncu se še posebej obravnava projektiranje na potres, kot obtežni primer za vse vrste konstrukcij. Že to, da ima ta vrsta obtežbe edina sama svoje poglavje, kaže na njeno kompleksnost in težavnost ustreznega potresnega projektiranja. Pri nas so se Evrokodi dobro uveljavili in se sedaj vse vrste konstrukcij projektira na te standarde.

Vendar pri zidanih konstrukcijah ostajajo še odprta vprašanja, kljub temu, da je to pogosta gradnja. Zid je narejen kot sestavljen nosilni element iz malte in opečnatih ali kamnitih zidakov. Malta, ki deluje kot vezno sredstvo med zidaki, je predvsem obremenjena na tlak in strig, zidak pa na tlak in upogib. Zaradi majhne upogibne trdnosti zidakov (kamnitih ali opečnih) in nesposobnosti običajnih malt, da bi prevzele večje deformacije pri potresni obtežbi, so zidane konstrukcije bolj ranljive pri potresu, kot sodobni leseni, armirano betonski in jekleni objekti. Zato pri zidanih stavbah izvajamo primerne konstrukcijske ukrepe, ki povečajo potresno odpornost stavb. Pri veliko starejših zidanih objektih stene med sabo niso povezane v vogalih in tudi na vrhu niso sklenjene z nosilcem ali kako drugače povezane. Povezanost sten pri potresu naredi bistveno razliko pri prevzemu obremenitev, saj pri nepovezanih stenah vsaka stena deluje za sebe. In ker slabo prenašajo obremenitve pravokotno na svojo ravnino, se lahko pri potresu podrejo. Kar pa seveda pogosto pomeni tudi porušitev celotnega objekta. Dejanske primere porušitve smo lahko nedavno spremljali pri potresih v severni Italiji, maja leta 2012. V območju severovzhodno od Parme sta nastopila 2 potresa z magnitudami 5.9 in 5.8. Nekatere zidane cerkve so se sesule, druge pa so bile močno poškodovane (Slika 1.5).



Slika 1.5: Porušeni objekt v severni Italiji zaradi potresa 20. maja 2012

(<http://www.delo.si/novice/svet/cutili-smo-potres-epicenter-v-severni-italiji.html>)

1.3 Potrebe po raziskavah in programskem orodju za obdelavo rezultatov

Kot smo v prejšnjem poglavju omenili, morajo biti stene stavbe med sabo povezane v vogalih in po zgornjem robu za dober prevzem potresnih obremenitev. Te vezi so večinoma narejene iz armiranega betona. V vogalih se za stebre pogosto uporabijo betonski elementi, ki so znotraj votli, da se vanje lahko vertikalno položijo armaturne palice. Te se med sabo poveže s stremeni in na koncu se v votlino vlije beton ter vse skupaj zabetonira. Z izvajanjem zamikov votlakov pri zidanju stebra, se steber dobro sprime z obema zidovima, ki mejita na vogal. Na vrhu etaže pa se pogosto v celoti naredi armirano betonski nosilec, ki poveže vse stene po zgornjem robu in se mu pravi betonski venec (Slika 1.6).



Slika 1.6: Vertikalne armiranobetonske vezi s horizontalno AB ploščo (www.gradisan.si)

Na zgornji sliki se vidi, kako so stene ojačene z vertikalnimi AB stebri in z AB ploščo, ki na nivoju etaže povezuje stene. Armaturo s stebrov se poveže z armaturo s plošče. Stebri običajno potekajo v vogalih, ob odprtinah in na mestih, kjer se v notranjosti delijo prostori.

Tako se tvori v ravnini stene nosilni sistem iz zidane stene in armirano betonske vezi, ki objema zid po vseh treh zunanjih robovih. Izračun prenosa obtežbe na takem kombiniranem nosilnem elementu je še težji, kot na samem zidu. Osnova za tak izračun je pa obnašanje nepovezanega zidu. Zato smo se v našem primeru osredotočili na testiranje samega zidu. Na njem smo izvajali strižne in tlačne preiskave in smo rezultate primerjali glede na različne robne pogoje oziroma načine vpetja zida (konzolna ali vrtljiva vpetost), usmerjenost zidakov pri gradnji (morfologija zidov) in vpliv različnih nivojev predkompresije zidu na dobljene mehanizme porušitve.

Preizkusi na opečnih zidovih so se na naši fakulteti na Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij izvajali že večkrat (Hudobivnik, 2011), kjer so bili raziskovani mehanski parametri zidov, pri tlačnih in diagonalnih preiskavah. Kako programsko nato obdelati pridobljene rezultate je bilo že enkrat prikazano v diplomski nalogi »HISPA-programsko orodje za analizo histereznega odziva konstrukcij« (Čeru, 1996). Program je bil napisan v Excelu s programskim jezikom *Visual Basic for Applications* (VBA), ki se je pojavil kot dodatek k Excelu prvič leta 1995. V diplomski nalogi je programska koda napisana na 30 straneh, kar je dokaj velik obseg kode, ki je zato težje obvladljiv. Problem je tudi, da je bila tedanja verzija VBA ena od prvih, ki se je pojavila za Excel in se je do danes močno posodobila zaradi velikega napredka programskih okolij. Zaganjanje programa HISPA v današnji verziji Excela lahko privede do napak v izračunih, kar je posledica sprememb med verzijama, ki so nastale v zadnjih 16 letih. Po drugi strani pa imamo danes na voljo veliko programerskih orodij za učinkovito obdelavo podatkov iz Excela (MatLab, Mathematica itd.).

Na področju preizkušanja zidov se je na Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, začel izvajati projekt PERPETUATE-Performance based approach to the earthquake protection of cultural heritage in Europe and Mediteranean countries (2010-2013), ki se med drugim ukvarja s tematiko kamnitih zidanih zidov. Pri našem eksperimentu smo se ukvarjali s večslojnimi zidovi, ki so zgrajeni iz zunanjih zidanih slojev in notranjega polnilnega sloja iz zdrobljenega kamna in malte. Taki zidovi se predvsem najdejo pri starih objektih, ki so pogosto pomembni kulturni spomeniki, je pa njihovo obnašanje pri potresni obremenitvi še precej neraziskano. Pri starih zidovih so se uporabljale apnene malte. Zato so tudi preizkušanci bili zgrajeni s takšno malto. Ker se še natančno ne ve,

kako se odzivajo večslojne kamnite zidane konstrukcije pri dinamičnih obremenitvah, je naš projekt koristen in poučen. Eden od ciljev projekta torej je pridobiti zadostno znanje o teh vrstah zidov za napovedovanje njihovega odziva pri potresnih obremenitvah. Za določanje potresnega odziva zidov in analizo njihovega obnašanja so najpomembnejši rezultati strižnih testov, in sicer histerezne zanke horizontalne sile v odvisnosti od horizontalnega pomika zidu. Iz poteka histereznih zank, njihovih oblik, vrednosti sil in pomikov v določenih točkah odziva, lahko marsikaj izvemo. Ker pa je pri večjem številu testov, »ročna« obdelava precej zamudna in zelo verjetno zaradi velike količine podatkov tudi nenatančna, se izkaže potreba po programskem orodju, ki se je sposobno prilagoditi morebitni specifikki rezultatov. Programsko orodje, ki sem ga razvil v sklopu diplomske naloge, temelji na osnovnih predpostavkah obnašanja zidov pri strižnih cikličnih preiskavah, ki so bile že uporabljene v programu za analizo rezultatov v diplomski nalogi HISPA. Vendar je jezik programiranja bistveno drugačen in s tem spremeni tudi večina programerskih sintaks. Zato se program, ki sem ga napisal, nikakor ne opira na programsko kodo iz programa HISPA, saj se mi je zdelo zamudno preučiti delovanje programa, ki je napisan, v meni tujem jeziku. Že veliko časa bi mi vzelo, da bi dojel delovanje prve verzije VBA za Excel, kaj pa šele, da bi nato ugotovil delovanje programa HISPA, ki je napisan na več kot tridesetih polnih straneh A4 formata s običajno velikostjo pisave.

Zaradi razlike v obsegu kode in dodatnih možnosti, ki jih ponuja moj program, se mi zdi da je moja koda bolj preprosto in učinkovito napisana, ki je lažje obvladljiva za programerja in omogoča bolj pregledno uporabo programa s strani uporabnika. Tako lahko uporabnik izvede obdelavo rezultatov histereznih zank iz eksperimentalnih strižnih testov in izračuna določene mehanske količine za nadaljnjo raziskovalno delo ter dobi rezultate tudi grafično prikazane. Vse to mi je omogočil sodobni matematični program Matlab (MathWorks, Inc.), ki ga imamo dostopnega na računalnikih Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Je nadvse učinkovito orodje za programiranje in obdelavo večje količine podatkov, zapisanih v pravokotni shemi vrstic in stolpcev, kateri običajno rečemo matrika. S tem sem prihranil veliko časa v primerjavi s »pešč« obdelavo rezultatov, ki se občasno še izvaja, zaradi pomanjkanja splošnih in zanesljivih programov, primernih za obdelavo rezultatov testov cikličnega obremenjevanja zidov.

2 CIKLIČNE PRISKAVE KAMNITIH ZIDOV

2.1 Opis eksperimenta

Eksperiment je potekal v okviru evropskega projekta za ohranjanje kulturne dediščine, PERPETUATE (www.perpetuate.eu), ki ga financira Evropska komisija v okviru 7. Okvirnega programa (FP7/2007-2013). Projekt se je na naši fakulteti, na Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij, začel izvajati v začetku leta 2010. Pri sklopu preiskav troslojnih zidov se je najprej izdelal načrt geometrije in sestave zidov ter načrt preiskav, nato pa so se začeli pripravljati preizkušanci. Primarni namen eksperimentov je bil, da se s testi določi odziv kamnitih zidanih večslojnih zidov pri tlačnih in strižnih obremenitvah. Detajlni opis in namen strižnih eksperimentov bomo navedli v naslednjih podpoglavjih. Bistvo preiskav je bilo določiti maksimalne sile ter različne pomike zidov, značilne za določena stanja odziva, zato smo pri obremenjevanju zidov merili različne pomike in deformacije na njem. Poleg tega je bil del preiskav namenjen tudi opazovanju obnašanja na eni strani zidu nanešenega apneneaga ometa pri osnih tlačnih in strižnih deformacijah zidu, zato so se merili tudi pomiki na apnenem ometu s pomočjo fotogrametrije. Z orto-foto posnetki v posameznih fazah preiskusa pa se natančno spremljajo pomiki v ravnini in poškodovanost ometov. Rezultati tega dela eksperimenta bodo služili za nadaljnjo delo glede predvidevanja poškodb ometov. To ima predvsem uporabno vrednost zaradi umetniških del, ki so pogosto del ometov stavb kulturne dediščine v obliki poslikav, štukatur... Ometi, ki pri takih stavbah dosegajo visoke starosti, zaradi obremenitev (vibracije iz okolice, ki se prenašajo na omete, udarci na zunanjo ploskev stavbe, izjemne obremenitve kot so potresi, poplave), kemičnih vplivov iz ozračja in samega staranja materiala, pogosto razpokajo. Zato jih je potrebno sanirati in to je potrebno izvesti tako, da se čim bolj ter s primernim načinom ohrani umetniško poslikavo ali štukaturo. Tudi rezultati mehanskega odziva zidov se bodo kasneje uporabili pri načrtovanju sanacije zidov za ponovno preiskavo. Pred strižnimi testi so se izvedli štiri tlačni testi za določitev tlačne trdnosti zidov, ki je potrebna karakteristika za načrtovanje strižnih preiskav. Poleg tega so se izvedle tudi preiskave na konstituentih zidov. To so malta, kamen in stik. Med strižnimi preiskavami so se za določevanje poškodovanosti ometa ter zidu za ometom pri štirih testih izvajale tudi neporušne preiskave, in sicer termografija in radar, ti preizkušanci pa so bili pred testom analizirani tudi z ultrazvokom.

2.1.1 Preizkušanci

Kot že rečeno, so zidovi sestavljeni iz kamna in malte. Kamni služijo kot zidaki, malta pa kot vezno sredstvo med njimi. Za zidake smo uporabili apnenec, ki izvira iz Bosne in Hercegovine. Kamni so bili različnih dimenzij, od podolgovatih kvadrov, s stranicami tudi preko 35 cm, do bolj kockastih oblik, dimenzij od 10 cm do 20 cm. Kamen iz Bosne in Hercegovine smo uporabili zato, ker je ob izpolnjenih pogojih kvalitete bil najcenejši, hkrati pa je reprezentativen tudi za Slovenijo. Je na pol obdelan, kar pomeni, da na prvi pogled njegova oblika spominja na pravilen zidak. Po natančnejšem pregledu pa opazimo, da ima neravno hrapavo površino na vseh straneh, z razliko v izboklinah in vdolbinah tudi do 3cm. Taki kamni (Slika 2.1) so seveda primerni za zidanje, saj imajo približno obliko zidakov in se jih da zlagati v vrste ter graditi zid, niso pa tako zahtevni pri izdelavi kot v celoti obdelani kamni z gladko površino. Po drugi strani pa ima tak zid tudi bolj estetski videz, kot bi ga imel zid iz neobdelanega kamna, ki je naključno drobljen.



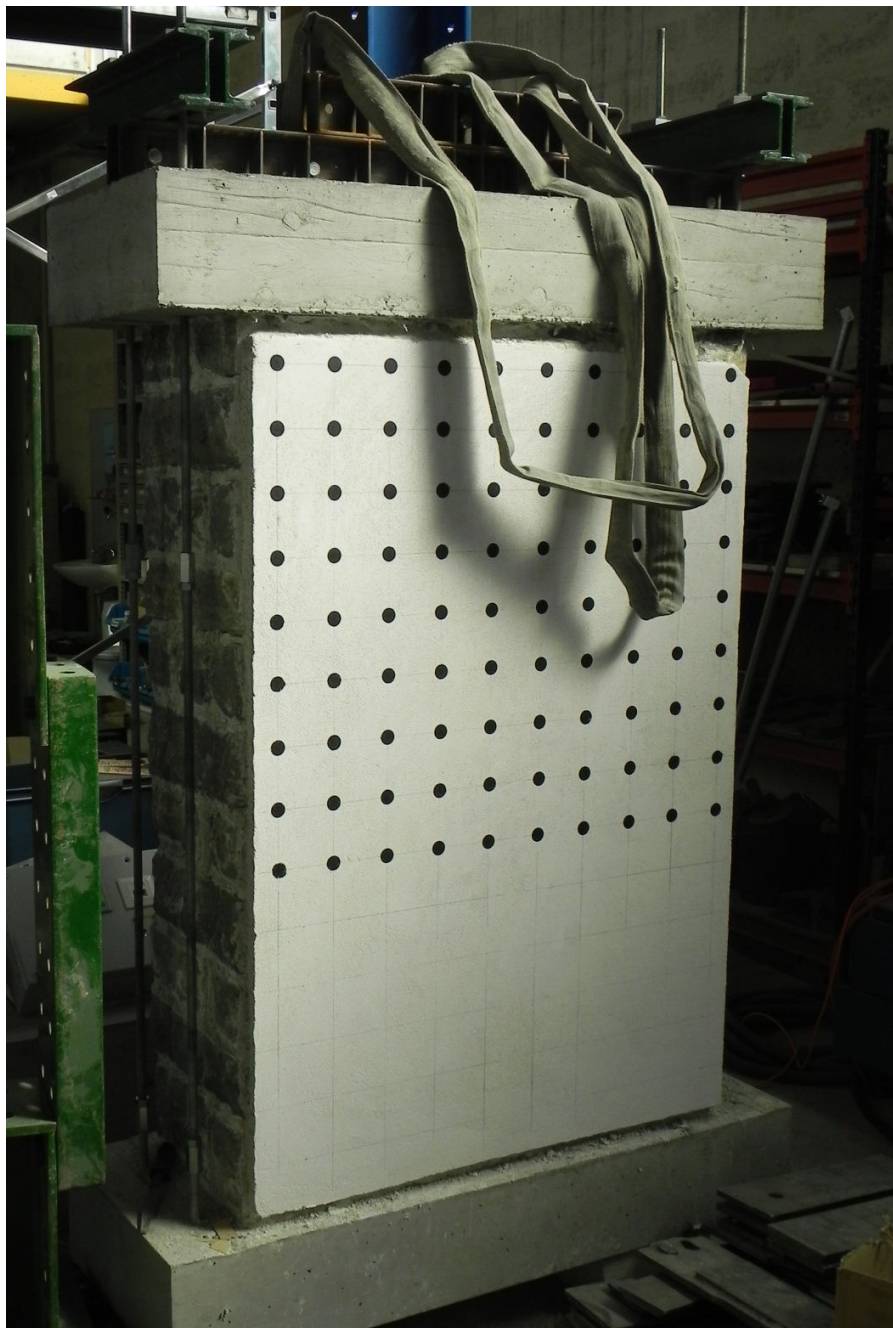
Slika 2.1: Kamniti zidaki, uporabljeni za zidanje vzorcev za testiranje

Za malto pa smo uporabili apneno malto. To je bila smiselna odločitev, saj so kamniti zidovi starejših objektov kulturne dediščine grajeni s podobnimi maltami. Začetek gradnje iz kamna in apnene malte sega še nazaj v čase rimskega imperija, ko so na nekoliko drugačen način kot pozneje gradili mostove, oporne zidove in mesta. Za apneno malto je posebej značilno, da potrebuje veliko časa za vezavo. Pomembno je seveda, da je v stiku z zrakom, da se suši. Ko smo enkrat raziskovali star rimski zid, se je globoko v zemlji pod zidom našla nestrjena apnena malta (Žarnič, 2006/2007). Malta očitno vseh teh 2000 let ni bila v stiku z zrakom in je ohranila plastično konsistenco. Zato bi bil čas, potreben, da malta pridobi zadostno trdnost, pri naših zidovih približno eno leto. Ker tega časa nismo imeli in so bili pri projektu postavljeni časovni roki, se je malti dodalo nekaj vulkanskega pepela imenovanega Tuf. Ta prispeva k zgodnjemu razvoju trdnosti malte, tako da je bila že po dveh mesecih dosežena trdnost, ki bi jo apnena malta brez dodatkov dosegla v enem letu. Za apnene malte je na splošno značilno, da so bolj duktilne, zato se tudi apno uporablja kot dodatek k cementnim maltam, katerim tako izboljšamo duktilnost. Taki malti pravimo podaljšana cementna malta. S tufom sicer apnena malta nekoliko izgubi na duktilnosti, togost pa ostane približno ista. Za malto pri gradnji zidov je bilo uporabljeno gašeno apno. Pomešali smo ga skupaj s vodo in finim peskom frakcije 0/4, ki je bil nabran na začetku toka reke Soče, preden pride ta v stik z večjimi mesti in se onesnaži. Ta malta je bila tudi uporabljena pri ometih, katerih povprečna debelina je bila 2.5 cm (Slika 2.2).



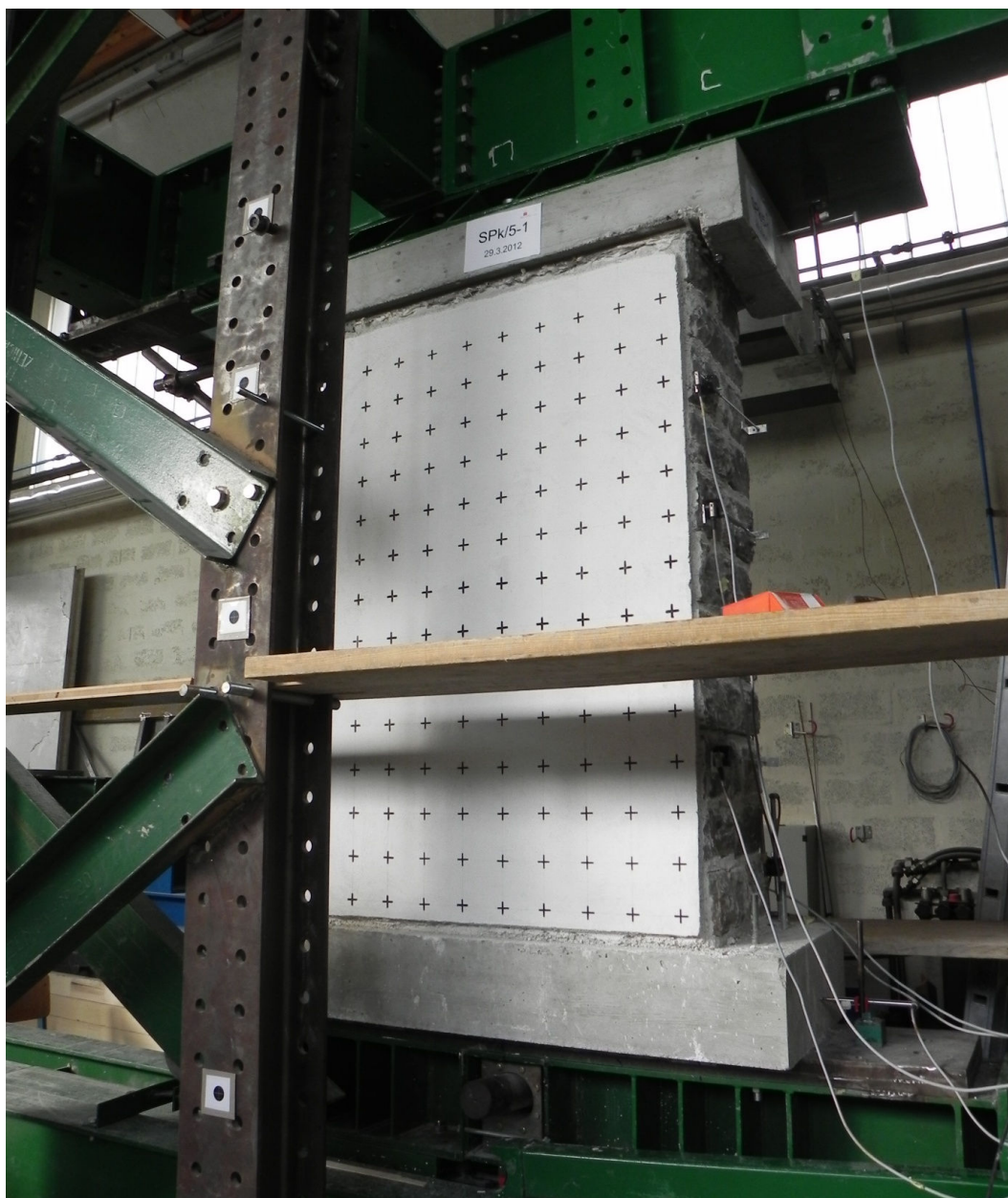
Slika 2.2: Apneni omet in maltni stik med kamni

Sami zidovi za strižne preiskave so dimenzij $100 \times 40 \times 150 \text{ cm}^3$, na zgornjem in spodnjem robu pa so vpeti v armirano betonska nosilca. Na sprednji strani zidu pa je bil, kot že omenjeno, nanesen omet (Slika 2.3). Črne pike na ometu služijo kot reporne točke za fotogrametrijo. AB nosilca sta dimenzij $130 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$. Skupna višina zidu z betonskimi bloki je 190 cm. Tak sistem je narejen iz več razlogov.



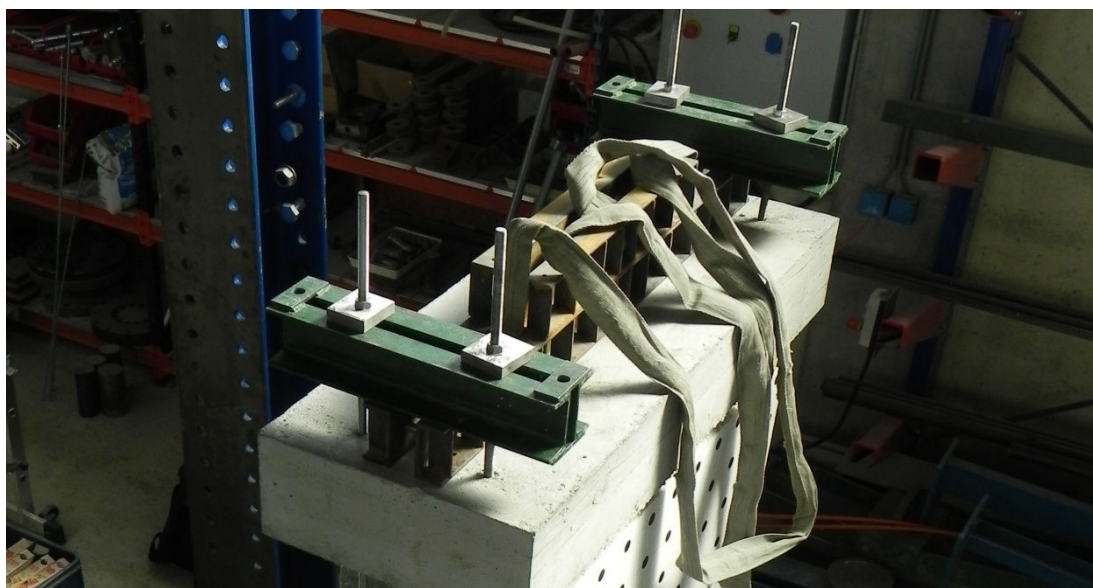
Slika 2.3: Zid, pripravljen za transport z delno porisanim ometom

Prvi je ta, da bi zaradi neravnosti površine kamna zid lahko poševno nalegal v napravo za preizkušanje. Z betonskima nosilcema pa dobimo gladko in ravno površino za naleganje. Drugi razlog je, da nosilca služita za vpenjanje zidu med eksperimentom. V spodjem delu nosilca so namreč zabetonirane 4 jeklene palice s premerom 16 mm, ki imajo vrezan navoj. Preko teh palic in zgornjih 4 palic, ki so položene skozi kovinske cevi v zgornjem AB nosilcu, se nosilec vpne v napravo. Palice gredo pri tem skozi luknje v nosilcih, ki so del naprave za preizkušanje in se stisnejo z maticami na obeh straneh (Slika 2.4).



Slika 2.4: Zid, vpnet v napravo za strižne preiskave

Tretji razlog pa je transport zidu po laboratoriju. Palice na zgornjem AB nosilcu, ki so položene skozi kovinske cevi in služijo za vpenjanje zidu, se lahko odstranijo in namesto njih se položijo daljše palice, ki služijo za prednapenjanje zidu. Te palice potekajo od dna do vrha zidu. Spodaj so privijačene na palice, ki so vbetonirane v nosilec in služijo za vpetje zidu. Zgoraj pa gredo skozi že prej omenjene cevi in naprej preko dveh zelenih jeklenih nosilcev, ki se ju položi po širini AB nosilca preko rjavega jeklenega nosilca (Slika 2.3 in Slika 2.5). Ta se postavi vzdolž zgornjega AB nosilca.



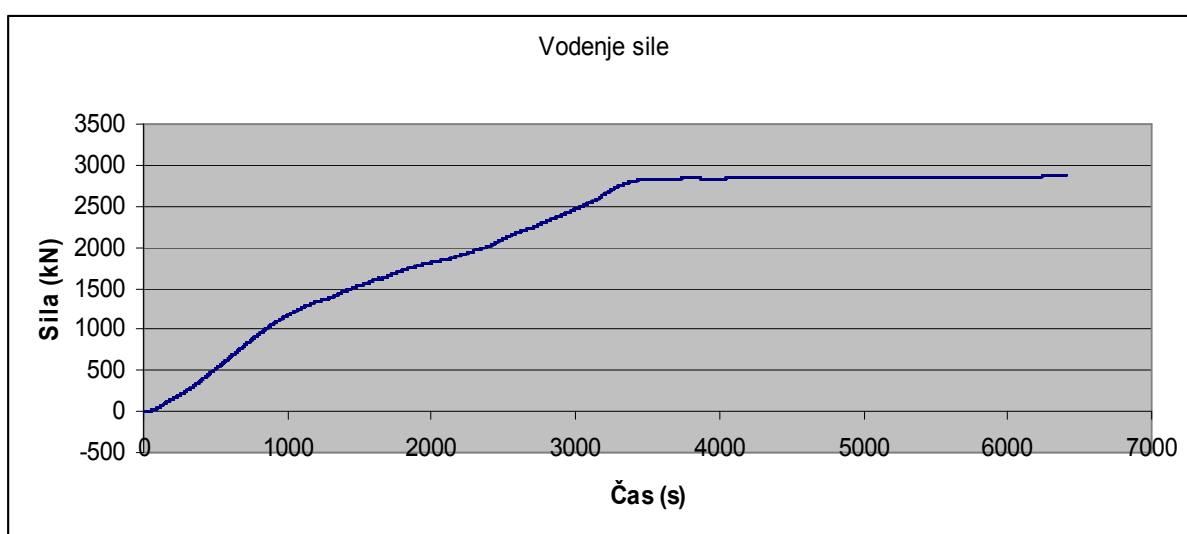
Slika 2.5: Sistem za prenašanje zidu

Če vse 4 palice zategnemo, kamniti zid s tem prednapnemo, saj ga betonska nosilca stisneta skupaj. Zaradi tega lahko nato zid prenašamo z laboratorijskim dvigalom, ki se vpne okoli nosilne vrvi, ki je pritrjena na vzdolžni rjavi jekleni nosilec. Hkrati pa s palicami lastno težo zidu prenesemo na spodnji AB nosilec, ki potem nosi celoten zid z zgornjim AB nosilcem in jeklenimi nosilci. Zato je tudi ustrezno armiran, saj celotna teža takega zidu znaša okoli 2 toni. Zraven pa še pridejo dinamični učinki, ki nastanejo pri prestavljanju zida. Za prenos zidu je to učinkovit sistem, saj je stabilen in tudi ob možnih vibracijah in sunkih dvigala zid vedno ostane v tlaku, kar je pomembno, saj, kot že povedano, zidane konstrukcije slabo prenašajo natege. Smo pa morali, vedno ko smo zid hoteli prestaviti, jeklene palice priviti in nato odviti za uporabo na drugem zidu, saj smo bili s palicami številčno omejeni.

2.1.2 Sistem preizkušanja in merjenje pomikov

Pri naših raziskavah smo zidove preizkušali tlačno in strižno. Zid je bil tudi pri strižnih testih tlačno obremenjen, vendar s konstantno vrednostjo sile in ne s časovno spreminjajočo, kot je to bilo pri tlačnih preiskavah. Preizkušenih je bilo skupaj 18 zidov.

Pri tlačnih testih smo poleg dveh zidov, z že opisanimi dimenzijami preizkušali še dva zidova manjših dimenzij. Te so bile $100 \times 40 \times 100 \text{ cm}^3$. Ta dva zidova in druga dva višja zidova, smo pri testu postavili na trdo gumijasto ploščo debeline 2 do 3 mm, ki je ležala na betonskih tleh in je služila za izravnavo podlage. Betonska tla v laboratoriju se namreč že vrsto let uporabljajo pri eksperimentih in za odlaganje materiala, zato se je z leti površina plošče nekoliko obrabila. Tako so na plošči lahko nastale manjše izbokline, ki se na prvi pogled niti ne opazijo s prostim očesom, a lahko kasneje povzročijo, da pri obremenjevanju zidu, v spodnjem AB nosilcu nastanejo razpoke zaradi koncentriranega vnosa sile od izbokline na podlagi. Kar pa bi bilo lahko zavajajoče, saj smo pričakovali tudi razpoke v tem nosilcu od raznosa obtežbe zidu preko spodnjega AB nosilca, ki je daljši od zidu za 15 cm. To je narejeno zato, da se tlačna obremenitev iz zidu v AB nosilec raznaša v diagonalni smeri. Zidove smo pri tlačnih testih obremenjevali s hidravličnim batom, ki je imel časovno vodeni prirastek sile (Grafikon 2.1).



Grafikon 2.1: Sila v odvisnosti od časa za tlačni preizkus zidu

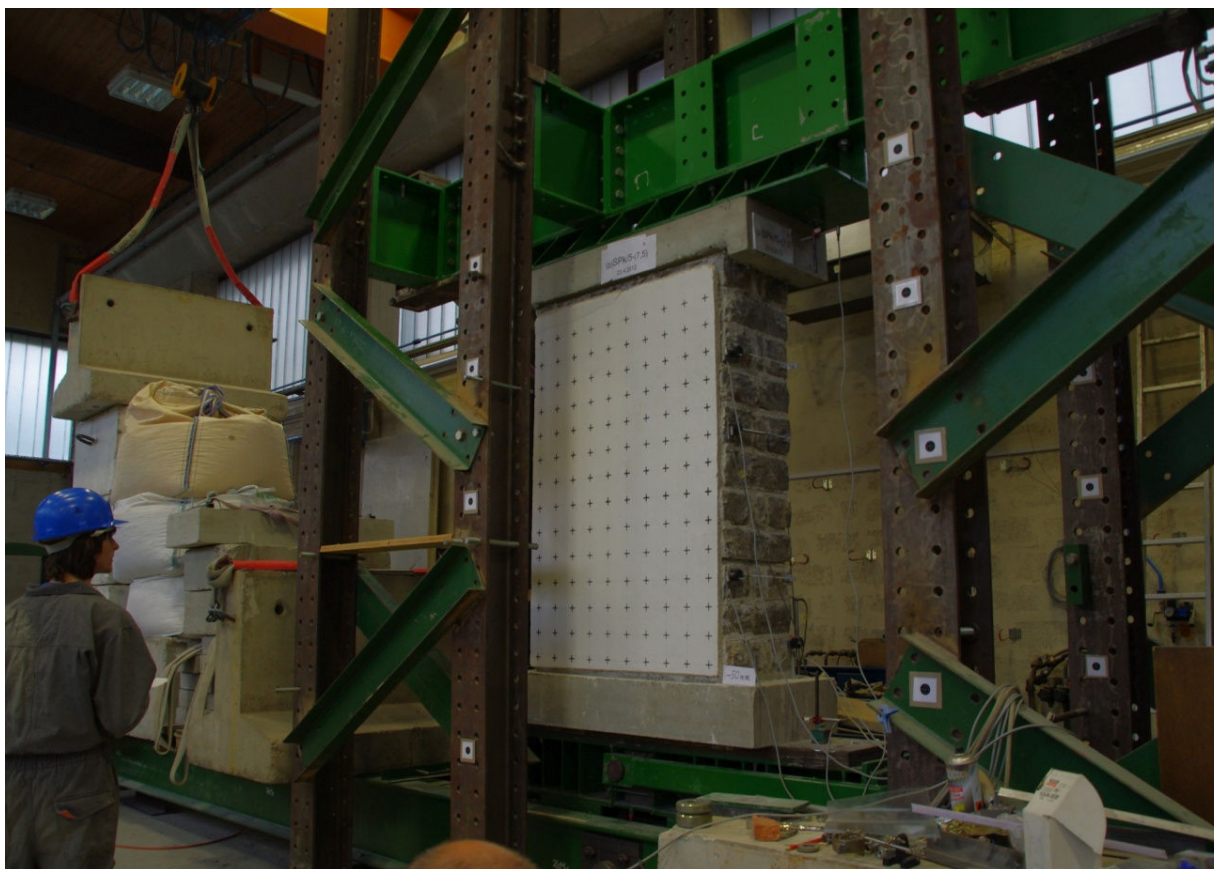
Bat je bil pritrjen na horizontalen jekleni nosilec, ki je bil ustrezno zavarovan preko dveh nosilnih vrvi. Horizontalen nosilec pa je na ustrezni višini bil pritrjen na jeklena stebra profila HEA300 (Slika 2.5). Stebra pa sta bila z vijaki premera 60mm pritrjena na betonsko ploščo debeline 60cm.



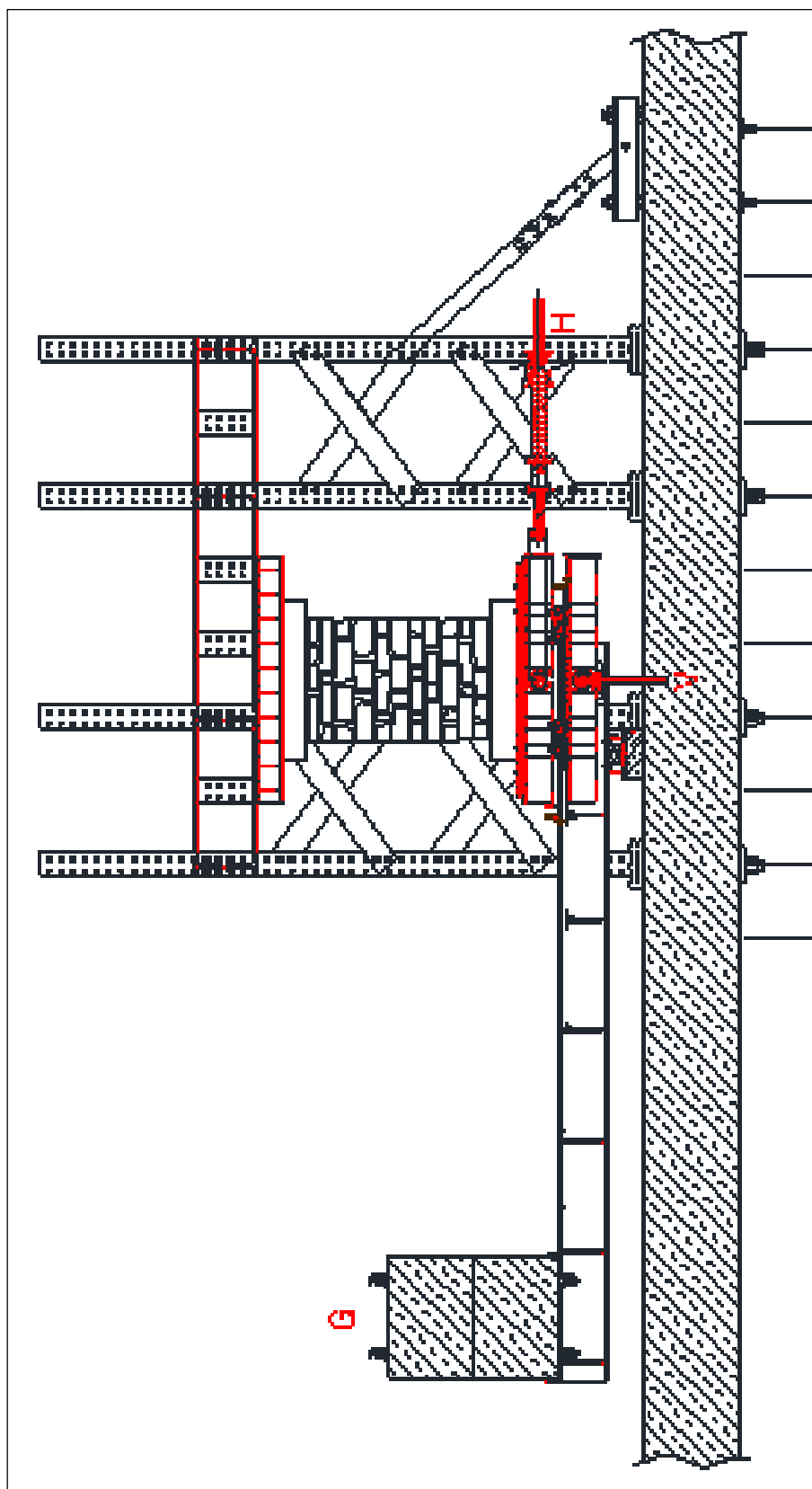
Slika 2.6: Manjši zid, pripravljen za tlačni preizkus

Spodaj pod ploščo, kjer so prostori za skladiščenje, so bili vijaki fiksirani z maticami. Zgoraj pa smo jih še dodatno prednapeli, preden smo jih pritrdili z maticami na podložno pločevino, zavarjeno na čelo stebrov. Na vrh zida smo še dodatno postavili dva zelena jeklena nosilca, da se pri pritisku bata obtežba lepo raznese po širini zidu. Namreč premer okrogle ploskve bata je bil 20 cm, kar je v primerjavi z dolžino zidu 100 cm precej premalo. Spodaj pod nosilca smo še dodatno položili 2 do 3 mm debelo gumijasto ploskev za izravnano površine, kot smo to naredili na dnu zida (Slika 2.6).

Za strižne preiskave nam je ostalo 14 zidov, dimenzij $100 \times 150 \times 40 \text{ cm}^3$. Te smo preizkušali v napravi za strižne preiskave, ki se v laboratoriju že vrsto let s pridom uporablja za strižno preizkušanje vseh vrst konstrukcijskih elementov. Za doseganje predkompresije zidu se uporablja sistem tehtnice, kjer se na konec spodnjih dveh nosilcev naložijo bremena in se preko členka, na katerega nasedata nosilca, izvaja pritisk na preizkušanelec (Slika 2.7).



Slika 2.7: Naprava za strižno preizkušanje



Slika 2.8: Načrt naprave za strižne preizkuse

Hkrati služita ta dva nosilca tudi za prevozno progo, po kateri se zid pripelje v napravo. Nosilca sta na koncu, kjer je naloženo breme, na spodnjem robu povezana s prečnim krajšim nosilcem, skozi katerega potekata jekleni navojni palici premera 20 mm. Ko se ti navojni palici dotikata tal, sta nosilca na koncu podprta in se ne more izvajati pritisk preko členka. Se pa lahko takrat uporabita za prevažanje zida, ki se ga naloži na jeklen voziček. Voziček je sestavljen iz jeklenega nosilca s prečnimi ojačilnimi rebri in s 4 pari kolesčkov, pritrjenimi na spodnji strani, preko katerih voziček sloni na spodnjih 2 nosilcih (Slika 2.9).



Slika 2.9: Voziček, ki se lahko pelje po spodnjih dveh nosilcih

Ko voziček pripeljemo izven naprave, lahko na njega naložimo zid, ki ga preko 4 jeklenih palic, vbetoniranih v zunanja robova spodnjega AB nosilca, fiksno vpne v voziček. Tako lahko zid na vozičku pripeljemo na mesto preizkušanja. Kolesčki vozička stojijo na ravni podolgovati pločevini, ta pa nalega na L kotnike, privite na navpične pločevine, ki so prečno privarjene na notranji del obeh spodnjih nosilcev. Ko se zid pripelje v notranjost, preidejo kolesčka iz ravne pločevine na pasnico jeklenega nosilca, podobnega tistemu od vozička. Ta nosilec je členkasto vpet v oba spodnja jeklena nosilca, s čemer je omogočeno, da se lahko voziček v tehtnici na tem mestu suče neodvisno od spodnjih dveh nosilcev (Slika 2.8).

To je pomembno zato, da dobimo pogoje prosto vpetega zidu na spodnjem robu, saj je na zgornjem nepomično vpet v napravo. Če členkasto pripet nosilec fiksiramo na spodnja dva nosilca, dobimo pogoje obojestransko preprečenih rotacij zidu.

Voziček se uporabi tudi za členkasto pritrditev dveh jeklenih palic kvadratastega O profila, ki sta povezani z batom na napravi za potiskanje (Slika 2.10). Preden začnemo s preizkusom, moramo le še sprostiti jekleni palici na koncu spodnjih dveh nosilcev, da se lahko ta dva pod obremenitvijo posedeta in preko členka pritisneta na zid.



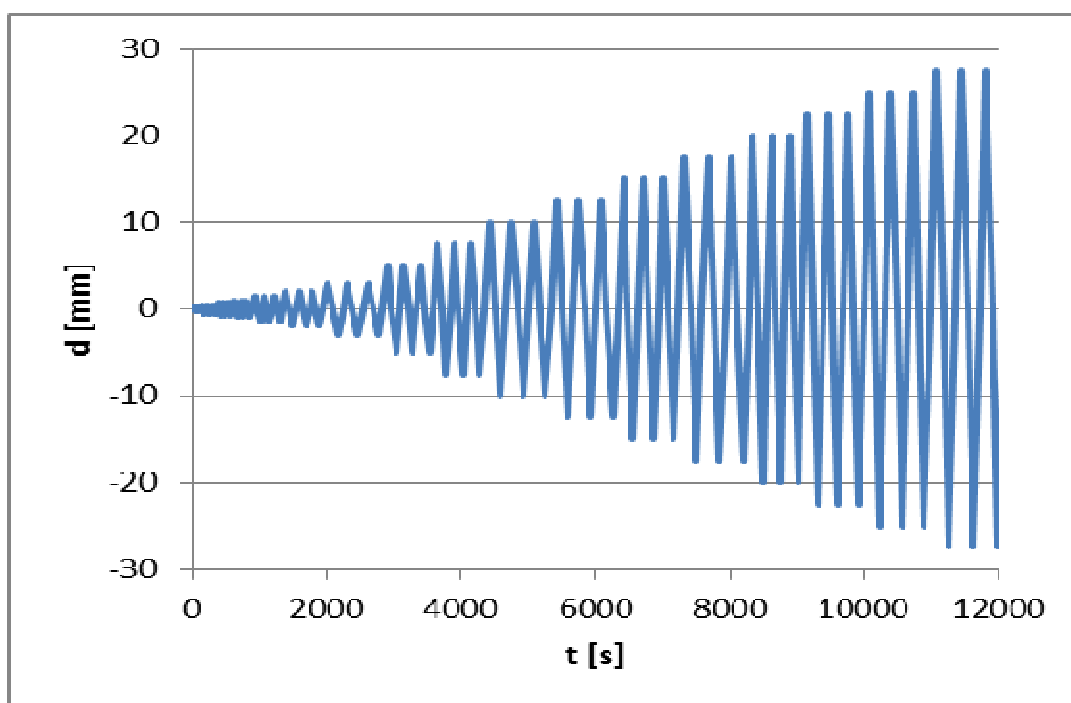
Slika 2.10: Ogradje in servo-hidravlični bat za potiskanje preizkušancev v horizontalni smeri

Pomike smo merili z induktivnimi merilniki, ki zaznajo pomik na 1/100 mm natančno. Pritrjeni so bili na 3 straneh zidu. Na omet jih nismo pritrdjevali, saj je omet sledil pomikom zidu le v začetnem delu eksperimenta, nato pa je začel odstopati od njega. Posamezni deli na ometu, kjer je razpokal, so se začeli sukati kot toge šipe. Na preostalih 3 straneh zidu so bili induktivni merilniki nameščeni v horizontalni smeri na ožjih dveh stranicah zidu in v vertikalni, horizontalni ter diagonalnih smereh na širši ploskvi (Slika 2.11). Nekaj jih je bilo nameščenih tudi na stikih med zgornjim oziroma spodnjim AB nosilcem ter zidom, oziroma med AB nosilcem in jeklenim profilom.



Slika 2.11: Induktivni merilniki za zajem pomikov

Z merilniki smo zaznavali razpiranje kamnitih slojev v horizontalni smeri, upogibno odpiranje in stiskanje ter nastanek strižnih razpok pa smo spremljali z merilniki v obeh diagonalnih smereh in vertikalni. Priključeni so bili na osrednji procesor za beleženje pomikov, ta pa na namizni računalnik, kjer nam je pripadajoči program sproti beležil in risal pomike v odvisnosti od časa. Beležila se je tudi sila, s katero je bat pritiskal na zid. Hkrati nam je program omogočil nastavitve protokola obremenjevanja (Grafikon 2.2). Obremenjevanje je bilo vodeno s pomiki, in sicer s pomiki induktivnega merilca na spodnjem betonskem temelju tik pod zidom. Določili smo, do katerih amplitud pomikov naj sežejo posamezne obremenitve in kakšna naj bo hitrost obremenjevanja. Pri vseh 14 testih, razen pri enem, smo za vsak amplitudni pomik šli 3 krat v eno in 3 krat v drugo smer, glede na sredino zidu. Potisku zidu iz sredine v maksimalno pozitivno smer, nato nazaj v sredino, nato v maksimalno negativno smer, ter spet nazaj v sredino, rečemo en cikel. Pri treh ciklih za določeni amplitudni pomik smo dobili 3 podobne krivulje pomika v odvisnosti od časa, ki jim rečemo histerezne zanke. Pri različnih testih smo šli različno daleč s pomiki, saj smo bili omejeni z odzivom zidu. Ko smo opazili, da je pri določenih pomikih nosilnost zidu začela občutno padati, smo se ustavili.



Grafikon 2.2: Protokol vodenja pomika v odvisnosti od časa

2.2 Obdelava rezultatov

Rezultati, ki smo jih pridobili z eksperimentom, so bili zbrani v Excelovih datotekah. Vsakemu testu je pripadalo več datotek, ki so imele v zgornji vrstici napisana izbrana imena vseh količin, ki smo jih beležili (Preglednica 2.1). Količine so bile Time (s), Sila (kN) in vsi pomiki W1 (mm), W2 (mm), W3 (mm), W4 (mm), V1 (mm), V2 (mm), V3 (mm), V4 (mm), V5 (mm), H1 (mm), H2 (mm), H3 (mm), H4 (mm), H5 (mm), H6 (mm), I1 (mm), I2 (mm), D1 (mm), D2 (mm). Čas je bil po angleško označen kot Time, pomiki pa so imeli za oznako eno črko in številko. Črka je povedala, za katero smer je šlo: H pomeni horizontala, V vertikala, D pa diagonala. Številka je označila posamezni induktivni merilnik za določeno smer. Ker smo na primer imeli dva diagonalna merilnika, smo ju označili z D1 in D2.

Preglednica 2.1: Primer odseka rezultatov za Test 1

	File comment:						
	Time	SILA	H6	D1	D2	V2	V6
	s	kN	mm	mm	mm	mm	mm
2100	409,8	-1,01	0,148	0,25	0,28125	0,175	-0,01625
2101	410,0	-0,9	0,156	0,25	0,28125	0,175	-0,01625
2102	410,2	-0,8	0,168	0,25	0,28125	0,175	-0,015
2103	410,4	-0,69	0,18	0,25	0,28125	0,175	-0,015
2104	410,6	-0,59	0,192	0,25	0,28125	0,175	-0,01375
2105	410,8	-0,49	0,204	0,25	0,28125	0,1625	-0,01375
2106	411,0	-0,38	0,216	0,25	0,28125	0,1625	-0,0125
2107	411,2	-0,28	0,228	0,25	0,28125	0,1625	-0,0125
2108	411,4	-0,18	0,24	0,25	0,28125	0,1625	-0,01125
2109	411,6	-0,08	0,252	0,25	0,28125	0,1625	-0,01125
2110	411,8	0,01	0,26	0,25	0,28125	0,1625	-0,01125
2111	412,0	0,11	0,268	0,25	0,28125	0,1625	-0,01
2112	412,2	0,21	0,28	0,25	0,28125	0,1625	-0,01
2113	412,4	0,33	0,296	0,25	0,3125	0,15	-0,00875
2114	412,6	0,46	0,308	0,25	0,3125	0,15	-0,00875
2115	412,8	0,58	0,32	0,21875	0,3125	0,15	-0,0075
2116	413,0	0,7	0,336	0,21875	0,3125	0,15	-0,0075
2117	413,2	0,8	0,348	0,21875	0,3125	0,15	-0,00625
2118	413,4	0,89	0,36	0,21875	0,3125	0,15	-0,00625

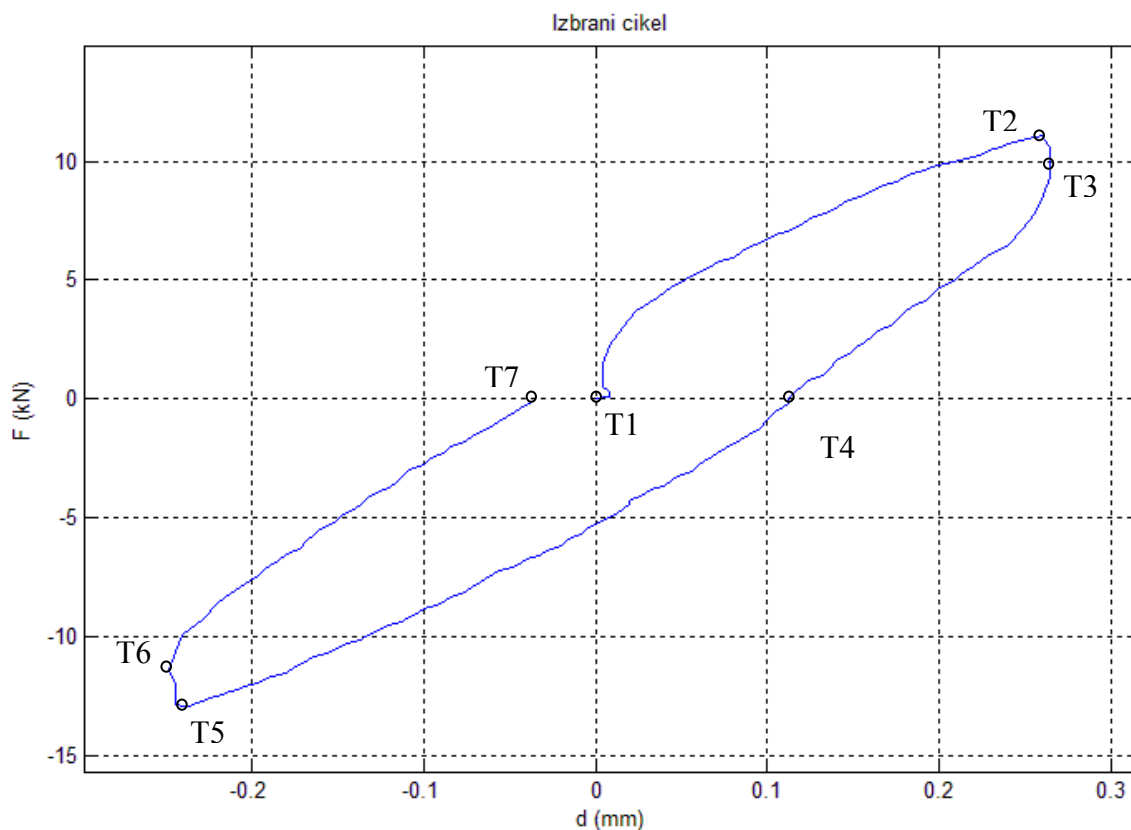
Ti rezultati so bili za en test številčno obsežni, saj so znašali od 50.000 do 100.000 vrstic in 20 stolpcev, ko smo združili datoteke rezultatov za posamezni test, smo imeli skupaj 15 takih datotek za vseh 14 strižnih preizkušancev (enega smo testirali dvakrat). Ker so bili rezultati pri posamezni datoteki vneseni vsi v eno samo veliko tabelo, jih je bilo potrebno obdelati.

2.2.1 Značilne točke histerezne zanke

Na začetku je bilo rezultate potrebno razvrstiti v posamezne skupine, kjer so eno skupino predstavljale točke histereznih zank, ki so dosegle določen amplitudni pomik. Histereze smo risali v koordinatni sistem in smo na abscisno os nanašali pomike d v milimetrih, na ordinatno os pa sile F v kilo Newtonih. Vsaki histerezni zanki smo določili sedem značilnih točk (Slika 2.12). Te točke so:

- T1 – presečišče zanke z abscisno osjo oziroma začetna vrednost histerezne zanke ($F = 0$),
- T2 – maksimalna sila, ki jo doseže zanka in pripadajoči pomik ($F_{max}, d_{F_{max}}$),
- T3 – maksimalni pomik, ki ga doseže zanka in pripadajoča sila ($F_{d_{max}}, d_{max}$),
- T4 – presečišče zanke z abscisno osjo, ko sila bata znotraj zanke spremeni svoj predznak,
- T5 – minimalna sila, ki jo doseže zanka in pripadajoči pomik ($F_{min}, d_{F_{min}}$),
- T6 – minimalni pomik, ki ga doseže zanka in pripadajoča sila ($F_{d_{min}}, d_{min}$),
- T7 – presečišče zanke z abscisno osjo oziroma končna vrednost histerezne zanke ($F = 0$).

Točke služijo za karakterizacijo zanke, saj lahko iz njih razberemo osnovne podatke o zanki. To so amplitudni pomik za obe smeri in maksimalna ter minimalna sila, do katere smo prišli. Lahko tudi idealiziramo zanko tako, da točke med sabo linearno povežemo in izračunamo površino, ki jo oklepa idealizirana zanka z abscisno osjo. Ta površina služi za prvo oceno potrebne energije, ki se je sipala pri obremenjevanju.



Slika 2.12: Histerezna zanka z značilnimi točkami

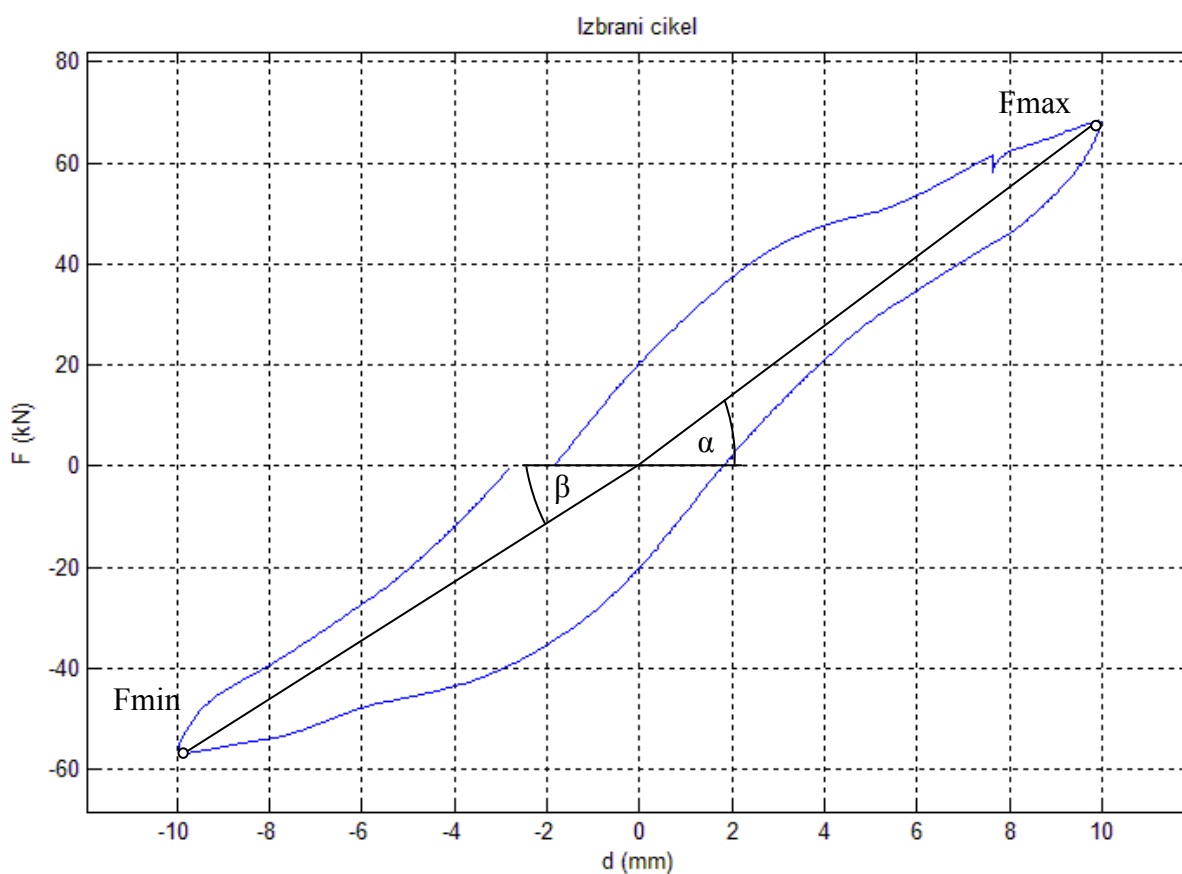
2.2.2 Strižna togost in nosilnost

Za potres je značilno, da tla bolj nihajo v horizontalni smeri in manj v vertikalni. Tako so kritične obremenitve na objektu pretežno strižne ter upogibne, manj pa osne. Strižna nosilnost in togost sta pomembna parametra, ki vplivata na obnašanje konstrukcije pri potresu. Nosilnost nam pove mejo, do katere lahko obremenimo nosilni element. Togost pa nam pove, kakšni bodo pomiki elementa pri določeni obremenitvi, kar je pomembno pri projektiranju, saj moramo tudi kontrolirati mejne pomike konstrukcije. Togost elementov vpliva tudi na deformacije konstrukcij kot celote ter porazdelitev horizontalnih obremenitev. V primeru predpostavke v ravnini toge diafragme na nivoju etaže elementi z večjo togostjo prevzamejo večje obremenitve kot elementi z manjšo togostjo. Poleg tega še togost nosilne konstrukcije skupaj z maso določata lastne nihajne oblike in čase konstrukcije. Potresni odziv konstrukcije je močno odvisen od tega, koliko lastne nihanje oblike in nihajni časi konstrukcije sovpadajo s smerjo in nihajnim časom potresnega nihanja tal.

Strižna nosilnost preskušanca je največja sila, ki jo preskušanec doseže v eni smeri obremenjevanja. Pozitivno nosilnost označimo z F_{max} , negativno pa z F_{min} (Slika 2.13). Togost je po definiciji sila, potrebna, da konstrukcijo premaknemo za enotski pomik. Ker smo mi konstrukcijo premikali v horizontalni smeri in s tem povzročili strižne napetosti, govorimo o strižni togosti. Pri histereznih zanki jo izračunamo tako, da delimo maksimalno ali minimalno silo s pripadajočim pomikom:

$$K_p = \frac{F_{max}}{d_{F_{max}}} \quad K_n = \frac{F_{min}}{d_{F_{min}}} \quad (2.1)$$

K_p predstavlja togost v pozitivni smeri, K_n pa togost v negativni smeri. Togost je torej določena z naklonom premice, ki poteka skozi koordinatno izhodišče do točke z maksimalno ali minimalno vrednostjo sile (Slika 2.13).



Slika 2.13: Naklonski premici togosti histerezne zanke

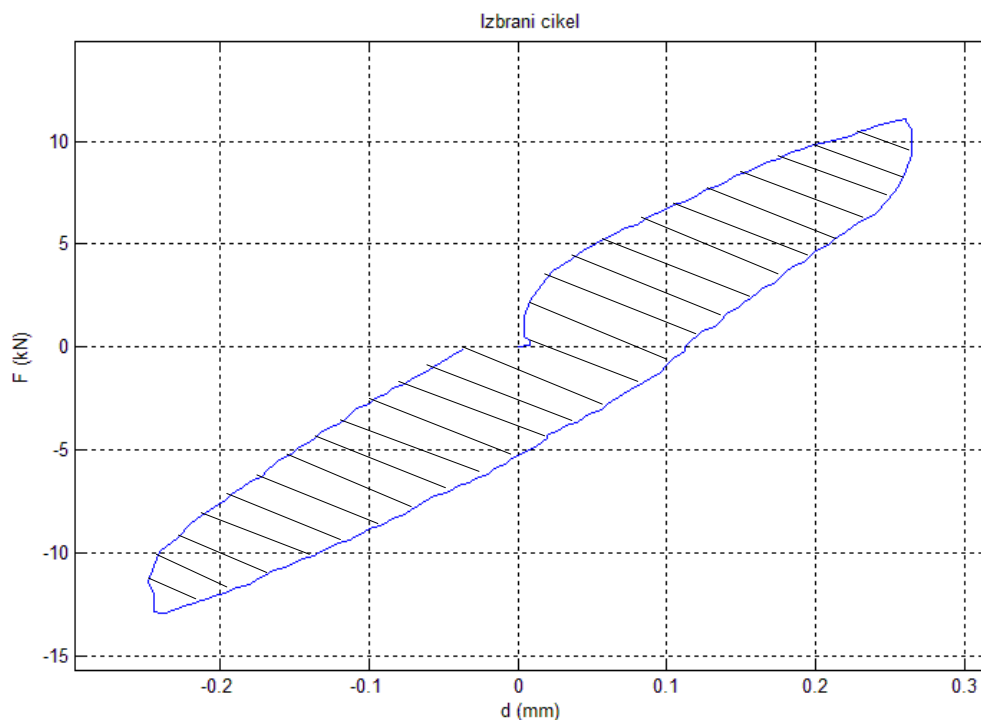
2.2.3 Energija pri cikličnem obremenjevanju

Kot že omenjeno, površina pod histerežno zanko predstavlja energijo, ki smo jo morali opraviti, da smo zid pomaknili skozi vse točke na histerezni zanki. Ta energija je enaka delu, ki ga je opravil hidravlični bat, ko je potiskal zid v eno in v drugo smer. Kot vemo, je delo skalarni produkt med vektorjem sile $\vec{F}$ in vektorjem pomika $\vec{u}$:

$$A = \vec{F} \cdot \vec{u} = F \cdot u \cdot \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

A je opravljeno delo in ima enoto za energijo J (Joule), sila $\vec{F}$ ima enoto za silo N (Newton), pomik $\vec{u}$ pa enoto za dolžino m (meter). F in u v enačbi predstavljata dolžini vektorjev sile in pomika, α pa je kot med vektorjema. Pri nas je smer pomika vedno enaka smeri potisne sile bata, saj induktivni merilniki, pritrjeni na ogrodje naprave, vedno merijo vodoravni pomik zida, tudi v primeru, ko pride do manjših zasukov zidu, zaradi sprostitve sukanja pri spodnjem vpetju zida. Zato je kot α med silo in pomikom enak 0, $\cos(0) = 1$ in je delo kar enako produktu sile bata in horizontalnega pomika zidu ob spodnjem vpetju.

Delu, ki ga vložimo, da opravimo en cikel, včasih tudi pravimo vnesena energija. Saj je to energija, ki jo zid sprejme, ko se za en amplitudni pomik pomakne v obe smeri. Ta sprejeta energija se lahko pretvori v drugo obliko energije, kot je toplotna energija ali pa se porabi za nastanek mehanskih poškodb na zidu. Tej energiji pravimo disipirana energija. Disipirano energijo za en cikel dobimo tako, da izračunamo površino znotraj histerezne zanke, ki pripada izbranemu ciklu. Ko računamo površino naše zanke, moramo seveda upoštevati absolutno vrednost dela, saj imata sila in pomik, v točkah 2. in 4. kvadranta na Slika 2.13, nasproten predznak in bi sicer dobili negativno delo. Površino zanke lahko izračunamo tako, da izračunamo najprej površino, ki jo oklepata najvišja in najnižja krivulja z abscisno osjo (krivulji, po katerih smo prišli do amplitudnega pomika v obeh smereh) in nato odštejemo površino, ki jo oklepata krivulji pod oziroma nad njima z abscisno osjo (krivulji, po katerih smo se vrnili s točk amplitudnega pomika do abscisne osi). Razlika je enaka površini histerezne zanke (Slika 2.14).



Slika 2.14: Površina histerezne zanke, ki predstavlja disipirano energijo

2.2.4 Ekvivalentni koeficient viskoznega dušenja

Stavbe običajno začnejo nihati zaradi zunanje obtežbe. Če vzbujajoče obtežba traja, pravimo takemu nihanju vsiljeno nihanje. Primer take obtežbe je potresno nihanje tal. Pri vsiljenem nihanju ima največji učinek tista obtežba, ki ima frekvenco in smer vzbujanja čim bolj podobno lastni frekvenci in pripadajoči smeri eni od nihajnih oblik stavbe. Stavba ima torej več lastnih nihajnih oblik in vsaki pripada en nihajni čas in frekvenca. Oblike razvrstimo po padajočih nihajnih časih. Prva nihajna oblika ima vedno največji nihajni čas. Učinek vsiljenega nihanja na stavbi je tem večji, čim nižja je nihajna oblika, v kateri se ujameta frekvenci. Torej so pomiki največji, če potres vzbuja nihanje v smeri in s frekvenco prve nihajne oblike stavbe.

Vendar opazimo, da pri konstantnem vzbujanju za naš primer obtežbe, dosežemo le določen amplitudni pomik. Ta je omejen zaradi dušenja, ki nastopi kot posledica različnih vplivov. Pri konstrukcijah pravimo dušenju disipacija energije. Poznamo več tipov dušenja. Za nas sta pomembna predvsem dva tipa (Kareem, A., Gurley, K., 1996):

1. Materialno dušenje. Sestavljeno je iz notranjega trenja v konstrukciji in viskoznega dušenja. Notranje trenje povzroča razpoke v materialu. Del energije se tu prenese v toploto. Pojavi se, ko material preide v plastično območje. Viskozno dušenje je posledica viskoznosti materiala. Odvisno je od relativne hitrosti in narašča, ko se večja frekvenca nihanja. To dušenje prevlada pri nihanju konstrukcij v elastičnem območju.

2. Dušenje preko stikov, ki je posledica medsebojnih sprijemnih napetosti dveh različnih materialov. Odvisne so od mehanskih lastnosti obeh materialov in pri strižnih obremenitvah od normalnih tlačnih napetosti. Večje tlačne obremenitve stika dajo večjo strižno nosilnost.

Histerežno dušenje je večinoma posledica dušenja zaradi notranjega trenja. Ta nastopi predvsem v neelastičnem območju obremenjevanja. Ta disipirana energija je enaka površini znotraj histerezne zanke. Je tem večja, kolikor bolj smo v plastičnem področju. Pri razbremenitvi vidimo, da se pojavi razlika med začetnim in končnim pomikom pri sili 0, temu pravimo plastična ali nepovratna deformacija. To stavbam omogoča, da lahko prenesejo tudi močne potrese.

Vpliv dušenja pri dinamičnih preizkusih podajamo s koeficientom ekvivalentnega viskoznega dušenja ξ . Ta koeficient vpliva pomembno na časovni potek in maksimalne vrednosti odziva (pomiki in notranje sile) stavbe pri potresnih obremenitvah. Izraža se kot delež koeficienta viskoznega dušenja c , glede na koeficient kritičnega dušenja c_{cr} (kritično dušenje je najmanjša vrednost dušenja, pri katerem se nihanje zaduši po enem nihaju):

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.3)$$

Če je vrednost koeficienta ξ manjša od 10%, je njegov vpliv na lastne nihajne oblike in frekvence celotne stavbe zanemarljiv (Fajfar, 1984). Koeficient v programu izračunam po metodi »Izgube mehanske energije«. Pri nedušenem nihanju bi se vsa mehanska energija, dovedena s harmoničnim vzbujanjem, naložila v sistem in bi pomiki narasli v neskončnost. Zaradi dušenja pa se del te energije pretvarja v druge oblike energije, ki so posledica trenja in upora. Pomiki lahko narastejo samo do vrednosti:

$$u_{max} = \frac{u_{stat}}{2\xi} \quad (2.4)$$

Pri tem je u_{stat} statičen pomik, ki ga dobimo pri isti vrednosti obtežbe, ki deluje statično na konstrukcijo. Maksimalen pomik je dosežen že po nekaj ciklih in vsa nadaljnja energija se porabi za vzdrževanje stanja pri premagovanju sil dušenja.

Kako torej za naš primer preiskav izračunati koeficient ξ ? Za začetek pogledajmo enačbi za pomik (2.5) in hitrost (2.6) pri harmoničnem nihanju z vplivom viskoznega dušenja. Ker smo rekli, da je naše nihanje vsiljeno, vpliv dušenja v enačbah ne nastopa, saj se uravnoteži s konstantnim dovajanjem energije v obliki mehanskega dela:

$$u = u_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t - \theta) \quad (2.5)$$

$$\dot{u} = u_{max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta) \quad (2.6)$$

Pomik u [m] in hitrost nihanja $\dot{u}$ [m/s] sta funkciji časa t [s], ω [Hz] je krožna frekvenca nihanja, θ [rad] je fazni kot, ki ima pri nas vrednost 0, u_{max} [m] pa je maksimalen pomik, ki ga dosežemo zaradi dušenja. Sila dušenja F_d je tedaj enaka zunanji sili obremenjevanja F_0 in se poračuna po enačbi:

$$F_d = F_0 = c \cdot \dot{u} \quad (2.7)$$

c [kg/s] je koeficient viskoznega dušenja. Za harmonično nihanje še velja:

$$k = \omega^2 \cdot m \quad (2.8)$$

$$\dot{u}_{max} = \omega \cdot u_{max} \quad (2.9)$$

k [N/m] je togost konstrukcije v smeri in na mestu, kjer vzbujaamo nihanje. Če v enačbo (2.7), vstavimo enačbo (2.9), dobimo:

$$F_{0max} = c \cdot \omega \cdot u_{max} \quad (2.10)$$

Sedaj še obravnavajmo odnos sile dušenja F_d in pomika u . V enačbi (2.7) uporabimo izraz za odvod pomika (2.6) in jo kvadriramo:

$$F_d^2 = c^2 \cdot u_{max}^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t) \quad (2.11)$$

Nato kvadrirajmo izraz (2.5) in iz njega izpostavimo sinus. Zapišimo še izraz, ki povezuje kotni funkciji sinus in kosinus:

$$\sin^2(\omega \cdot t) = (u/u_{max})^2 \quad (2.12)$$

$$\sin^2(x) = 1 - \cos^2(x) \quad (2.13)$$

Če sedaj najprej uporabimo izraz (2.13) v enačbi (2.11), nato pa še izraz (2.12), dobimo povezavo med silo dušenja F_d in pomikom u :

$$F_d^2 = c^2 \cdot u_{max}^2 \cdot \omega^2 \cdot (1 - (u/u_{max})^2) \quad (2.14)$$

Sedaj še nekoliko preuredimo enačbo:

$$\left(\frac{F_d}{c \cdot u_{max} \cdot \omega}\right)^2 + \left(\frac{u}{u_{max}}\right)^2 = 1 \quad (2.15)$$

Dobljena enačba predstavlja krivuljo elipse, kjer sta F_d in u spremenljivki, parametra a in b od elipse pa sta:

$$a = c \cdot u_{max} \cdot \omega \quad (2.16)$$

$$b = u_{max} \quad (2.17)$$

Kot smo že prej omenili, predstavlja površina zanke pri odnosu sila - pomik energijo, ki jo je konstrukcija disipirala. Po znani enačbi $P = \pi ab$, ki predstavlja površino elipse s krakoma a in b , dobimo energijo dušenja:

$$E_D = \pi \cdot c \cdot \omega \cdot u_{max}^2 \quad (2.19)$$

Za koeficient kritičnega viskoznega dušenja c_{cr} se izkaže, da velja:

$$c_{cr} = 2 \cdot \omega \cdot m \quad (2.20)$$

Tu je m masa preizkušanca v kg. Iz enačbe (2.20) in enačbe (2.3) pa dobimo izraz za viskozno dušenje:

$$c = 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot m \quad (2.21)$$

Histerezne zanke, ki jih dobimo pri eksperimentih, nikoli niso popolne elipse, saj dušenje ni popolnoma viskozno. Ob pogoju, da sta izgubi mehanske energije v obeh primerih enaki in da sta enaka tudi maksimalna pomika, dobimo:

$$E_{D,test} = E_D \quad (2.22)$$

Sedaj vstavimo izraz (2.19) v enačbo (2.22) in z upoštevanjem enačbe (2.21) dobimo izraz, v katerem imamo energijo iz testa $E_{D,test}$, izraženo z ekvivalentnim koeficientom viskoznega dušenja ξ :

$$E_{D,test} = 2\pi \cdot u_{max}^2 \cdot \omega^2 \cdot m \cdot \xi \quad (2.23)$$

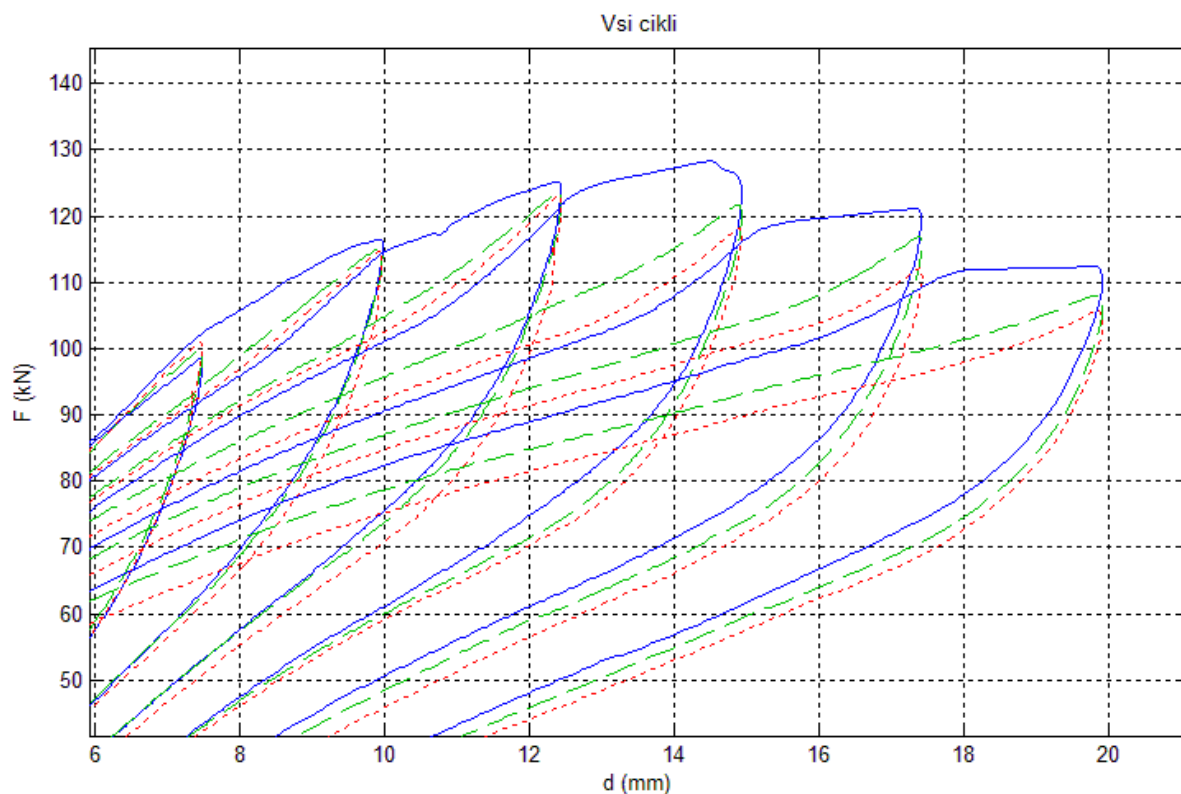
Če še upoštevamo izraz za togost (2.8), lahko sedaj izrazimo ξ :

$$\xi = \frac{E_{D,test}}{2\pi \cdot u_{max}^2 \cdot k} \quad (2.24)$$

Ker smo tudi predpostavili, da sta maksimalna pomika enaka, lahko za u_{max} uporabimo vrednost iz eksperimenta. Običajno histerezne zanke pri eksperimentih niso simetrične glede na simetralo sodih kvadrantov, zato moramo dušenje poračunati za vsako smer posebej. V izrazu za ξ takrat $E_{D,test}$ predstavlja energijo pozitivnega ali negativnega dela histereze. Togost k upoštevamo za vsako smer posebej. Za pozitivno smer uporabimo k_p , za negativno smer pa k_n . Poračunamo ju po enačbi (2.1).

2.2.5 Upadanje nosilnosti in togosti

Za kamnite zidove je značilno, da pri ponovitvah obremenjevanja do istega amplitudnega pomika nosilnosti padejo. Običajno se po treh ponovitvah stabilizirajo (Tomaževič, 1987), zato smo pri testih zid obremenili trikrat do istega pomika. Opazili smo še, da so maksimalne sile pri ponovitvah običajno padle na manjšo vrednost od predhodnih (Slika 2.15).



Slika 2.15: Povečevanje padca nosilnosti med cikli pri večanju amplitudnih pomikov

Modre polne zanke predstavljajo na sliki 2.15 prvo obremenjevanje za določen amplitudni pomik, zelene črtkane zanke predstavljajo prvo ponovitev obremenjevanja, rdeče pikčaste zanke pa drugo ponovitev. Za skrajne leve tri zanke opazimo obraten vrstni red. Nosilnost v tem primeru dejansko rahlo narašča pri ponovnih obremenitvah. Ta pojav se je redkeje dogajal in je bil posledica notranjega utrjevanja zidu, ki nastopi, ko se en kamen ali več kamnov zagozdi. Če še primerjamo med sabo padce sil pri različnih amplitudnih pomikih, opazimo, da so ti pri večini ciklov dokaj enaki, ko pa pridemo do maksimalne nosilnosti zidu, se nenadoma začnejo povečevati. To je zaradi tega, ker je zid izčrpal svojo nosilnost in so se v njem že tvorile številne razpoke, ki zmanjšajo začetno togost.

Če izračunamo togosti za vse zanke po obrazcu (2.1) in primerjamo togosti pri različnih amplitudnih pomikih med sabo, vidimo, da od vsega začetka togost zida pada. Ker nas padanje točk spominja na krivuljo hiperboličnega tipa, poskusimo točke interpolirat s funkcijo oblike:

$$y(x) = \frac{a}{x^n} \quad (2.25)$$

Pri tem predstavlja $y(x)$ togost, x pa pomik. Koeficienta a in n sta poljubni pozitivni realni števili. Interpolacije se lotimo z matematično metodo izravnave. Na obeh straneh enačbe uporabimo logaritemsko funkcijo z osnovo 10:

$$\log_{10}(y) = \log_{10}\left(\frac{a}{x^n}\right) \quad (2.25)$$

$$\log_{10}(a) = \log_{10}(y) + n \cdot \log_{10}(x) \quad (2.26)$$

Če enačbo še nekoliko preuredimo, dobimo obliko (2.26). Ta enačba sedaj velja splošno za funkcijo $y(x)$. Ker pa imamo množico diskretnih točk (togosti in pomiki), lahko zapišemo enačbo za poljubno točko:

$$\log_{10}(a_i) = \log_{10}(y_i) + n \cdot \log_{10}(x_i) \quad (2.27)$$

Če bi sedaj iz enačbe (2.27) poračunali a_i za vsako togost in pomik, bi videli, da se naši a_i razlikujejo med sabo. Zato raje rečemo, da imamo en določen koeficient a , ki naj čim bolj zadosti vsem točkam. Dobimo ga tako, da enačbo (2.27) zapišemo za vse točke in nato vse enačbe seštejemo skupaj:

$$\sum_{i=1}^p \log_{10}(a) = \sum_{i=1}^p \log_{10}(y_i) + n \cdot \sum_{i=1}^p \log_{10}(x_i) \quad (2.28)$$

Število vseh točk je p . Sedaj lahko iz enačbe (2.28) izračunamo a :

$$a = 10^{\frac{1}{p}(\sum_{i=1}^p \log_{10}(y_i) + n \cdot \sum_{i=1}^p \log_{10}(x_i))} \quad (2.29)$$

Sedaj nam je uspelo, da smo a izrazili v odvisnosti od n -ja. Vse, kar nam še ostane, je, da poiščemo ustrezen n za interpolacijo. Ker imamo na razpolago programsko orodje, lahko to naredimo s poizkušanjem. Programu rečemo, da naj začne z $n = 0.01$ in naj nadaljuje s korakom 0.01 do vrednosti $n = 1$. Pri tem beležimo statistično napako z vrednostjo r^2 , ki jo dobimo po enačbah:

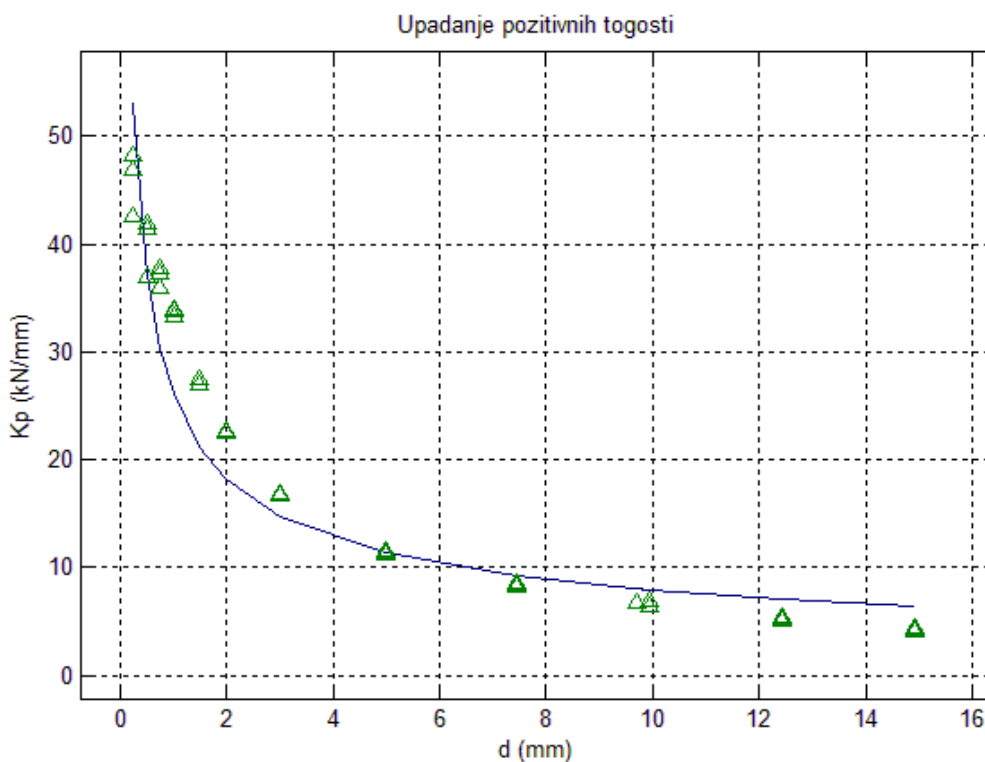
$$r^2 = 1 - \frac{A}{S} \quad (2.30)$$

$$A = \sum_{i=1}^p [y(x_i) - y_i]^2 \quad (2.31)$$

$$S = \sum_{i=1}^p [y_i - \bar{y}]^2 \quad (2.32)$$

$$\bar{y} = (\sum_{i=1}^p y_i) / p \quad (2.33)$$

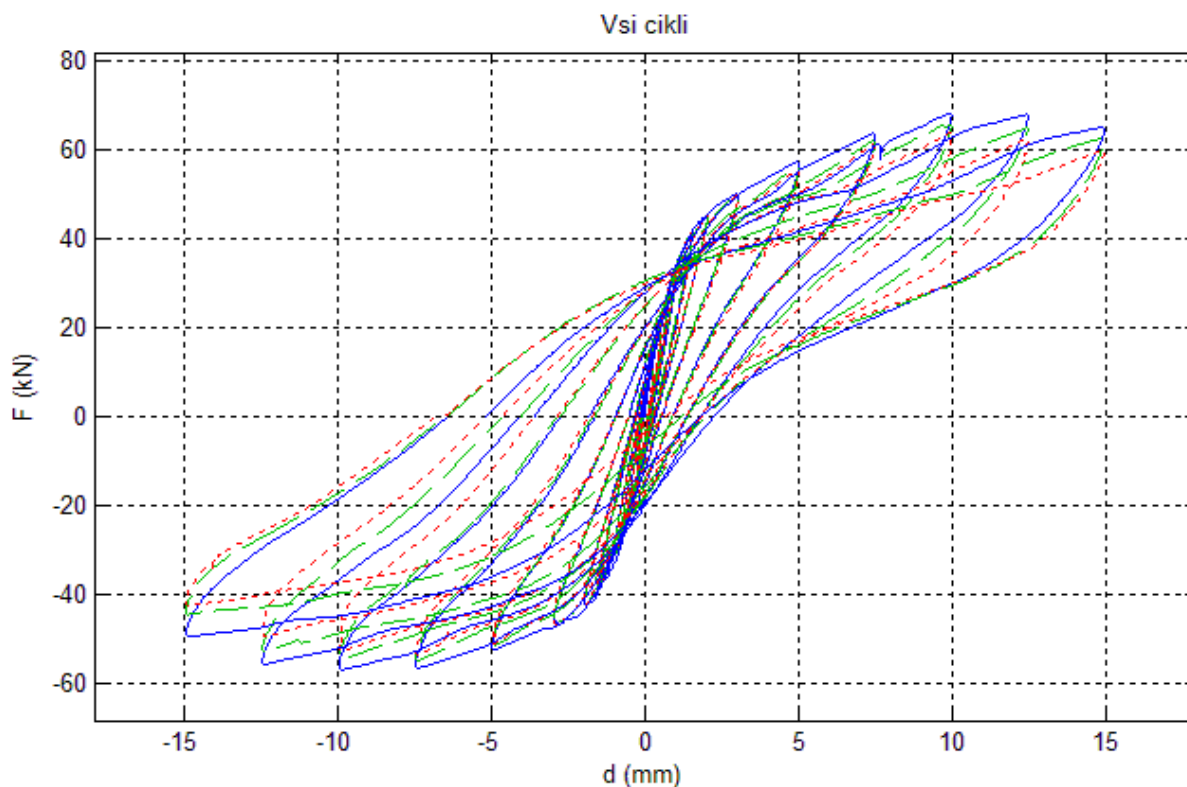
Vrednosti za r^2 se gibljejo med 0 in 1. Natančnost interpolacije je tem večja, čim bližje smo 1. Za naše teste lahko rečemo, da je dober približek že 0.80. Če sedaj v programu izrišemo dobljeno krivuljo skupaj z dejanskimi točkami togosti, lahko tudi sami ocenimo, kako dobro interpolacijska funkcija zadosti točkam (Slika 2.16). Za r^2 dobimo vrednost 0.901.



Slika 2.16: Točke pozitivnih togosti in interpolacijska krivulja

2.2.6 Ovojnica vseh histereznih zank

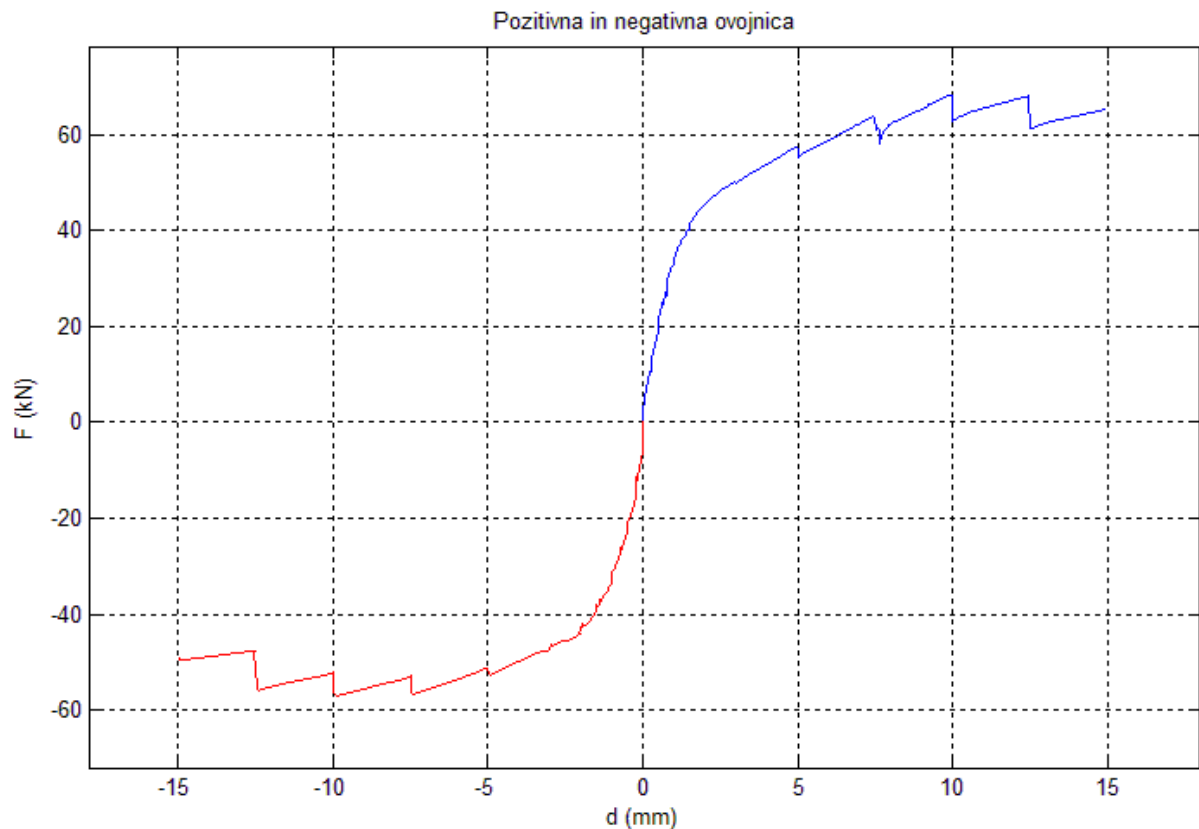
Ovojnica vseh histereznih zank predstavlja točke na zankah, kjer je bila za določen pomik dosežena največja nosilnost, na posameznih odsekih med amplitudnimi pomiki, ob pogoju da se na odseku gleda le zanke, ki gredo do večjega amplitudnega pomika opazovanega odseka in se nato obrnejo. Na začetku se pri večanju amplitud gibljemo po približno istih poteh, zato v tem delu ovojnica sovпада z začetnimi krivuljami preko več odsekov. Proti končnim amplitudnim pomikom pa se zanke že na začetku odcepijo od običajne poti in se razširijo v smeri abscisne osi ter tako dosežejo nižje končne naklone. Nosilnosti se bistveno ne povečujejo, kvečjemu se zmanjšajo. To je razvidno na sliki vseh histereznih zank (Slika 2.17).



Slika 2.17: Vse histerezne zanke

Kot že prej omenjeno, velja tudi tu, da modre polne črte predstavljajo prvo obremenjevanje pri določenem amplitudnem pomiku, zelene črtkane črte predstavljajo prvo ponovitev obremenjevanja, rdeče pikčaste črte pa drugo ponovitev. Tu vidimo, da za ovojnico ne moremo vzeti le kriterija maksimalnih sil, saj bi nam začetni del ovojnice tako predstavljale zanke končnih ciklov, ki pri pomiku 0 dosegaajo sile okrog 30 kN.

Ovojnica histereznih zank se začne v koordinatnem izhodišču in se v začetnem delu strmo dviga, nato pa preide v bolj položni del, kjer se zgodijo tudi padci sile. Na koncu dobimo dve ovojnici, saj jo naredimo posebej za pozitivno in negativno smer (Slika 2.18).



Slika 2.18: Pozitivna in negativna ovojnica vseh histereznih zank

Modra barva predstavlja pozitivno ovojnico, rdeča pa negativno. Iz slike je razvidno, da se ovojnici nekoliko razlikujeta. Rdeča navadno dosega manjšo nosilnost kot modra, kar je razumljivo, saj smo najprej obremenjevali v pozitivno smer in ker togost z vsakim obremenjevanjem bolj ali manj upade, se to v negativni smeri pozna. Ovojnica na sliki 2.18 je narejena za primer histereznih zank na sliki 2.17.

2.2.7 Elastično območje zidu

Če si podrobneje ogledamo pozitivno ovojnico na sliki 2.18, opazimo, da je začetni del, ki sega približno do sile 40 kN, dokaj raven in je tudi najbolj strmi del ovojnice. Če pogledamo

vse histerezne zanke na sliki 2.17, opazimo, da se na tem območju zid pri razbremenitvi vrne po ozki poti nazaj in se histerezne zanke pri sili 0 le malo razširijo. Zato lahko temu področju pravimo elastično območje zidu. Kot kriterij za elastični modul predpostavimo točko na ovojnici s 40% vrednostjo maksimalne dosežene sile na ovojnici F_{max} , ki predstavlja strižno nosilnost zidu. Za primer testa, prikazanega na slikah 2.17 in 2.18, sta nosilnosti v obeh smereh $F_{max}^+ = 68,4$ kN in $F_{max}^- = -57,0$ kN. Strižna togost se izračuna kot naklonski koeficient premice, ki poteka skozi izbrano točko in koordinatno izhodišče. Za pozitivno ovojnico dobimo elastični modul $K_{el}^+ = 35,5$ MPa, za negativno pa $K_{el}^- = 44,7$ MPa. Vidimo, da se strižni togosti dokaj razlikujeta. Glede na vrednosti vidimo, da je negativna togost večja, kar je tudi bolj smiselno, saj je nosilnost manjša in posledično kriterij pade na bolj zgodnje cikle oziroma amplitudne pomike. To je poleg različnega padanja togosti posledica predvsem različnih nosilnosti v obeh smereh, saj je negativna za 17% manjša od pozitivne. Do tega pojava pride predvsem, ker zid po notranji sestavi ni popolnoma simetričen glede na smeri obremenjevanja in ker po prvi obremenitvi v eno smer, lahko tudi togost zidu nekoliko upade.

2.2.8 Idealizacije ovojnice

Na ovojnici opazimo tudi, da je zgornji del skokovit in neraven. Težko bi našli tako interpolacijsko funkcijo, ki bi z zadovoljivo natančnostjo opisala krivuljo, še težje pa bi z njo projektirali, saj bi nenehno morali paziti, v katerem delu ovojnice se nahajamo zaradi nenadnih skokov na vrhu ovojnice. Zato se pojavi potreba po idealiziranem diagramu, ki s svojo obliko zadovoljivo opiše obnašanje, a je hkrati praktično uporaben za inženirske izračune. V našem primeru smo se odločili za bi-linearni diagram, saj je ta najbolj razširjen. Za pogoj idealizacije smo določili, da naj bosta površina pod ovojnico in idealizacijo enaki. To z drugimi besedami pomeni, da je vloženo mehansko delo v sistem v obeh primerih enako. Za kriterij, ki določa naklon linearnega dela idealizacije, smo si izbrali dva različna pogoja:

1. Kriterij 2/3 maksimalne sile

Pri tem kriteriju smo linearni del diagrama določili s točko, kjer ima sila na ovojnici vrednost 2/3 strižne nosilnosti zidu. Na ovojnici smo odčitali pripadajoči pomik za 2/3 F_{max} in iz obeh podatkov izračunali togost za idealiziran del po enačbi:

$$K_{ef}^+ = \frac{2/3 \cdot F_{max}^+}{u_{prip}^+} \quad in \quad K_{ef}^- = \frac{2/3 \cdot F_{min}^-}{u_{prip}^-} \quad (2.34)$$

2. Kriterij prve strižne razpoke

Za ta primer pa smo se oprli na rezultate opazovanj med testi, kjer smo za vsak eksperiment zabeležili, pri katerem amplitudnem pomiku so se začele kazati prve strižne razpoke na zidu. Nato smo za popisan amplitudni pomik poiskali pripadajočo silo na ovojnici in iz obeh ponovno poračunali togost, ki je sedaj bila nekoliko drugačna kot prej.

Za oba primera smo nato morali poračunati še nosilnost idealiziranega diagrama. Če za nosilnost izberemo oznako F_{id} , ploščino pod grafom ovojnice označimo z E_{ov} , končni pomik na grafu ovojnice pa z u_{kon} , ki je tudi končni pri idealizaciji, lahko z upoštevanjem togosti napišemo enačbo, kjer izenačimo površine za oba diagrama:

$$E_{ov} = \frac{F_{id}^2}{2 \cdot K_{ef}} + F_{id} \cdot \left(u_{kon} - \frac{F_{id}}{K_{ef}} \right) \quad (2.35)$$

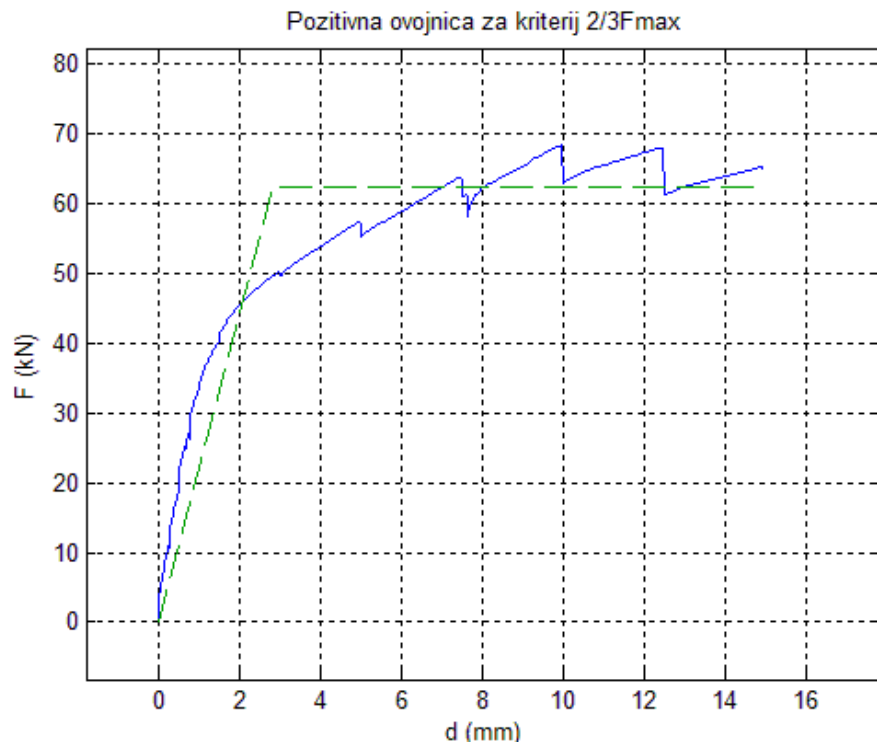
Prvi del vsote predstavlja površino pod pravokotnim trikotnikom, drugi del pa površino kvadrata med elastičnim pomikom in končnim pomikom na idealiziranem grafu. Vidimo, da je enačba (2.35) kvadratna enačba z neznanko F_{id} . Za rešitev dobimo dve vrednosti, od katerih običajno samo ena leži znotraj intervala $[0, F_{max}]$. To nam olajša izbiro. Če pa dobimo obe rešitvi znotraj intervala, pa moramo kritično presoditi, katera rešitev je prava.

Pri uporabi kriterija prve strižne razpoke za idealizacijo se lahko zgodi, da ni možno idealizirati ovojnice na omenjen način, saj se lahko pojavijo prve strižne razpoke dokaj pozno, kar se zgodi pri zidovih, ki se porušijo z upogibnim porušnim mehanizmom. To ima za posledico, da dobimo majhen nagib elastičnega dela diagrama, ki ne zmore objeti zadostne površine in tako dobimo imaginarne rešitve enačbe (2.35). Na sliki za idealizacijo in ovojnico se po izračunu v izdelanem programu izriše le linearni del, ki ne oklepa enake površine kot ovojnica (Slika 2.19).



Slika 2.19: Idealizacija pozitivne ovojnice odziva zidu z upogibnim mehanizmom po kriteriju 1. strižne razpoke

Pri kriteriju maksimalne sile pa ima običajno enačba (2.35) vedno realni rešitvi. Ko primerjamo idealizacijo in ovojnico, vidimo, da se bi-linearni diagram dokaj dobro prilega ovojnici tako za pozitivno smer kot tudi za negativno smer (Slika 2.20). Iz tega sklepam, da je kriterij maksimalne sile boljši pogoj za idealizacijo, kot kriterij prve strižne razpoke.



Slika 2.20: Idealizacija pozitivne ovojnice odziva zidu z upogibnim mehanizmom po kriteriju maksimalne sile

2.2.9 Duktilnost zidu

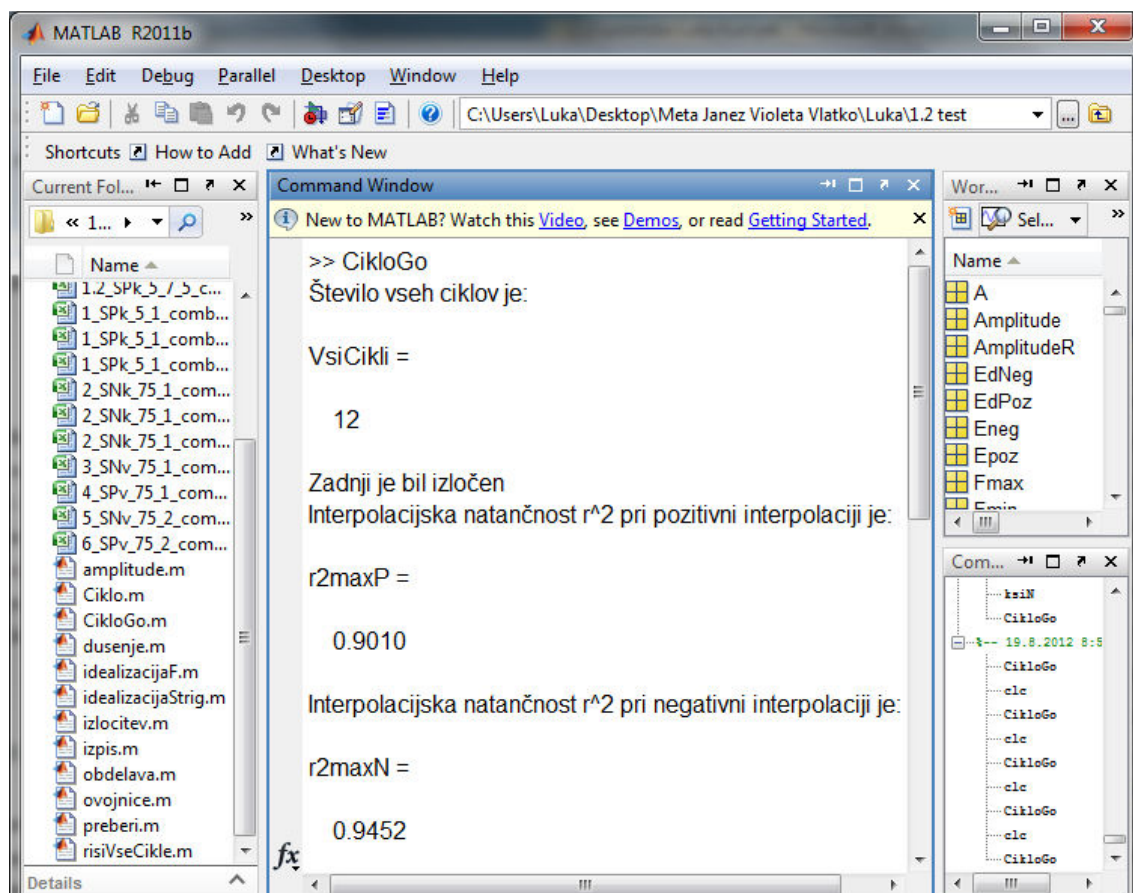
Duktilnost se definira kot razmerje med mejnim in elastičnim pomikom:

$$\mu = \frac{u_{kon}}{u_{el}} \quad (2.36)$$

Pove nam torej sposobnost deformiranja zida v plastičnem področju. Duktilnost je pomemben parameter pri potresni analizi objektov, saj se stavbe z duktilnimi konstrukcijskimi elementi bolj deformirajo v plastičnem področju, kot tiste z manj duktilnimi oziroma krhkimi elementi. Zaradi tega duktilni objekti sipajo več energije, ki se med potresom dovaja objektu.

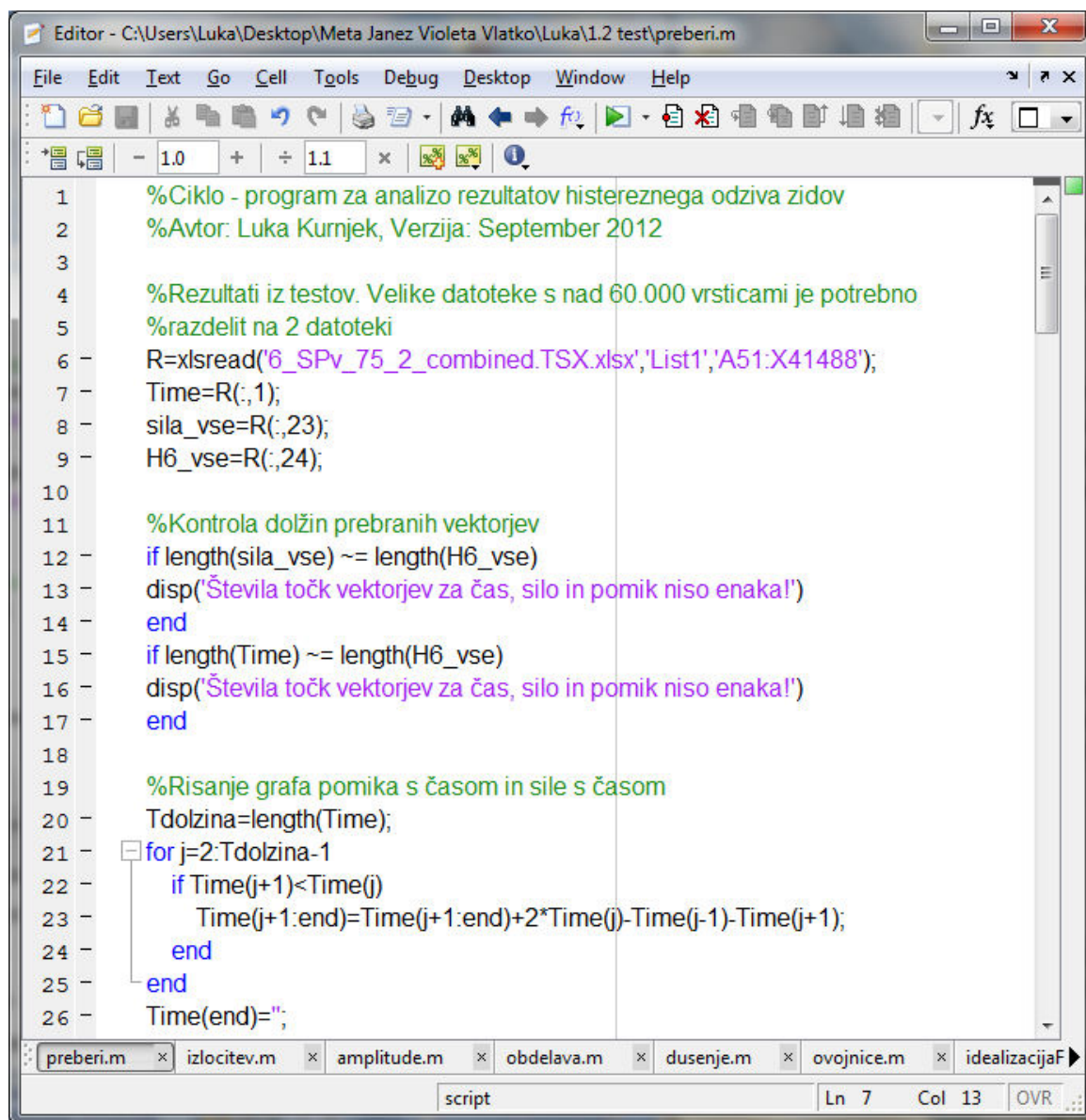
3 DELOVANJE PROGRAMA

Program, v katerem sem programiral, je Matlab. Je učinkovit program za inženirsko programiranje, saj ima preprost način, kako operirati z vektorji in matrikami, kako dostopati do njihovih elementov ter kako operirati z množicami diskretnih točk. Moj program, ki sem ga poimenoval *Ciklo*, je sestavljen iz 11 matlabovih datotek za zapis programske kode. To je vrsta datoteke, v katero lahko zapišemo poljubno količino programske kode za več potrebnih izračunov. Ob klicanju posamezne datoteke v matlabovem delovnem okolju se izvedejo vse operacije, zapisane v datoteki. Za m datoteke je značilno, da nimajo nobenih vhodnih parametrov, kot jih imajo funkcijske datoteke in se pokličejo tako, da se napiše njihovo ime v Matlabov vmesnik in potrdi s tipko *enter*. Od 11 datotek je ena namenjena zgolj branju ostalih datotek, tako da se program zažene le s klicanjem te datoteke, z imenom *CikloGo* (Slika 3.1). V njej se v točno določenem zaporedju kliče vseh ostalih 10 datotek. Tak sistem je bil narejen zaradi preglednosti kode, smiselnosti zaporedja in lažjega klicanja vseh datotek, katere bi moral uporabnik drugače vsako posamično zagnati. Vsebina ostalih 10 datotek je podrobno opisana v naslednjih desetih podpoglavjih.



Slika 3.1: Klicanje programa z ukazom CikloGo in izpis rezultatov

Na sliki 3.1 vidimo izpis rezultatov. Program nam izpiše število vseh ciklov, ki jih je zaznal. Eden cikel v programu predstavlja vse zanke, ki spadajo k enemu amplitudnemu pomiku v obeh smereh obremenjevanja. Program tudi javi v primeru, če je zadnji bil izločen, saj smo včasih na koncu preiskav zaradi zamika sile morali silo nekoliko povečati v pozitivno smer, da smo zid pomaknili v sredino. Nato nam program javi interpolacijsko natančnost za upadanje pozitivnih in negativnih togosti. Trenutno mapo, kjer se nahajamo, nastavimo v zgornji vrstici, kjer piše C:\... . Na levi strani v oknu Trenutna mapa (Current Folder) vidimo seznam datotek v mapi, v kateri se nahajamo. Datoteke z zelenimi ikonami so Excelove, v njih so zapisani rezultati posameznih testov. Datoteke pod njimi s končnico .m so tiste, ki sestavljajo program. Ko se odločimo za obdelavo določenega testa, moramo ime datoteke za ta test vpisati v programsko datoteko z imenom »preberi.m« (Slika 3.2), preden poženemo program.



```
1 %Ciklo - program za analizo rezultatov histereznega odziva zidov
2 %Avtor: Luka Kurnjek, Verzija: September 2012
3
4 %Rezultati iz testov. Velike datoteke s nad 60.000 vrsticami je potrebno
5 %razdeliti na 2 datoteki
6 R=xlsread('6_SPv_75_2_combined.TSX.xlsx','List1','A51:X41488');
7 Time=R(:,1);
8 sila_vse=R(:,23);
9 H6_vse=R(:,24);
10
11 %Kontrola dolžin prebranih vektorjev
12 if length(sila_vse) ~= length(H6_vse)
13 disp('Števila točk vektorjev za čas, silo in pomik niso enaka!')
14 end
15 if length(Time) ~= length(H6_vse)
16 disp('Števila točk vektorjev za čas, silo in pomik niso enaka!')
17 end
18
19 %Risanje grafa pomika s časom in sile s časom
20 Tdolzina=length(Time);
21 for j=2:Tdolzina-1
22     if Time(j+1)<Time(j)
23         Time(j+1:end)=Time(j+1:end)+2*Time(j)-Time(j-1)-Time(j+1);
24     end
25 end
26 Time(end)='';
```

Slika 3.2: Vnos Excelove datoteke za branje vhodnih podatkov

Datoteko odpremo tako, da na njo dvakrat kliknemo v Trenutni mapi. Pojavi se nam računalniška koda, zapisana v datoteki. Vsaka vrstica v programu je označena z zaporedno številko na levi strani, številke gredo od 1 naprej. V vrstici 6 je potrebno vnesti ime Excelove datoteke, iz katere želimo prebrati podatke. Za naš primer smo vnesli ime za šesti test: 6_SPv_75_2_combined.TSX.xlsx. Ime se nam obarva vijolično, ker smo ga dali v narekovaje.

Poleg njega v naslednja narekovaja napišemo še ime Excelovega Lista, v katerem so zapisani rezultati, v zadnje narekovaje pa vpišemo območje Excelovih celic, ki se naj zapišejo v matriko. Matriko smo na začetku označili z R kot rezultati. Za ilustracijo delovanja programa razložimo še naslednje programske vrstice na sliki 3.2

V vrsticah 7, 8 in 9 program prebere iz celotne matrike rezultatov R posamezne stolpce za čas, silo in pomik $H6$ ter jih zapiše v vektorje, poimenovane $Time$, $sila_vse$ in $H6_vse$. Za čas smo napisali $Time = R(:,1)$; Oznaki v oklepaju pri R pomenita vrstice in stolpce. Za vrstice smo dali simbol $:$, ki pomeni vse vrstice. Za stolpce pa smo dali številko 1, saj so časi zapisani v prvem stolpcu matrike R . Stavek zaključimo s simbolom $;$, ki pomeni, da se naj vektor $Time$ ne prikaže v Matlabovem pojavnem oknu. Tako kontroliramo izpis informacij.

V vrsticah od 12 do 17 izvedemo kontrolo dolžin vektorjev. S pogojnim IF stavkom preverimo najprej, če sta dolžini vektorjev za silo in pomik različni. Dolžino dobimo z ukazom $length$, pri katerem moramo v oklepaj napisati ime vektorja. Simbol za različnost se v Matlabu zapiše z $\sim$. Če sta dolžini različni, se nam v programu izpiše besedilo: Števila točk vektorjev za čas, silo in pomik niso enaka. Nato še isto stvar preverimo za vektor časov in pomikov ter enako opozorimo uporabnika v primeru neenakosti. Primerjavo dolžine vektorjev za čas in silo pa ni potrebno izvesti, saj se ob neenakih dolžinah javi vsaj ena napaka od dveh omenjenih. Vsak pogojni stavek začnemo z besedo IF in ga zaključimo z END.

Ilustrirajmo sedaj še primer zanke. V vrsticah 20 do 26 obdelamo vektor časov tako, da nam časi linearno naraščajo. Za obremenjevanje pri testu smo imeli napisane določene protokole v programu, ki so krmilili potisni bat. V protokolu tudi piše, pri kateri amplitudi se naj poveča hitrost obremenjevanja, saj bi test trajal več kot en cel dan, če bi skozi celoten test obremenjevali zid s začetno hitrostjo. Ker se je v program lahko vneslo le omejeno število ciklov, smo morali protokol vnesti večkrat, kar pa je imelo za posledico, da se je čas začel ponovno beležiti od 0, ko je nastopil nov protokol. Programski stavek začnemo najprej tako, da preberemo dolžino časa in ji damo ime $Tdolzina$. V naslednji vrstici začnemo zanko z besedo FOR. Končamo jo z besedo END v vrstici 25, ki je poravnana na isti rob kot FOR stavek. Besedi FOR sledi določitev intervala za indeks. Indeks tako pri prvem koraku privzame prvo vrednost na intervalu in se povečuje za 1 pri vsakem naslednjem koraku.

Za indeks si izberemo črko j , začetno vrednost nastavimo na 2, končno pa na $Tdolzina - 1$. Znotraj zanke nato napišemo pogojni stavek. Da bi bilo očitno, da stavek spada v območje zanke, ga zamakne program za en tabulator v levo. V pogojnem stavku rečemo, če je j -ti časovni element večji od $j+1$ -tega, se naj izvede izravnava časa, kar določimo s stavkom znotraj IF stavka, ki se spet zamakne v levo, da se vidi, da se nahajamo znotraj pogojnega stavka. Ta pogoj se izpolni torej tudi v primeru, da časovni element pade na 0 zaradi upoštevanja novega protokola. V vseh ostalih točkah se vrednosti časa običajno večajo za 0.2 s, ki se lahko tudi vmes spremeni. Sedaj pridemo do stavka za izravnavo časov. Če program s pogojnim stavkom zazna, da je naslednji časovni element manjši od sedanjega, prišteje vsem naslednjim časom vrednost sedanjega elementa $čas_i$, plus razliko $čas_i - čas_{i-1}$, da bo naslednji čas za en časovni inkrement višji, minus vrednost naslednjega časa $čas_{i+1}$. Ta vrednost je seveda za zdaj 0 in na pogled v enačbi nima smisla. Dobi pa pomen, ko razmislimo, da smo sedaj vse nadaljnje padce časov na 0 tudi povečali za $čas_i$. Kar pa ni optimalna rešitev, saj se običajno zgodi, da se je naslednji padec časa na 0, na primer pri času $čas_k$ ($k > i$), zgodil pri drugačnem času, kot tisti pred njim ($čas_i$ je tedaj različen od $čas_k$). Zato je potrebno v tem primeru ponovno vsem naslednjim elementom prišteti vrednost $2 * čas_k - čas_{k-1}$ in odšteti vrednost časa $čas_i$, ki smo ga v prejšnji izravnavi prišteli tudi temu času. Ker pa bi vrednost naslednjega časa $čas_{k+1}$ padla na 0, če mu ne bi prišteli časa $čas_i$, je sedaj njegova vrednost prav $čas_i$ in jo lahko zato v računu odštejemo tako, da se skličemo na element $čas_{k+1}$. To je ugodno, saj vektor *Time* sproti spreminjamo in bi si prejšnje dodane vsote morali pisati na stran, da bi vedeli, za koliko smo povečali vse nadaljnje čase. Tedaj dobimo enačbo:

$$Time(k+1:end) = Time(k+1:end) + 2 * Time(k) - Time(k-1) - Time(k+1) \quad (3.1)$$

Z $k+1:end$ označimo interval vseh časov, ki se nahajajo med časoma $k+1$ in končnim časom, vključno z mejama. Tako izraz $Time(k+1:end)$ predstavlja vektor vseh časov znotraj vektorja *Time*, ki so za k -tim časom $Time(k)$. Ker simbol '=' deluje kot prireditveni operator v Matlabu, moramo na začetku enačbe ponoviti izraz $Time(k+1:end)$, da v novo vrednost časov vštujemo tudi obstoječo vrednost. Kljub temu, da je izraz $Time(k+1:end)$ vektor in da mu nato prištejemo vsoto skalarno vrednost $2 * Time(k) - Time(k+1) - Time(k-1)$, Matlab to ne moti, saj izvede operacijo tako, da vsakemu elementu vektorja prišteje skalarno vrednost.

Sedaj, ko smo razložili glavni prireditveni stavek, lahko tudi razumemo, zakaj smo pri območju za indeks j začeli z 2 in končali s $Tdolzina - 1$. V stavku za izravnavo, ko smo bili pri času $čas_k$, smo namreč uporabili tudi časa $čas_{k+1}$ in $čas_{k-1}$. Če bi hoteli dostopati do teh dveh časov v točki 1 in zadnji točki $Tdolzina$, bi nam program javil napako, saj ne bi mogel dostopati v 1. točki do elementa $čas_{i-1}$, saj čas 0 ne obstaja, v zadnji pa ne do elementa $čas_{i+1}$, ki tudi ne obstaja. Še ena podrobnost, ki jo lahko razložimo, je ta, zakaj smo v pogojnem stavku zapisali pogoj kot:

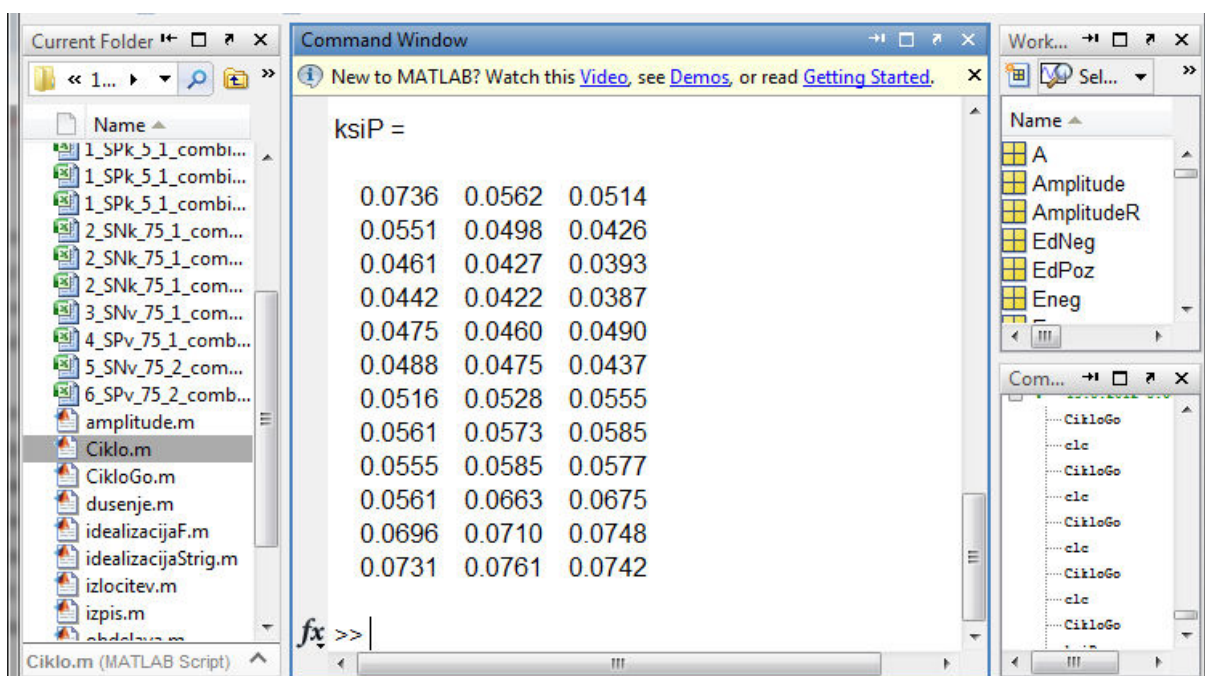
$$Time(j + 1) < Time(j) \quad (3.2)$$

in ne na primer, da naj bo naslednji čas $Time(j+1) = 0$. Kar bi bilo na začetku logično, saj smo rekli, da čas z vsakim novim protokolom pade na 0. Vendar, kot smo opisali v problemu, se pri izravnavi trenutni čas v kritični točki prišteje k vsem naslednjim in tako pogoja, da je $Time(j+1) = 0$, nikoli več ne bi izpolnili po prvi izravnavi. S pogojem (3.2) pa smo vedno na varni strani, saj bo v vsakem primeru pri padcu časa naslednji čas manjši od zdajšnjega, kljub temu, da ima nekaj vrednosti od prej prišteti. Na koncu še v 26. vrstici odstranimo zadnji element, ki ni zajet v zanki in bi s svojo vrednostjo odstopal ter motil na grafu.

Tako dobimo nov spremenjeni vektor časov, kjer vsi časi linearno naraščajo. Takih podobnih primerov, kjer se vektorji spreminjajo ali določeni elementi odstranijo, je v programu veliko. Primera sta vektor pomikov in sil, ki sta zaradi nenadnih vibracij zidu zabeležila nihanja količin, kar pa v programu povzroči zmedo, saj se histerezne zanke v programu ločijo med sabo prav po tem, da pomik preide iz negativne vrednosti v pozitivno ali da se po določenem času večanja začne manjšati in je tako določen računski amplitudni pomik, ki se za nekaj decimalk seveda razlikuje od predpisanega. Zato se tudi predpisane amplitudne pomike ne da direktno uporabiti v programu, saj program npr. točke s pomikom 15.0 mm ne bi našel v vektorju pomikov, ker ne obstaja. Obstajata lahko na primer le pomika 14.97 mm in 15.04 mm. Nenadne vibracije zidu pa lahko nastopijo zaradi več razlogov. Dogajalo se nam je, da je eden od kamnov v zidu počil zaradi prevelike obremenitve in se je pri tem sprostilo toliko energije, da se je zid rahlo zatresel. Med obremenjevanjem je začel odstopati omet in v trenutku, ko je padel z zidu, je bilo to zaznati tudi na zidu. Tretji razlog za vibracije je bilo notranje prerazporejanje napetosti v zidu med kamni in malto, ko se je malta začela na

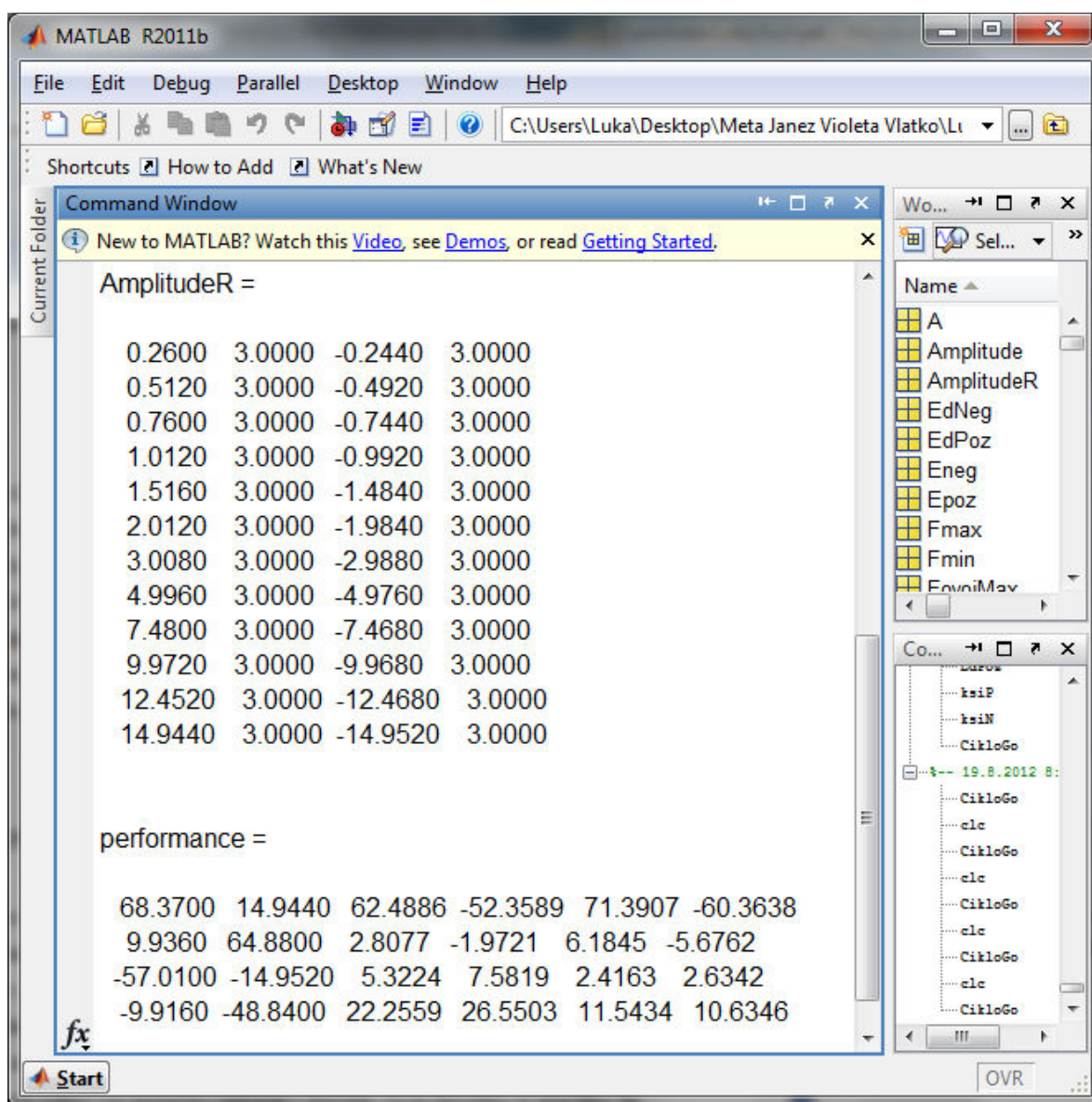
določenih mestih krušiti in je lahko kamen nasedel na drug kamen v določenih točkah. Četrta pa majhni nenadni pomiki vijakov v luknjah, s katerimi smo zid vpeli v napravo, ki so povzročali tresljaje na zidu. Običajno smo te pojave lahko tudi slišali kot kratke odrezave zvoke. Vse to je bilo potrebno upoštevati pri analizi podatkov v programu. Velikokrat so se za take primere uporabljali tehtno zastavljeni pogojni stavki, ki so lahko tudi znotraj FOR zank povzročili prekinitev izvajanja zanke. Veliko je bilo tudi premišljenega označevanja in zapisovanja elementov vektorjev in matrik ter smiselnega prirejanja novih vrednosti posameznim elementom. Znatno del dela je bilo tudi urejanje grafičnih prikazov, saj je bilo potrebno določiti velikosti mej na grafih, pomožne črte, barve in oblike krivulj, oznake na grafih in še splošnost risanja za različne primere ponovitev obremenjevanja.

Če se sedaj vrnemo na rezultate, ki jih dobimo s programom, lahko, ko program izračuna vse rezultate, vtipkamo v vmesnik *ksiP* in dobimo matriko vseh pozitivnih ekvivalentnih koeficientov viskoznega dušenja (Slika 3.3). V prvi vrstici so z leve zapisane vrednosti za 1. histerezo, 1. ponovitev ter 2. ponovitev, ki smo jih dobili pri prvem amplitudnem pomiku, v naslednji vrstici enako za drugi amplitudni pomik in tako naprej.



Slika 3.3: Matrika ekvivalentnih koeficientov viskoznega dušenja za vse obremenitve v pozitivni smeri

Če vtipkamo v program *ksiN*, dobimo vrednosti za negativne smeri obremenjevanja. Sedaj vtipkamo v program *AmplitudeR* in dobimo matriko vseh računskih amplitud (Slika 3.4). V prvem stolpcu so pozitivne amplitude, v drugem pa število ponovitev, ki jih je program iz podatkov razbral. V tretjem in četrtem stolpcu so isto zapisani amplitudni pomiki in ponovitve za negativne vrednosti. V program lahko še vtipkamo *performance* in dobimo matriko, kjer so poračunane mehanske karakteristike, kot strižna togost, duktilnost, nosilnost in elastični pomik za idealizacijo pozitivne in negativne ovojnice po obeh kriterijih (Slika 3.4).



Slika 3.4: Izpis matrike računskih amplitud ter matrike *performance*

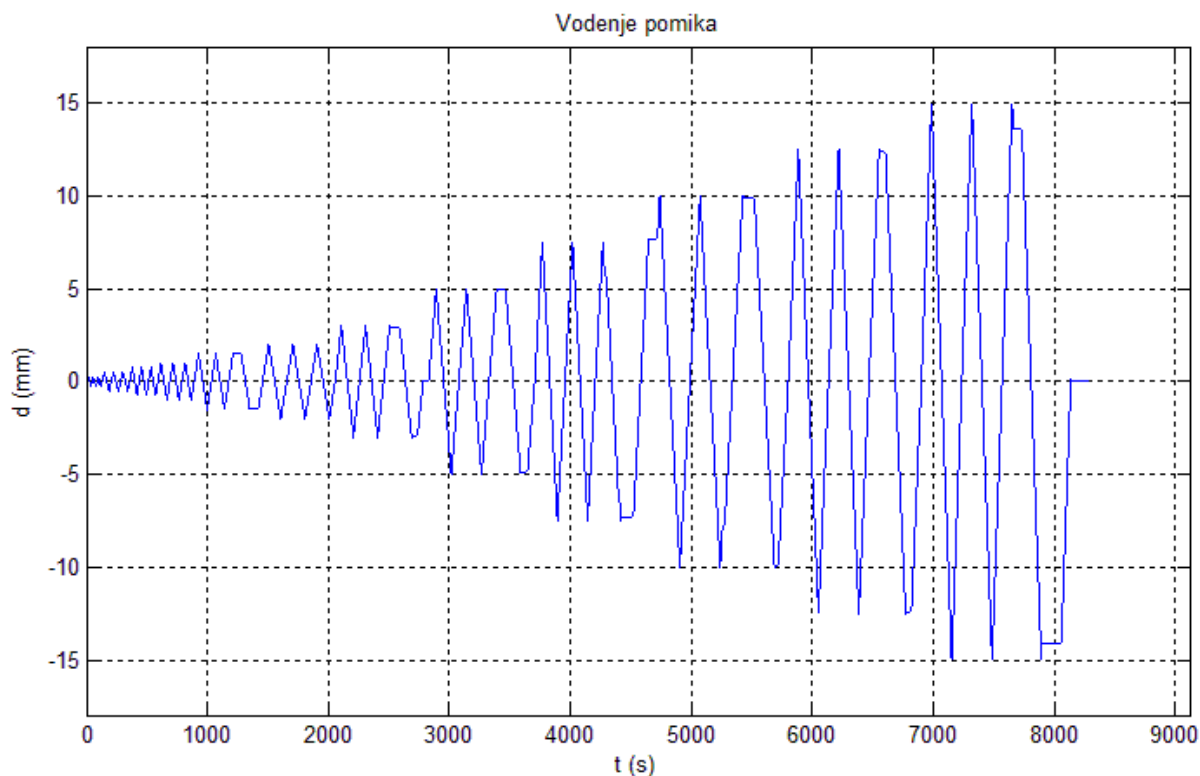
3.1 Branje podatkov

Prva datoteka je določena za branje podatkov. To so rezultati iz eksperimenta, ki služijo kot vhodni podatki za program. Ker jih je veliko in ker so zapisani v eni sami Excelovi tabeli, jih je potrebno ustrezno prebrati. Za začetek v programu najprej počistimo vse spremenljivke, ki predstavljajo vektorje in matrike, uporabljene pri izračunih. To se naredi zaradi tega, da se nam ne bi mešali rezultati iz prejšnje programske obdelave z rezultati, ki jih šele hočemo pridobiti. Za tem začnemo brati podatke. Iz tabele preberem stolpce za čas, silo in izbrani horizontalni pomik ter vsakega zapišem v svoj vektor.

V programu sem se osredotočil le na en pomik izmed vseh 18 merjenih. Pomik H6 sem si izbral zato, ker predstavlja pomik, merjen tik pod robom zidu, s katerim je bil voden bat. Je pa program napisan tako, da bi lahko izbral katerega koli izmed merjenih pomikov in bi tudi za ta primer program poračunal vse iskane količine. Razlika bi bila le v tem, da rezultatom ne bi mogli pripisati enakega fizikalnega pomena kot pri rezultatih za pomik H6 in za nekatere primere verjetno tudi ne bi dobili fizikalno smiselnih rezultatov.

Program preveri, ali imajo vektorji za čas, silo in pomik H6 enako število elementov. Če se zgodi, da so dolžine vektorjev različne, program na to opozori. Nato program preveri vektor časa, če je kje prišlo do zamikov zaradi drugačnih protokolov, in ga popravi. Kako to deluje, sem razložil v začetku poglavja 3.0.

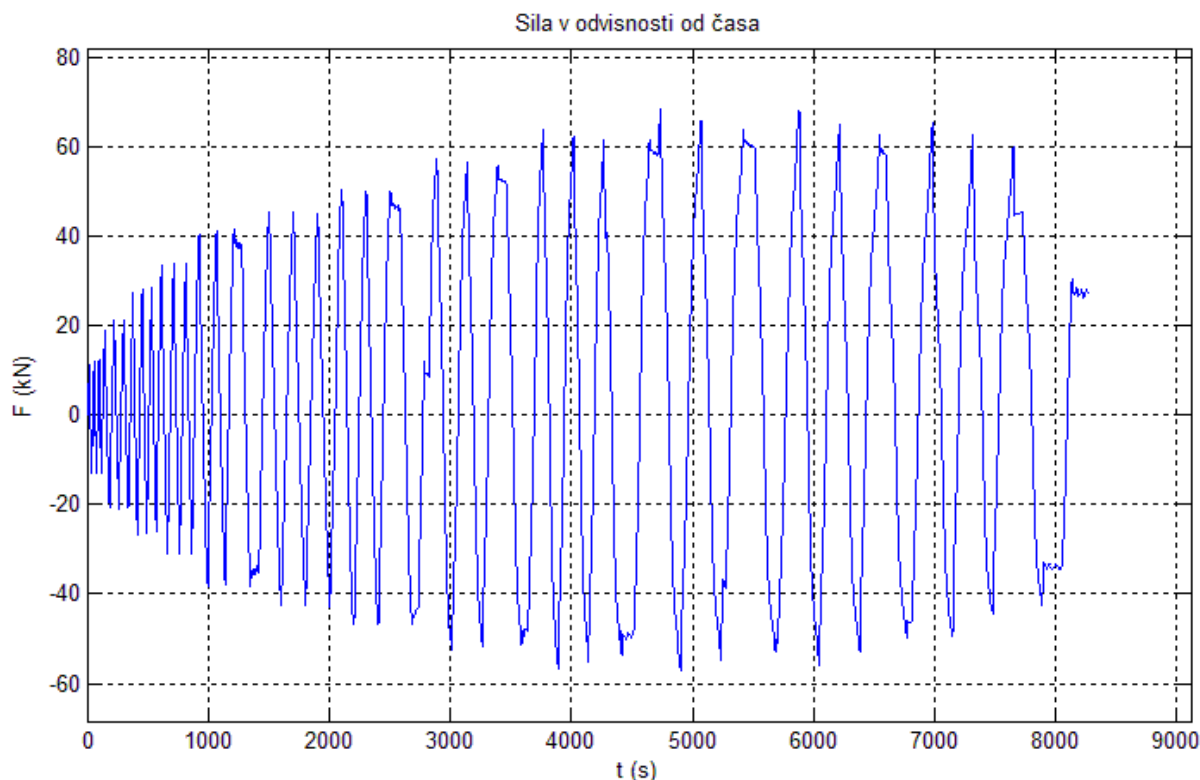
V tej datoteki se še izrišeta grafa za pomik v odvisnosti od časa (Grafikon 3.1) in za silo v odvisnosti od časa (Grafikon 3.2). Ta grafa sta namenoma izrisana na začetku programa, pred kakršno koli obdelavo vektorjev sile in pomika, ki bi izvzela točke, kjer smo mirovali ali kjer je prišlo do lokalnih nihanj sile in pomika. To pa zato, da vidimo dejansko sliko pomikov in sil ter lahko opazimo ta območja lokalnih nihanj in drugih motenj pri izvajanju eksperimenta.



Grafikon 3.1: Pomik bata v odvisnosti od časa za celoten test

Na grafu pomika v odvisnosti od časa opazimo, da se pomik postopoma povečuje. Vendar se ne poveča po vsakem nihaju, temveč po vsakem tretjem nihaju. Razlog za to smo že omenili v poglavju o upadanju togosti in nosilnosti, kjer smo rekli, da se togost histerezne zanke običajno stabilizira po treh ciklih. V programu sem si določil, da trem cikličnim ponovitvam obremenjevanja zidu v eno smer, nato v drugo in nazaj v sredino, pravimo eno ciklanje. Izvaja se za en amplitudni pomik. Na grafu tudi opazimo, da imamo v bližini nekaterih vrhov manjše platoje, kjer pomik miruje. Ta območja so blizu amplitudnih pomikov, kjer smo eksperiment ustavili, da smo slikali omet na zidu za kasnejšo določitev pomikov ometa s pomočjo fotogrametrije.

Tudi na grafu za silo se opazijo platoji na območjih vrhov, kjer sila rahlo niha okoli ravnovesne lege. Gre za ista območja, kot smo jih opisali pri grafu za pomik, kjer smo test ustavili. Vidimo, da sila narašča v obliki logaritemske funkcije in na koncu še rahlo pade zaradi upada togosti zidu.



Grafikon 3.2: Sila bata v odvisnosti od časa za celoten test

Na koncu datoteke uporabnik poda matriko amplitudnih pomikov s številom ponovitev za vsak pomik. Pozneje v programu se amplitudni pomiki in ponovitve poračunajo iz grafikona 3.1 in matrika, ki jo je podal uporabnik, služi nato za kontrolo. Na neskladje obeh matrik za določeno natančnost program opozori.

3.2 Izločitev neuporabnih točk

V tej datoteki izločimo točke, ki bi lahko privedle do napačnih izračunov programa ali celo do javljanja napak v programu. V poglavju 3.4 bom opisal, kako so potekale razvrstitve točk v matrike, za enkrat pa samo omenim dva od pogostih kriterijev. Prvi je bil ta, da program zazna, ko se spremeni predznak točk v vektorju sil. S tem namreč lahko ugotovimo mejo med dvema histereznima zankama. Vendar nastane problem, če v vektorju sil padeta vsaj dve točki na ničlo. Ker program beleži prvo spremembo zanke, ko pade točka na nič, drugo pa, ko se z druge točke, ki je tudi nič, sila spet spremeni na ne ničelno vrednost, dobimo zabeleženi dve spremembi zank, v območju nekaj zaporednih točk. Kar pa je seveda narobe.

Lahko se tudi zgodi, da več točk pade zaporedoma na nič. Pri enem testu smo imeli primer, ko je kar 14 točk za silo imelo zaporedno vrednost 0. Najlažje se ognemo tej dilemi tako, da vse točke, kjer ima sila vrednost 0, izločimo iz vektorja sile. Takrat moramo tudi izločiti točke na istih mestih iz vektorja pomikov. Ta odločitev se izkaže tudi pri drugih kontrolah koristna. Realnost rezultatov pa s tem le malo oškodujemo, saj točke, kjer je sila 0, nimajo vpliva na izračune karakteristik idealiziranih ovojnic, saj če na primer računamo površino zanke, te točke k površini ne prispevajo. Za primer testa, ko je bilo 14 zaporednih točk za silo enakih 0, se, ko smo izrisali grafikon 3.2, se to niti ni vizualno opazilo, ker predstavlja 14 točk relativno majhno območje. Lahko pa te točke bistveno vplivajo na izračune v programu.

Naslednje točke za izločanje, ki se nanašajo na prvi kriterij, pa so začetne negativne točke. Začetne zato, ker se nahajajo pred prvim amplitudnim pomikom, ki smo ga dosegli. Te točke lahko povzročijo, da se prva sprememba zanke zazna že na začetku, preden sploh pridemo do konca prve zanke. Zato tudi te točke izločimo. Za kriterij v programu rečemo, naj se preveri prvih 300 točk, vendar naj se pri tem ustavi, če pride do amplitudnega pomika. 300 točk iz izkušenj iz naših raziskavah več kot zadošča, saj je to običajno število točk za celotno prvo zanko. Seveda pa lahko uporabnik to mejo spremeni in je v programski kodi v datoteki »izlocitev.m« s komentarji, ki so zeleno označeni, na to tudi opozorjen.

Drugi od kriterijev za razvrstitev točk pa je ta, da program beleži, kdaj pride do ekstremnega pomika oziroma sile. Pri tem pogoju preidemo iz naraščanja količine v padanje, ali obratno. To pa je lahko problem, saj kot že prej omenjeno, lahko sila in pomik iz večih razlogov na katerem koli mestu v testu zanihata, kar pomeni, da večkrat spremenita svoj trend. Zato kakršno koli nihanje sile in pomika, kjer se spremeni predznak točk, izločimo iz obeh vektorjev. Torej izločamo točke, ki nihajo okoli ničle. To je koristno tudi zato, da ohranimo nihanja, ki se zgodijo v višjih predelih histereznih zank in ki ne zanihajo vse nazaj do 0, ker imajo običajno ta nihanja majhne amplitude. To nam omogoča, da tudi na rezultatih vidimo, kje je prišlo do velikih napetosti in je nekaj v zidu ali pri vpetju zidu popustilo. Pri tem seveda moramo izvesti izločevanje ločeno, saj ko enkrat izločimo točke za sile, moramo še izločiti pomike na istih mestih, kot so točke za sile, da se ohrani enotnost rezultatov. Enak postopek nato naredimo še pri izločanju točk za pomike, kjer izločimo še nato točke za sile. Kako torej zgleda kriterij za izločitev točk pri nihanju sile in pomika okoli ničle?

Kriterij za izločitev nihanja pomika je ta, da ko program zazna spremembo predznaka, poišče v intervalu točk med dvema sosednjima spremembama predznaka maksimum ali minimum. Če je sprememba predznaka iz plus na minus, vemo, da je za nami pozitiven nihaj in poiščemo maksimum, če pa je sprememba iz minus na plus, pa smo na koncu negativnega nihaja in poiščemo minimum. Ta maksimum in minimum bi morala pri rednem ciklu predstavljati pozitivno in negativno amplitudo, kar pa ni tako, če gre za motnje. Zato damo pogoj: če je pozitiven maksimum za 20% manjši od predhodne zabeležene amplitude, naj se točke na intervalu tega nihaja izbrišejo.

Za prvi referenčni maksimum uporabimo tistega iz matrike amplitud, ki jih poda uporabnik. Vsi nadaljnji pa se uporabijo iz matrike za amplitude, ki jo gradimo. Tako velik nihaj, ki bi dosegel več kot 80% prejšnje vrednosti za pomik in bi bil motnja, se pri naših testih ne pojavi. Zakaj pa ni ustrezen pogoj, da bi bila pomika kar enaka? Zaradi tega, ker se tudi enaki amplitudni pomiki med seboj za nekaj procentov razlikujejo zaradi nezmožnosti potisnega bata, da bi zid pomaknil do točno določenega pomika, kar je seveda običajno pri eksperimentih teh razsežnosti. In ker je vsak naslednji maksimalen pomik približno enak prejšnjemu ali večji, če preidemo na nov amplitudni pomik, je kriterij, da mora biti naslednji pomik vsaj 80% vrednosti prejšnjega, zadovoljiv za vse točke. Tudi tu je uporabnik z zelenimi komentarji v programski kodi datoteke »amplitude.m« opomnjen, da lahko to mejo spremeni. Sedaj podobno naredimo za minimume, ki jih zabeležimo.

Postopek za izločevanje nihanja sile okoli 0 je enak. Razlika je le ta, da je pogoj za neregularen maksimum ali minimum blažji, kot v primeru za pomik. Rečemo, da maksimum za silo ne sme biti manjši za več kot 40% prejšnjega maksimuma. Kar je zaradi večjega nihanja sil v primerjavi z nihanjem pomikov. Nato še podobno naredimo za minimum za sile.

3.3 Določitev računskih amplitud

Naslednja stvar, ki jo še naredimo pred razvrstitvijo točk v skupine zank, je določitev računskih amplitud. Idejno si vnaprej strukturiramo matriko, v katero bomo zapisovali naše amplitude. Rečemo, da naj ima matrika toliko vrstic, kolikor je amplitudnih pomikov, in se naj v prvi stolpec zapišejo pozitivne amplitude, v drugega ponovitve zank za posamezno

amplitudo, v tretjega negativne amplitude in v četrtega ponovitve pri negativnih amplitudah. Idejno smo si matriko zamislili zato, ker seveda vnaprej ne vemo, koliko amplitud bo program zaznal. Pri tem se ne opiramo na podane amplitude od uporabnika, saj tiste služijo za kontrolo. Program določi dejanske amplitude iz testa, ki se v primeru drugače izvedenega testa ali napačno podanih amplitud s strani uporabnika lahko razlikujejo od predvidenih amplitud.

Kriterij za določitev amplitudnega pomika v programu je ta, da razlika predhodnega z zdajšnjim ekstremnim pomikom po absolutni vrednosti ne sme pasti pod $1/14$ absolutne vrednosti predhodnega pomika. Ta definicija pokriva sedaj negativne in pozitivne amplitudne pomike. Zakaj pa ravno $1/14$? Če pogledamo primer prvih dveh amplitud, ki sta bile pri nas 0.25 in 0.5 mm, dobimo razliko $0.5 - 0.25 = 0.25$ mm, ki pa je mnogo večja od $0.25/14 = 0.0178$ mm. Sedaj pa se vprašajmo, katera razlika pomikov je tista, ki da najbližjo vrednost $1/14$ predhodnega pomika? Ker pri testu nismo šli nikoli dlje kot do pomika 60mm, dobimo kritično razmerje $(60-55)/55 = 0.091$, kar pa nekoliko več kot $1/14 = 0.071$. Seveda lahko tudi to mejo uporabnik spremeni in jo prilagodi za drugačne teste.

3.4 Razvrstitev točk v matrike posameznih ciklov

Sedaj, ko smo izločili vse točke, ki bi nas ovirale pri nadaljnjem programiranju, lahko začnemo z razvrstitvijo točk v matrike posameznih zank. Za kriterij uporabimo isti kriterij, ki smo ga uporabili pri izločitvi točk za sile pri nihanju okoli vrednosti 0. Beležimo vse preskoke sile preko abscisne osi in tako razvrščamo posamezne zanke v matrike. Izberemo si tak sistem, da v eno matriko zapišemo v prvo vrstico pomike za prvo zanko, v drugo vrstico pa pripadajoče točke za sile. Nato v naslednji dve vrstici zapišemo v istem vrstnem redu pomike in sile za prvo ponovitev in nato še v 4. in 5. vrstico za drugo ponovitev. Zanke za naslednji amplitudni pomik zapišemo v novo matriko. Vse matrike so po vrsti oštevilčene z imeni zanke1, zanke2, zanke3 itd., tako da vemo, za katero matriko gre. Lahko smo pomirjeni, da ne bo prišlo do napak, saj smo točke prej ustrezno obdelali. Bi se pa v vsakem primeru najpozneje opazila morebitna napaka na grafičnem prikazu rezultatov. Za primer naših 14 testov se je izkazalo, da smo po programski obdelavi vseh testov dobili smiselne rezultate, ki sem jih še dodatno preveril tako, da sem pregledal vse točke v Excelovi datoteki še »pešč«.

3.5 Računanje padanja togosti in dušenja

V poglavju 2.2.4, ki govori o dušenju, smo z enačbami pokazali, da se nadomestni koeficient viskoznega dušenja da izračunati iz površine zanke, dobljene iz testa, maksimalnega pomika za zanko in iz pripadajoče togosti zanke. Zato v tem poglavju programa najprej s FOR zanko pregledamo vse matrike za posamezne zanke in izluščimo maksimalno in minimalno silo za vsako zanko ter pripadajoči pomik. Če sedaj silo delimo s pomikom, dobimo togost te zanke. Togosti in pripadajoče pomike zapisujemo v vrstice matrike tako, da si sledijo po vrsti.

Ko imamo pripravljene togosti in pomike, se lahko posvetimo upadanju togosti. Določimo najprej interpolacijska koeficienta a in n za funkcijo oblike $y(x)=a/(x^n)$. Uporabimo postopek, opisan v poglavju o dušenju. Ko izrazimo koeficient a z n -jem, izberemo natančnost 1/100 za določitev n -ja in rečemo, da se naj na intervalu od 0 do 1 s korakom 0,01 za vsak n zapiše interpolacijska funkcija in naj se za vsako funkcijo še določi natančnost interpolacije z r^2 vrednostjo. Te vrednosti si tudi zapisujemo v matriko. Ko imamo na koncu vse vrednosti zapisane, pogledamo, katera je največja, in izberemo pripadajoči n . S tem smo dobili najboljšo interpolacijsko funkcijo in še natančnost interpolacije. Celoten izračun moramo še enkrat na enak način izvesti za negativne togosti. Pri tem pazimo na predznake. Ko imamo vse togosti in interpolacijski krivulji za obe smeri, lahko izrišemo grafa upadanja togosti, na katerih prikažemo vse togosti za eno smer in izrišemo še za območje točk interpolacijsko krivuljo (Slika 2.16).

Na koncu datoteke se še posvetimo nadomestnemu koeficientu viskoznega dušenja. Tega poračunamo za vsako zanko in za obe smeri. Za izračun potrebujemo poleg togosti in maksimalnih pomikov še površine zank. Te isto zapišemo v matriko, s tem, da pride v tej matriki dvakrat več elementov, kot je zank, saj moramo za vsako zanko ločeno poračunati pozitivno in negativno površino. Površine zank poračunamo tako, da vsak element vektorja sil pri posamezni zanki množimo z intervalom za pomik. Ta interval dobimo tako, da vzamemo polovico razdalje trenutnega pomika do predhodnega in prištejemo zraven polovico razdalje trenutnega pomika do naslednjega. Če se sedaj gibljemo od začetnega pomika zanke do maksimalnega in sproti seštevamo vse zmnožke intervalov pomikov s točkami sil, dobimo na koncu površino, ki leži med abscisno osjo in zgornjim robom zanke. Sedaj moramo tej površini odšteti površino, ki jo oklepa spodnji rob zanke s pozitivno abscisno osjo.

Površino poračunamo po istem postopku kot za zgornji del krivulje. Ko jo odštejemo prej izračunani površini, dobimo površino, ki jo oklepa zanka na strani pozitivne ordinatne osi. Površine za del zanke, ki leži na negativni strani ordinatne osi, dobimo na podoben način, le da moramo pri računanju intervalov pomikov paziti na pravilne predznake pomikov. Sedaj, ko imamo vse pozitivne in negativne dele površin histereznih zank, lahko po vrsti poračunamo vse ekvivalentne koeficiente viskoznega dušenja. Zapišemo jih v dve matriki, $ksiP$ in $ksiN$.

3.6 Račun ovojníc

Opis, kaj je ovojница, smo podali v poglavju 2.2.6. V tem poglavju smo tudi omenili, da moramo biti natančni pri definiciji. Ne moremo na primer trditi, da je ovojница krivulja sestavljena iz točk, ki za vsak pomik predstavljajo maksimalno silo. Zalomilo bi se nam že na začetku, saj smo pokazali v teoretičnem poglavju o ovojnicah, da zadnje histerezne zanke zgubijo dokaj na togosti in se precej razširijo, kar ima za posledico, da sekajo ordinatno os pri precej visoki vrednosti sile, ki bi načeloma prišla v poštev, po začetni napisani definiciji. Zato moramo biti pozorni, da gledamo odsekoma rezultate za krivulje, in sicer med amplitudnim pomikom odsekanega dela krivulje in prejšnjim amplitudnim pomikom. Enako je tudi, ko programiramo. Po korakih pobiramo točke za ovojnice, kjer na določenem intervalu med dvema amplitudama vzamemo točke od prve zanke, ki smo jo dobili za večjo amplitudo na tem intervalu. Tako odsekoma sestavimo celotno krivuljo, ki dokaj natančno predstavlja dejansko ovojnico sil. Postopek izvedemo za pozitivno in negativno stran. Na koncu še narišemo obe ovojnici na en graf in ju pobarvamo z modro in rdečo barvo, da je razlika bolj očitna.

3.7 Idealizacija po kriteriju maksimalne sile

Pri idealizaciji se glede na doseženo maksimalno silo najprej osredotočimo na vektorja z zapisom za pozitivno in negativno ovojnico. Iz njiju na začetku preberemo maksimum in minimum sile, nato pa še maksimalna pomika za obe smeri. Te količine bomo rabili pri reševanju kvadratne enačbe. Upoštevamo izbrani pogoj in določimo vrednosti referenčnih sil, kot 2/3 ekstremnih sil. Nato se poišče še pripadajoča pomika na ovojnici za ti dve vrednosti.

S FOR zanko gremo po vrsti skozi vse točke za sile in se pri tisti, ki je najbližje tej vrednosti, ustavimo. Nato preberemo pripadajoči pomik in iz njega ter referenčne sile poračunamo togost za idealizacijo. Zdaj rabimo le še površino, ki jo oklepa ovojnica z abscisno osjo. Dobimo jo po istem postopku, kot pri računanju površine zank, le da se površini, ki jo oklepa zgornji del krivulje z abscisno osjo, ne odšteje površina, ki jo oklepa spodnji del. V tem primeru pa imamo samo eno krivuljo in je potrebno za pozitivno stran torej samo enkrat poračunati površino. Enako naredimo tudi za negativno stran.

Sedaj imamo vse podatke pripravljene, da po kvadratni enačbi izračunamo nosilnost idealiziranega diagrama. Za fizikalno smiselne podatke, ki smo jih vstavili v enačbo, moramo dobiti tudi realni rešitvi. Preverimo najprej, če katera od rešitev ne pade v interval med pomikom 0 in maksimalnim pomikom na ovojnici. Če je temu tako, je druga rešitev prava. Če temu ni tako, pa moramo sami inženirsko presoditi, katera rešitev je bolj smiselna. Ker smo pri izračunih dobili več pomembnih mehanskih karakteristik idealizacije zidu, jih zaradi večje preglednosti razvrstimo v matriko po določenem vrstnem redu.

To matriko poimenujmo *performance*. Zapišimo najprej nekaj količin v prvi stolpec, ki pripadajo ovojnicama. V prvo vrstico zapišemo maksimalno silo pozitivne ovojnice, v drugo vrstico pa pripadajoči pomik za ovojnico. V tretjo in četrto vrstico pa zapišimo minimalno silo negativne ovojnice ter pripadajoči pomik. Sedaj naredimo še isto za drugi stolpec, le da zadevo obrnemo. V 1. in 3. vrstico zapišemo maksimalni in minimalni pomik za obe ovojnici, v 2. in 4. vrstico pa pripadajoči sili. V naslednje štiri stolpce pa zapišimo mehanske karakteristike zidu poračunane iz idealizacije.

V prvo vrstico napišemo nosilnost F_y . Najprej za pozitivno idealizacijo in nato še za negativno. V drugo, tretjo in četrto vrstico pa napišemo elastičen pomik u_{el} , duktilnost μ in efektivno togost K_{ef} . Isto najprej za pozitivno in nato za negativno idealizacijo. V 5. in 6. stolpec bomo še v naslednjem poglavju zapisali enake karakteristike kot v 3. in 4. stolpcu, le ob upoštevanju kriterija prve strižne razpoke za idealizacijo. Sedaj imamo zajete vse pomembne količine ovojnic in idealizacije v eni matriki (Slika 3.4). Na koncu narišemo grafa za idealizacijo po opisanem kriteriju (Slika 2.20).

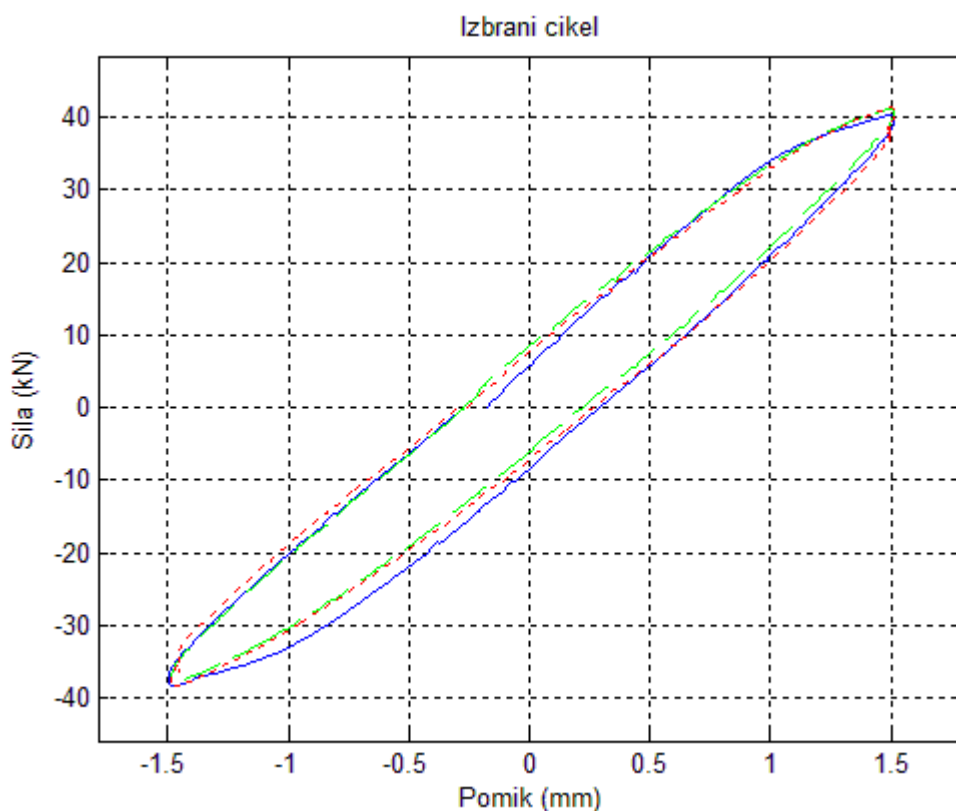
3.8 Idealizacija po kriteriju 1. strižne razpoke

Pri tej idealizaciji postopamo enako, kot v poglavju 3.7, le da upoštevamo drugi kriterij. Za kriterij prve strižne razpoke moramo imeti na voljo podatke, kdaj so za določen test nastale prve strižne razpoke. Pri opazovanjih smo beležili amplitudni pomik, pri katerem so nastale. Vrednost amplitudnega pomika je vzeta zato, ker vizualno ne moremo natančno določiti trenutka, kdaj je razpoka nastala, temveč sklepamo, da je do nje prišlo zaradi tega amplitudnega pomika.

Ko imamo za vsak test določene kritične pomike, izberemo tistega, ki pripada našemu, in ga zapišemo na začetek datoteke »idealizacijaStrig.m«. S komentarjem je tudi označeno mesto, kjer se mora zapisati pomik za razpoko. Na obeh ovojnicah poiščemo temu pomiku pripadajočo silo ter izračunamo togost idealizacije. Vse ostale količine, ki jih rabimo za reševanje kvadratne enačbe, ostanejo iste kot v prejšnjem primeru. Izračunamo še nosilnosti za obe idealizaciji in iz togosti dobimo elastična pomika idealizacij. Sedaj lahko izpolnimo zadnja dva stolpca matrike *performance*. Na koncu še narišemo idealizaciji za obe smeri za omenjeni kriterij.

3.9 Risanje vseh ciklov in izbranega

V predzadnji datoteki narišemo graf vseh histereznih zank, ki smo jih dobili pri obravnavanem testu. To je koristno, saj lahko vidimo, kakšni so bili pomiki zidu pri obremenjevanju in lahko tudi vizualno primerjamo zanke med sabo, saj so vse izrisane na eni risbi. Zaradi večje preglednosti označimo zanke za prvi cikel pri nekem amplitudnem pomiku s polno modro črto, zanke prve ponovitve s črtkasto zeleno črto in druge s pikčasto rdečo črto (Slika 2.17). Ker so v elastičnem območju zanke zelo blizu in se med sabo na grafu težko ločijo, sem v programu dodal opcijo, da za številko ciklanja, ki jo podaš v tej datoteki, nariše samo tiste zanke, ki pripadajo podani zaporedni številki amplitudnega pomika. Če podamo torej številko 5, nam bo program izrisal vse zanke amplitudnega pomika, petega po vrsti (Slika 3.5). Za naš primer je to pomik 1.5 mm, saj si amplitudni pomiki sledijo 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 in 1.5 mm.



Slika 3.5: Histerezne zanke za izbrani amplitudni pomik

Ko imamo kateri koli graf izrisan v Matlabu, ga lahko poljubno povečamo ter si ogledamo detajle pri krivuljah, če se izkaže potreba po tem. Celotno sliko grafa ali določeno povečavo lahko nato izvozimo v različnih slikovnih formatih. Za mojo diplomsko sem si izbral format bmp.

3.10 Izpis rezultatov

Ta datoteka je zgolj namenjena temu, da se uporabniku po končanih izračunih programa, izpišejo vse matrike, ki jih je v tej datoteki določil. Tako na primer, če želi, da se mu pri vsakem zagonu programa izpišejo računske amplitude in število ponovitev, vtipka v to datoteko le ime te matrike *AmplitudeR*, brez podpičja na koncu, saj tako program pri klicanju te datoteke izpiše to matriko v Matlabov delovni vmesnik. To lahko naredi tudi za druge matrike kot so *performance*, *ksiP*, *ksiN*, *EdPoz*, *EdNeg* itd.. Obseg in zaporedje izpisa si lahko s to datoteko uporabnik določi sam.

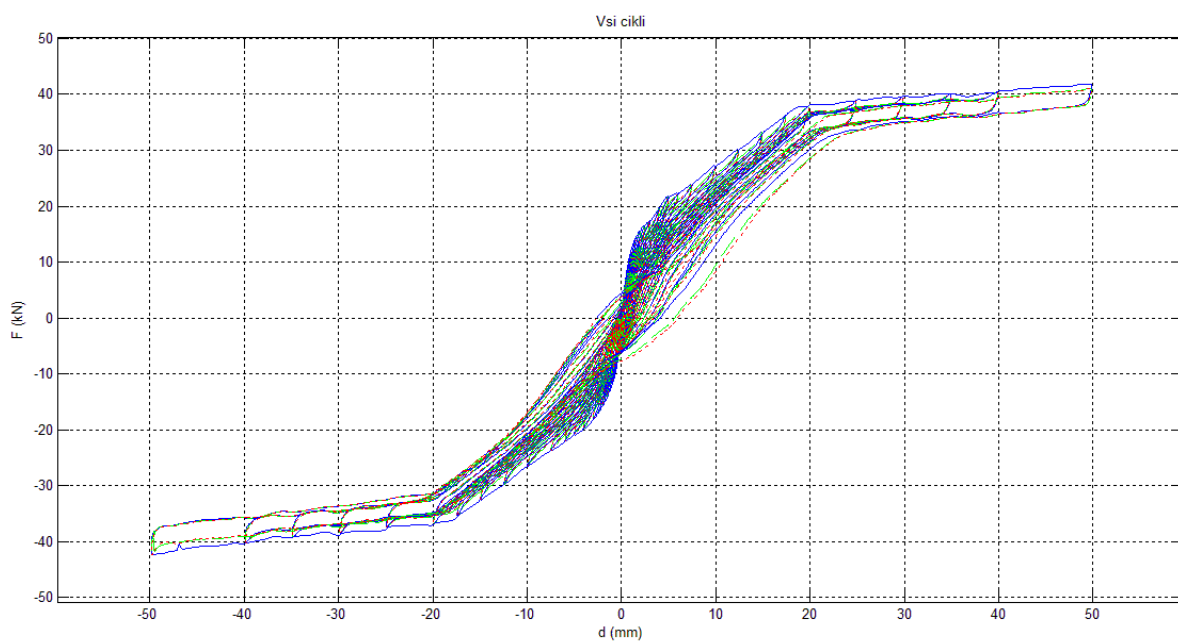
4 PRIMERJAVA POSAMEZNIH TESTOV

Ko enkrat razumemo delovanje programa, se lahko lotimo obdelave testov in naredimo primerjavo med njimi. Najprej bomo primerjali, kako različna robna pogoja za vpetost vplivata na odziv zidu. Nato bomo primerjali vpliv treh različnih nivojev predkompresije. Predkompresijo smo izvajali v vertikalni smeri in smo si izbrali tri različne nivoje obremenitve, in sicer 5, 7.5 in 15% tlačne trdnosti zidov. Za oba kriterija bomo teste primerjali po ustreznih parih. Nato pa bomo primerjali vse teste skupaj, glede na nosilnosti zidov pri posameznih testih. Obnašanje zidov bomo pojasnili s porušnimi mehanizmi, ki se pri tem vzpostavijo. Na koncu bomo za vsak primer obremenjevanja zidu še prikazali sipanje energije v odvisnosti od amplitudnih pomikov.

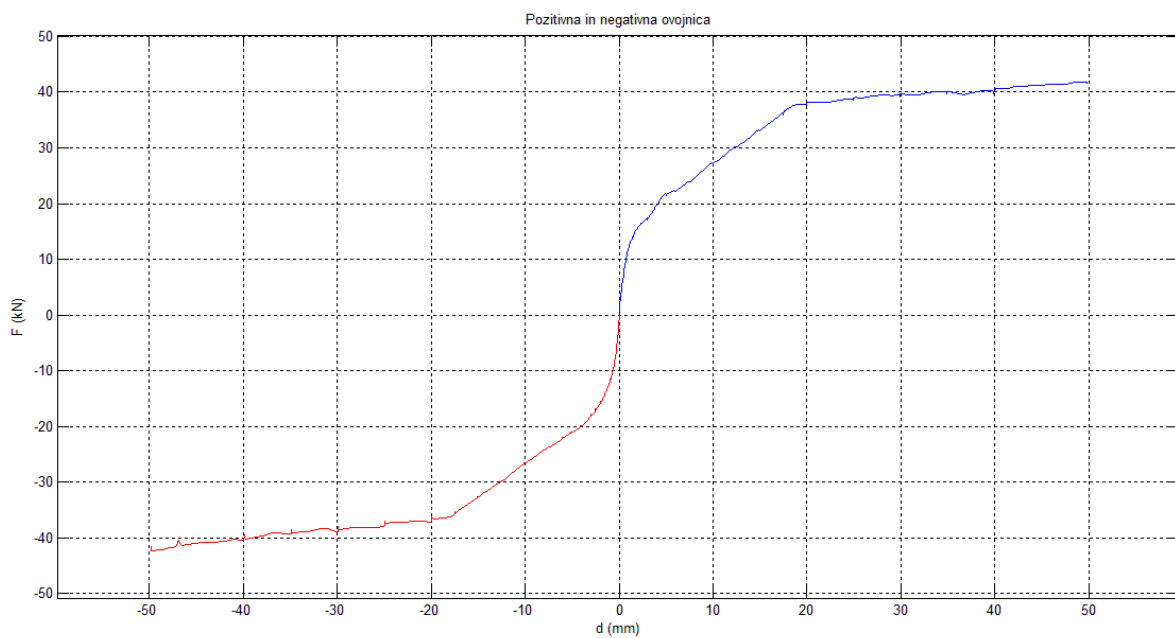
Podlaga za primerjavo med testi so mehanske karakteristike idealiziranih diagramov, izračunanih po kriteriju maksimalne sile, saj se izkaže zaradi različnega odziva zidov bolj primeren. Za lažje razumevanje odzivov zidov, si pomagamo razjasniti njihovo obnašanje z diagrami, ki jih dobimo s programom za vsak test, ter s slikami, ki smo jih naredili pri eksperimentih.

V diplomski nalogi so obravnavani in s programom analizirani testi 1, 1-2, 4, 7 in 13. Skupaj gre za 4 zidove, saj predstavlja test 1-2 ponovitev testa 1, pri čemer smo zid obremenjevali samo enkrat za vsak amplitudni pomik. Za vsak test podamo sedaj sliko vseh histereznih zank in sliko obeh ovojnic za obe smeri. Za vsako smer podamo sliko idealizacije po obeh kriterijih in upadanje togosti. Na koncu še prikažemo vse stolpčne diagrame, narejene s Excelom, za primerjavo mehanskih karakteristik idealiziranih diagramov po kriteriju maksimalne sile. Te so nosilnost, elastični pomik, duktilnost in strižna togost.

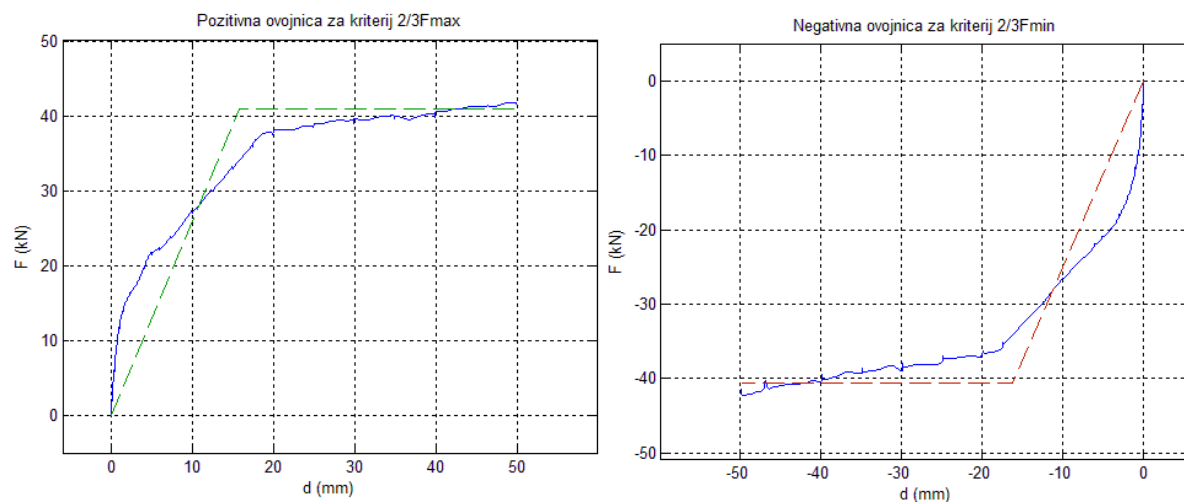
Grafi za test 1:



Slika 4.1: Vse histerezne zanke za test 1

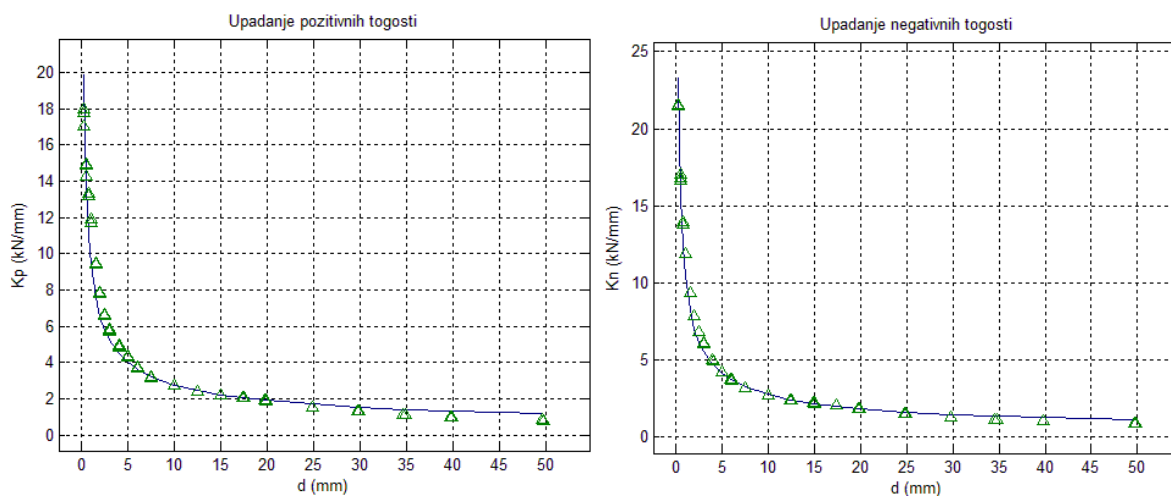


Slika 4.2: Ovojnice za test 1



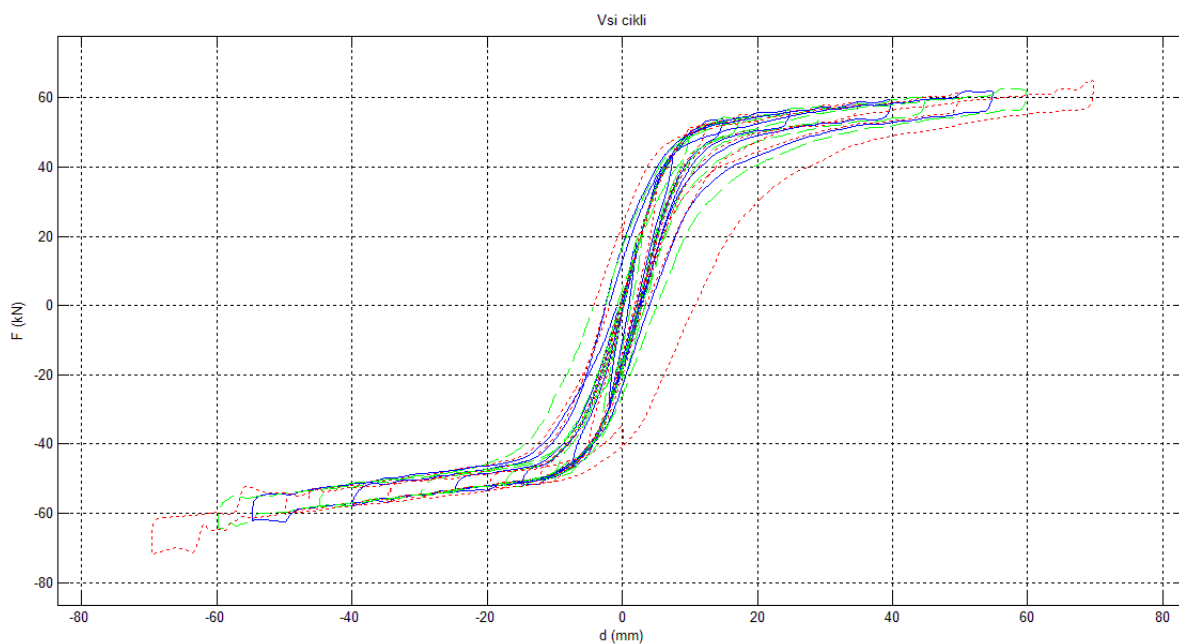
Slika 4.3: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 1

Pri testu 1 nismo zabeležili strižnih razpok, saj strižni mehanizem porušitve ni nastopil. Zato tudi ne izrišemo idealizacij po kriteriju 1. strižne razpoke.

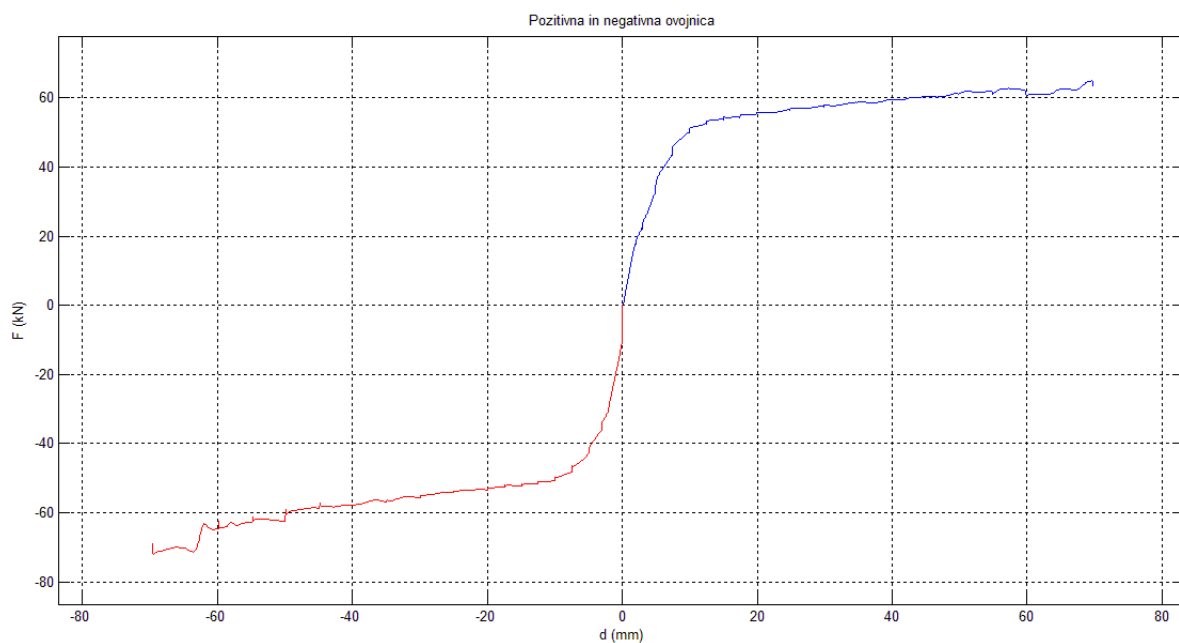


Slika 4.4: Upadanje togosti za test 1

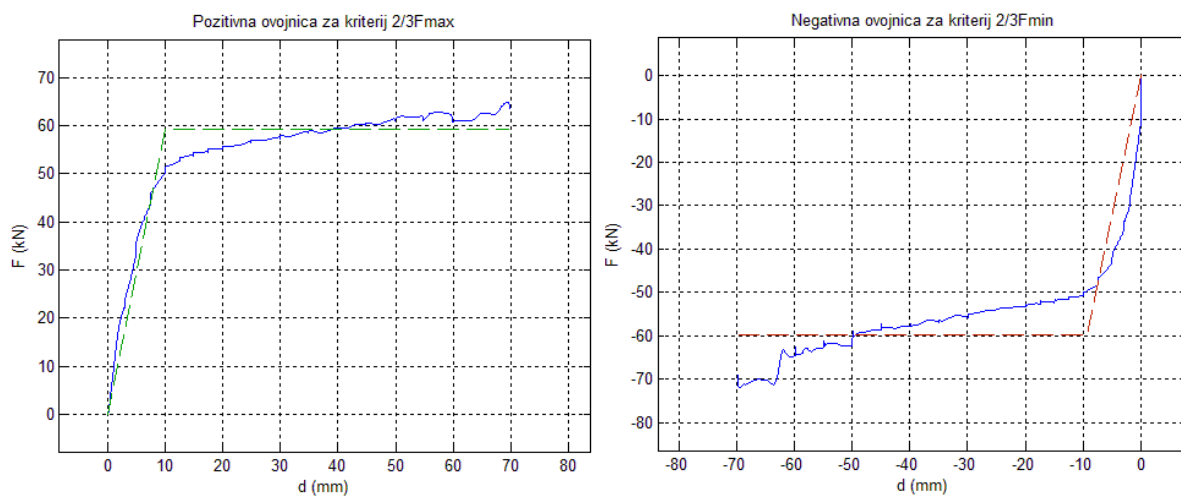
Grafi za test 1-2:



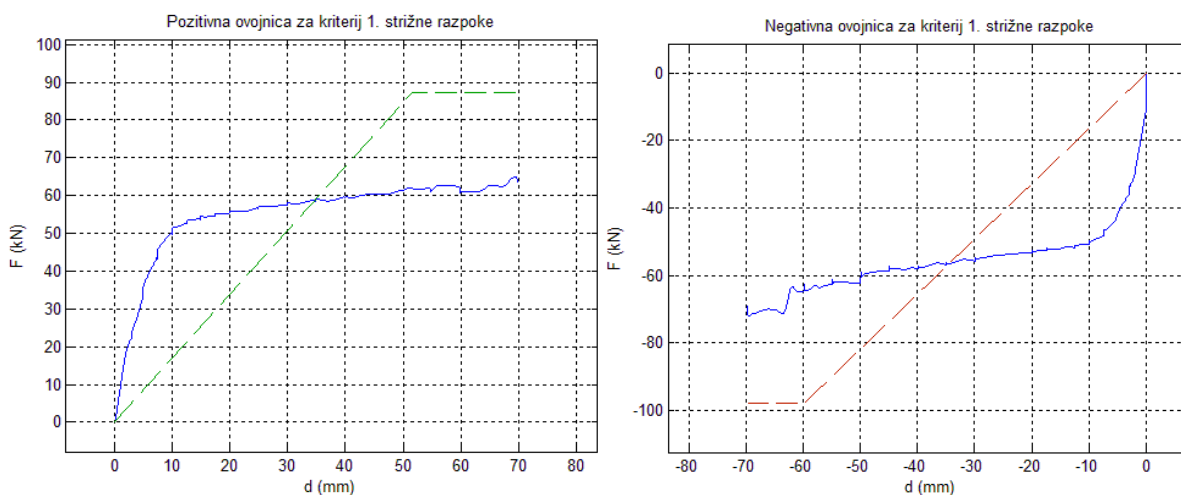
Slika 4.5: Vse histerezne zanke za test 1-2



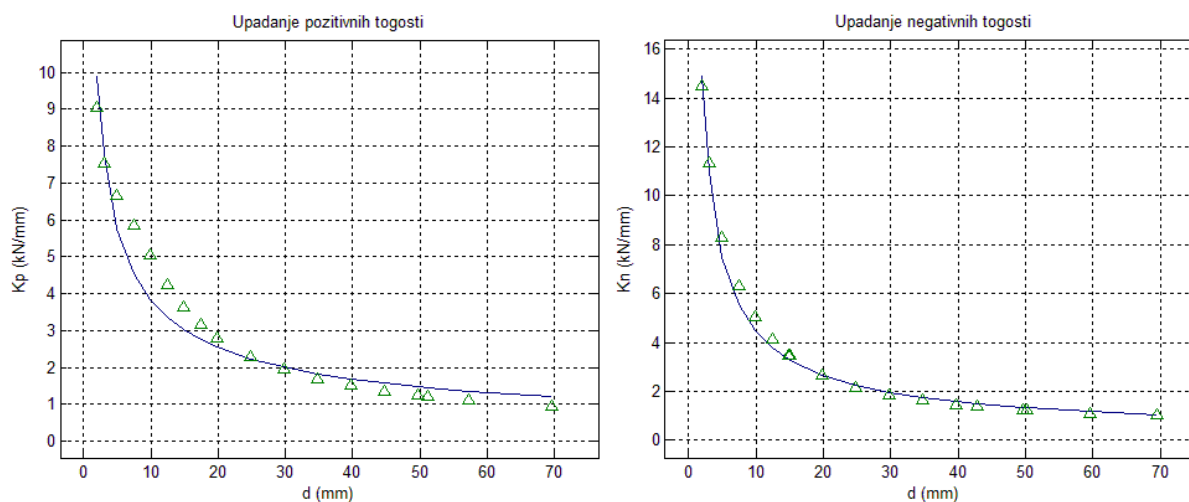
Slika 4.6: Ovojnice za test 1-2



Slika 4.7: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 1-2



Slika 4.8: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 1-2



Slika 4.9: Upadanje togosti za test 1-2

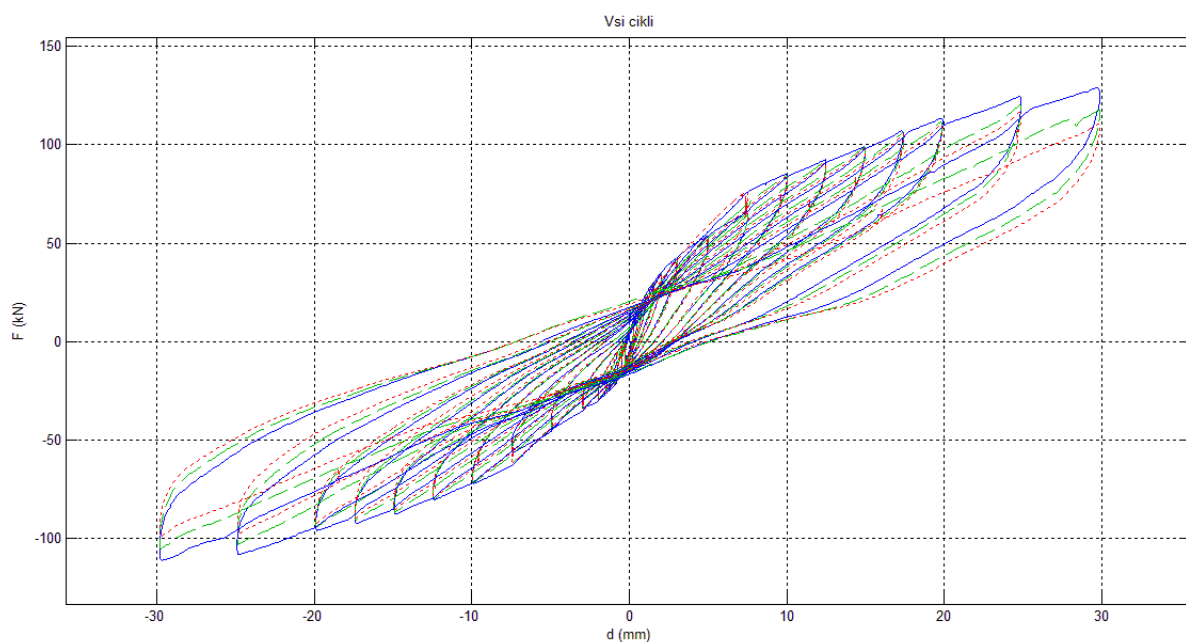


Slika 4.10: Porušitev zidu med zgornjima vrstama kamnov za test 1-2

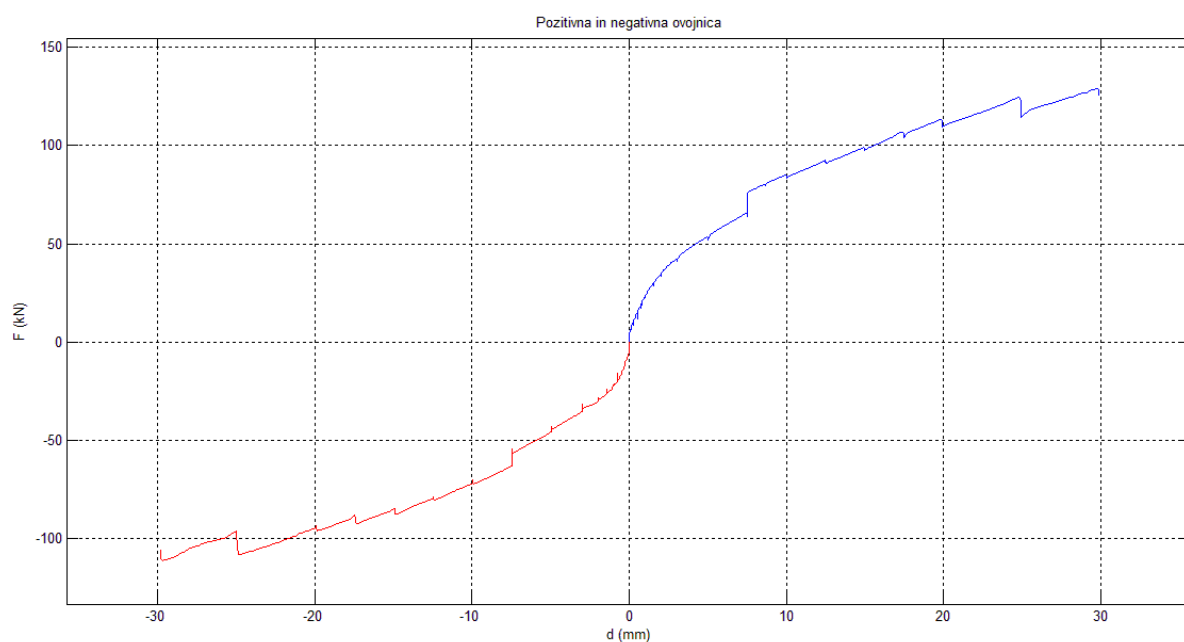


Slika 4.11: Detajlna slika porušitve zidu za test 1-2

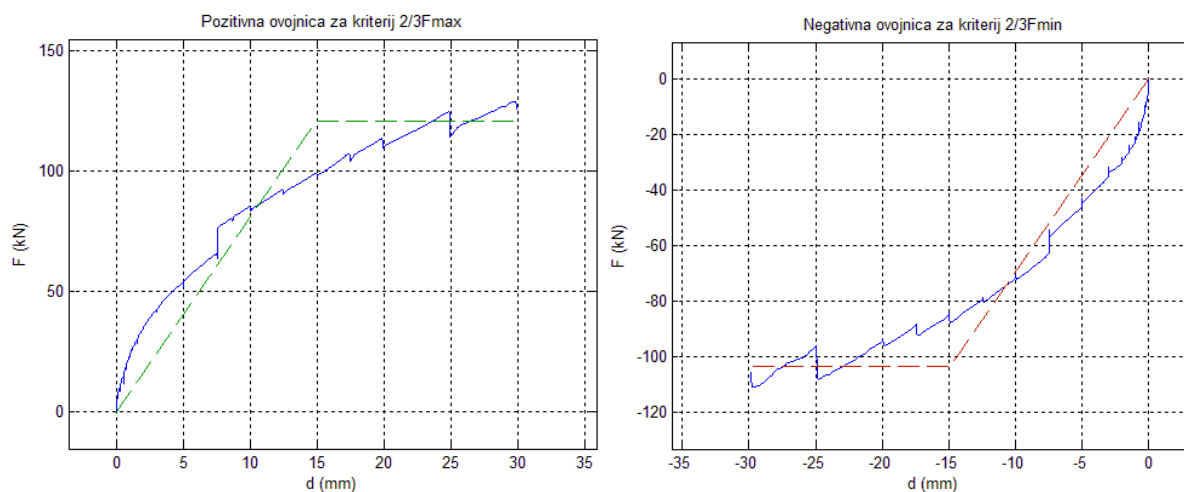
Grafi za test 4:



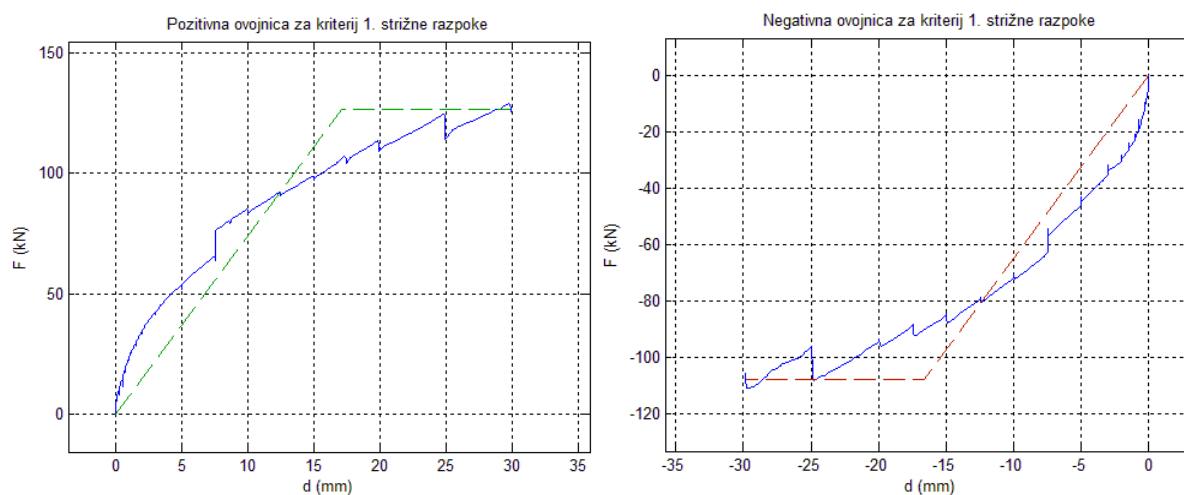
Slika 4.12: Vse histerezne zanke za test 4



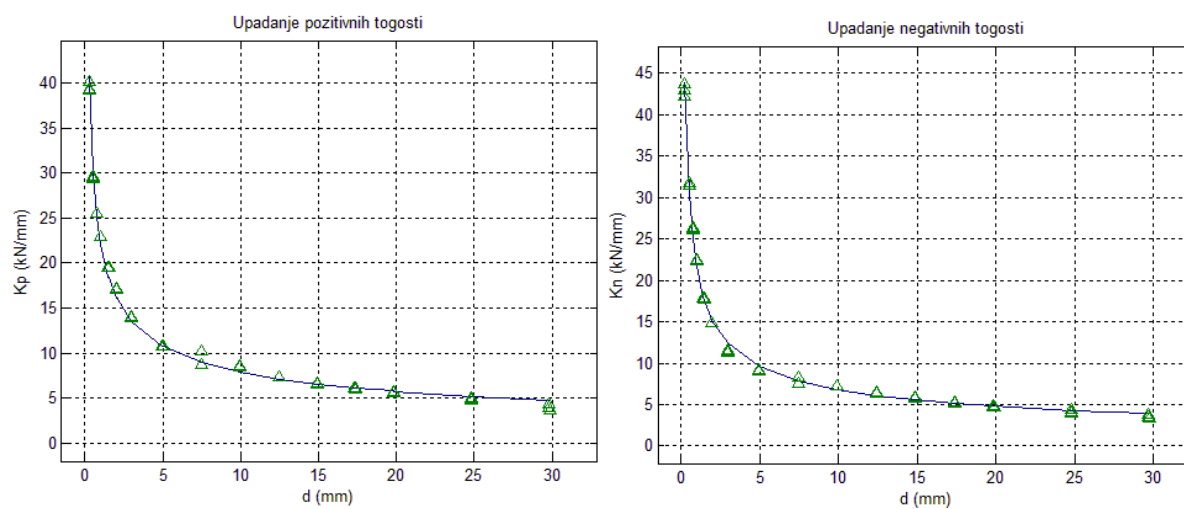
Slika 4.13: Ovojnice za test 4



Slika 4.14: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 4



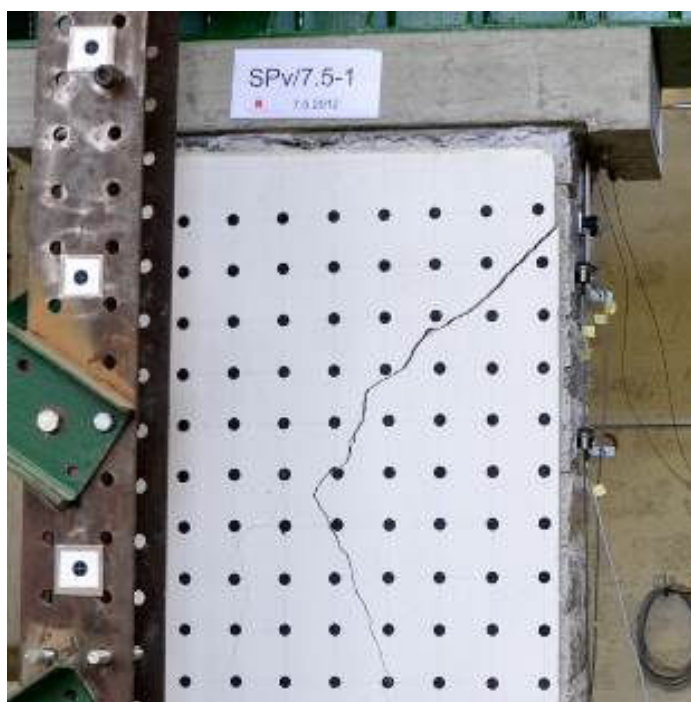
Slika 4.15: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 4



Slika 4.16: Upadanje togosti za test 4

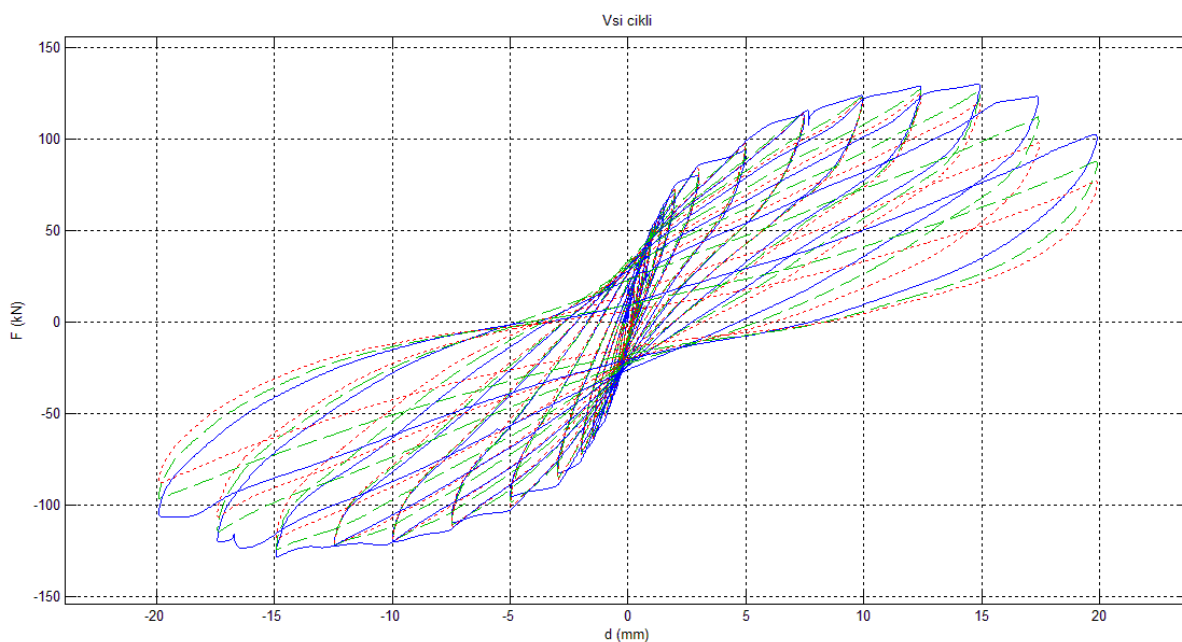


Slika 4.17: Strižna porušitev na obeh straneh zidu pri testu 4

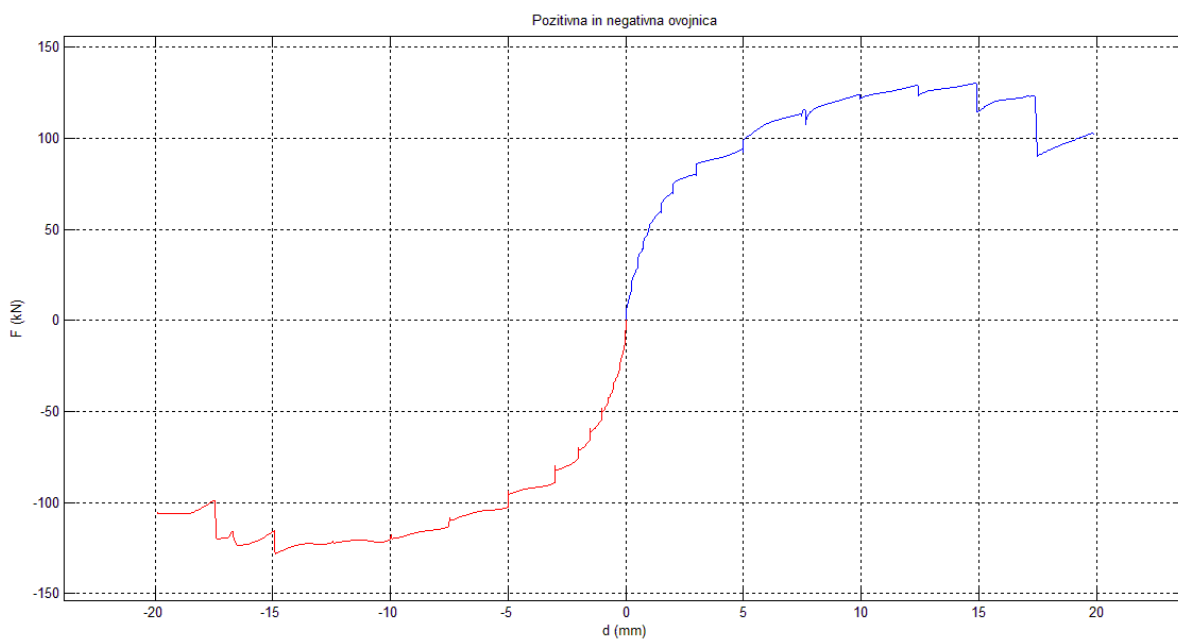


Slika 4.18: Razpokan omet na zidu pri testu 4

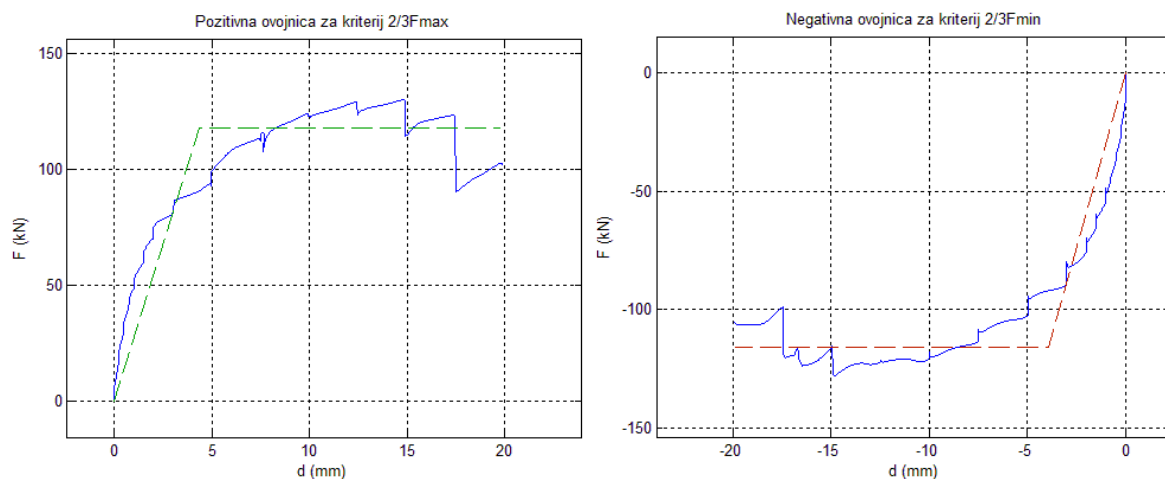
Grafi za test 7:



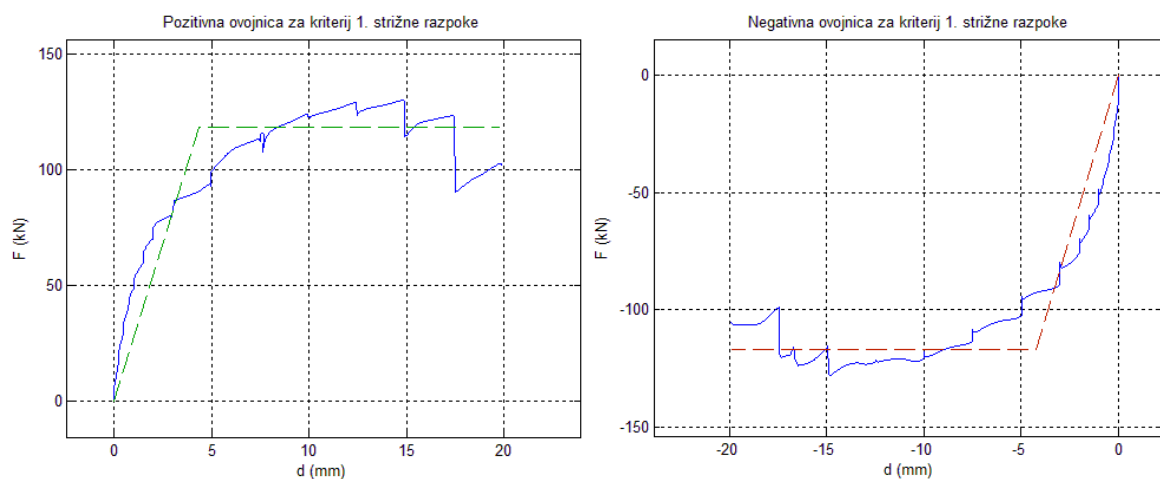
Slika 4.19: Vse histerezne zanke za test 7



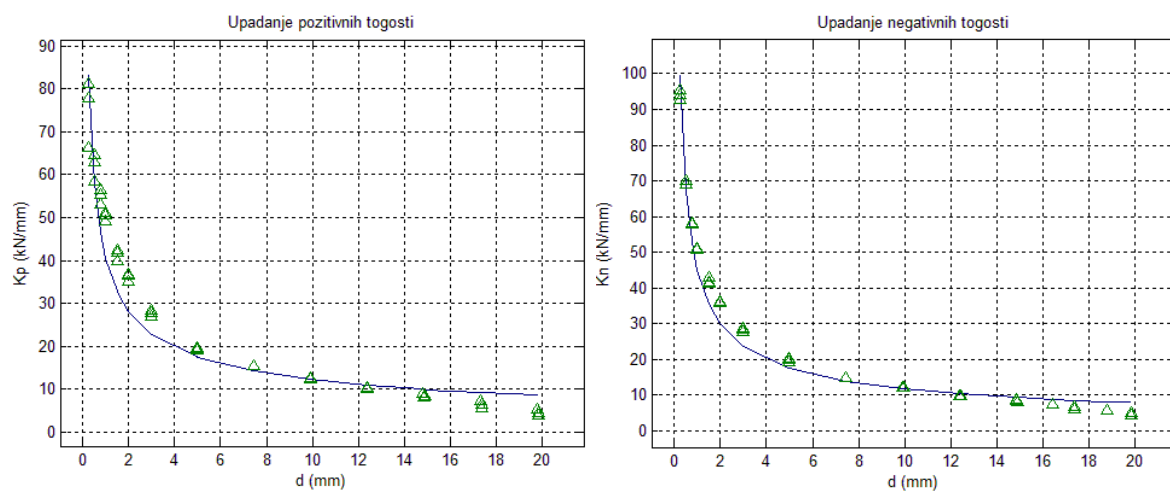
Slika 4.20: Ovojnice za test 7



Slika 4.21: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 7



Slika 4.22: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 7



Slika 4.23: Upadanje togosti za test 7

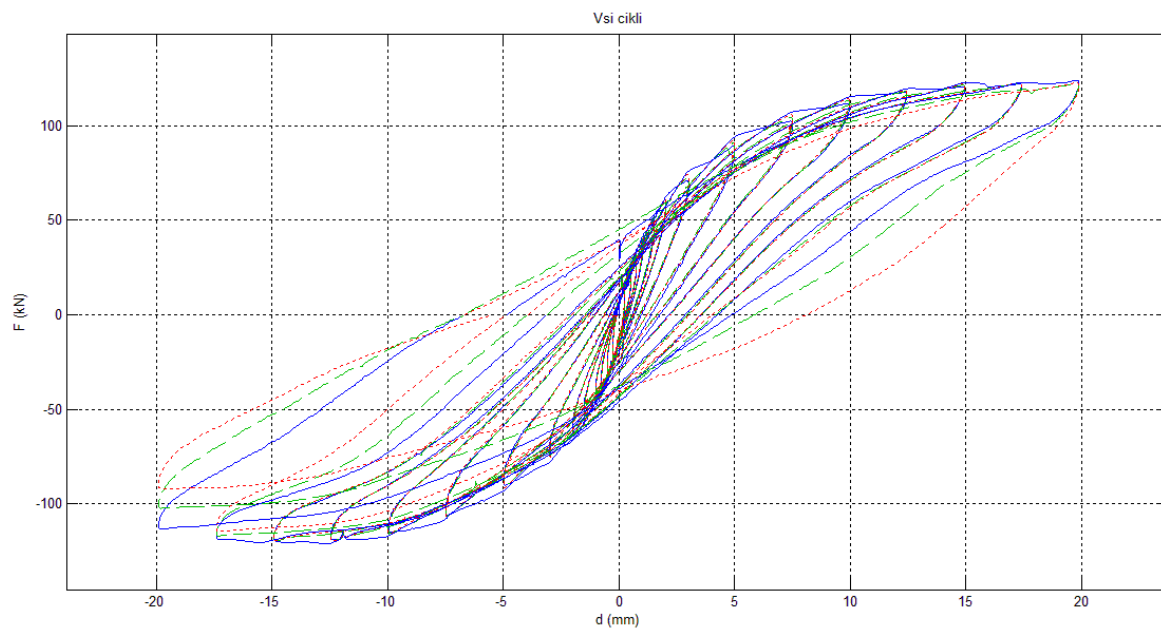


Slika 4.24: Strižna porušitev na obeh straneh zidu pri testu 7

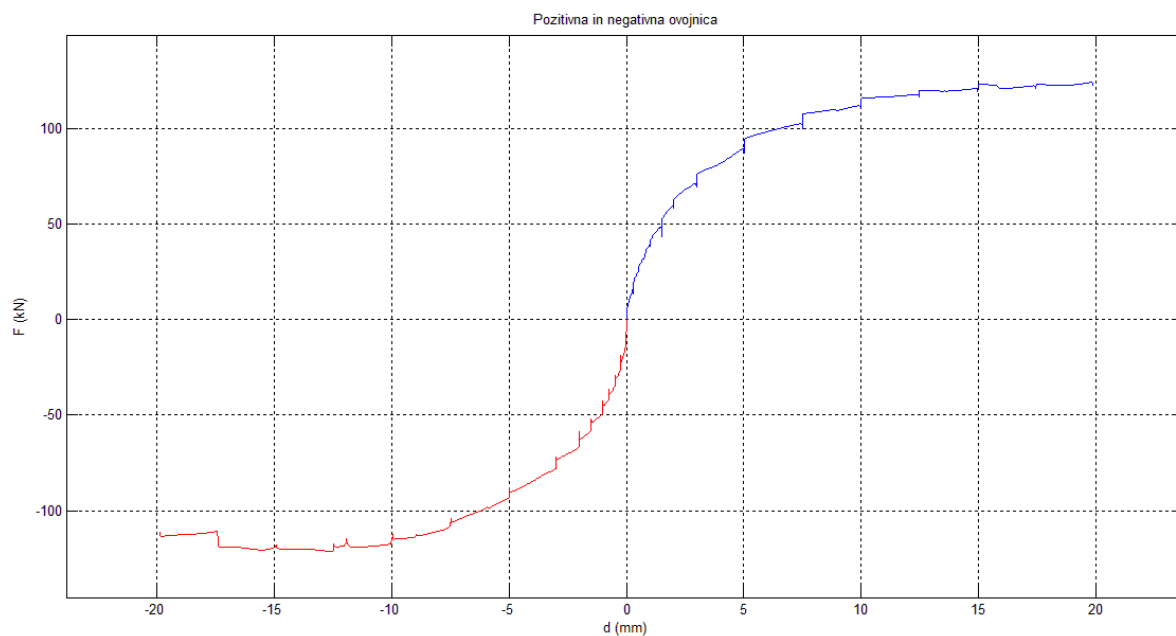


Slika 4.25: Odstopanje ometa od zidu pri testu 7

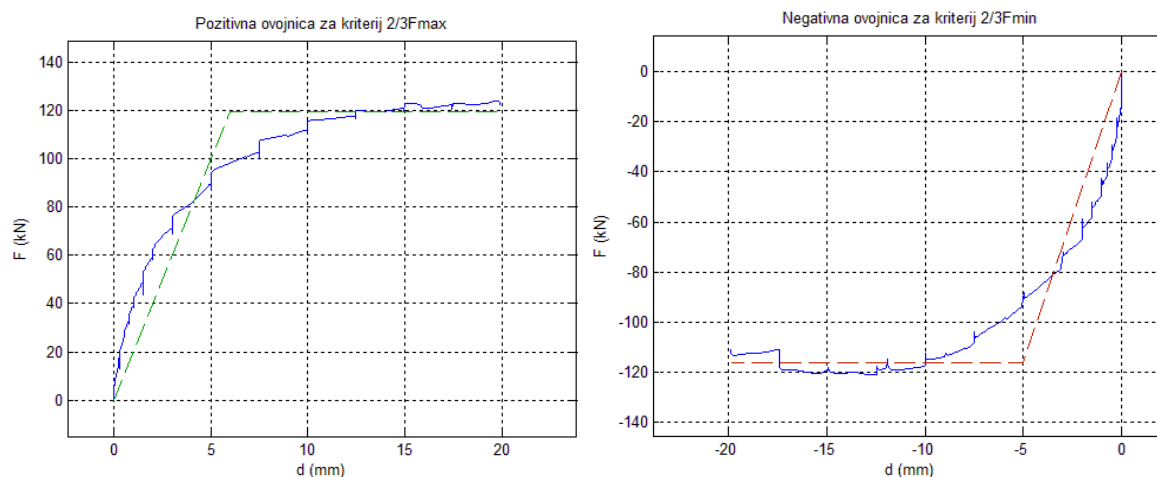
Grafi za test 13:



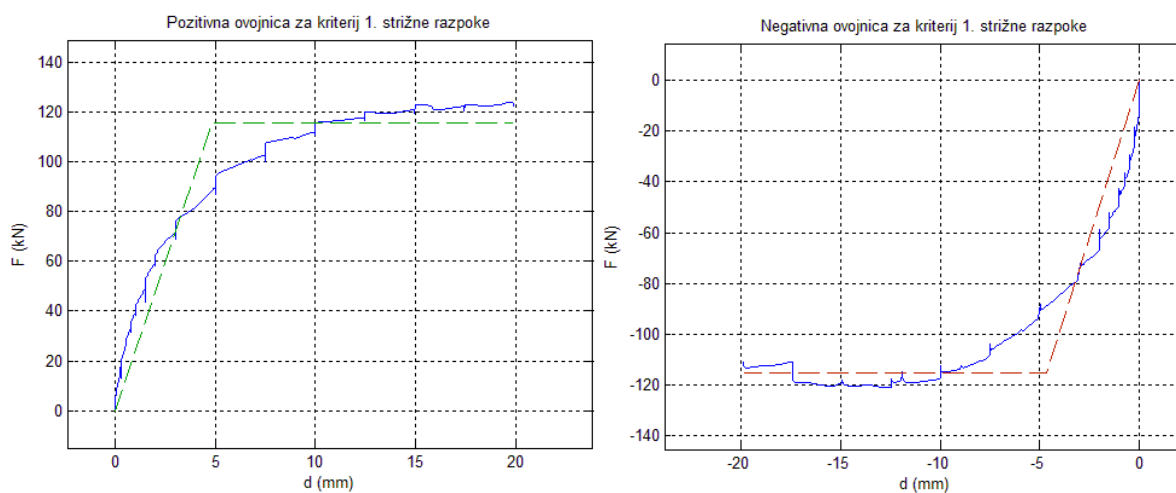
Slika 4.26: Vse histerezne zanke za test 13



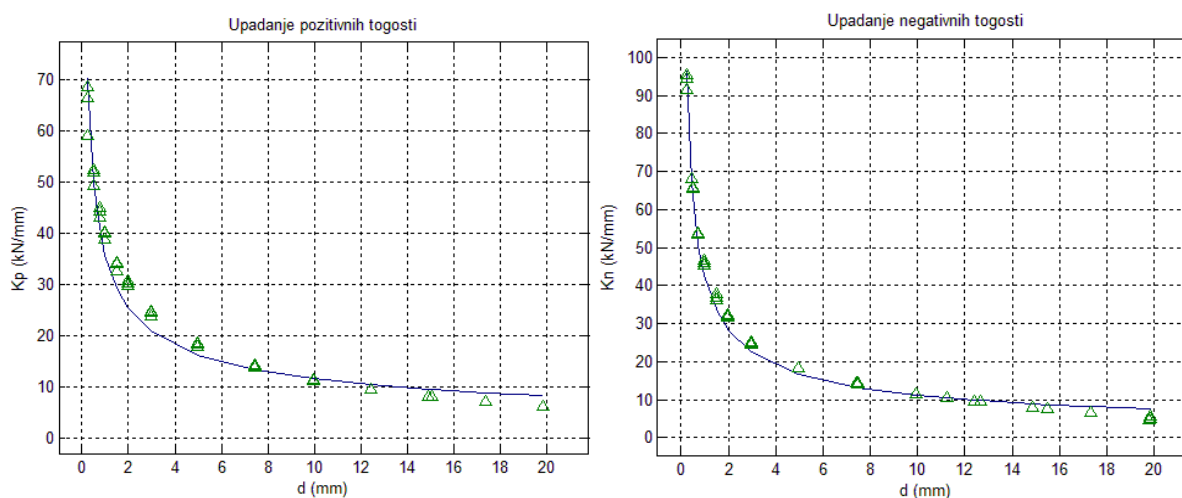
Slika 4.27: Ovojnice za test 13



Slika 4.28: Idealizaciji po kriteriju maksimalne sile za test 13



Slika 4.29: Idealizaciji po kriteriju 1. strižne razpoke za test 13



Slika 4.30: Upadanje togosti za test 13

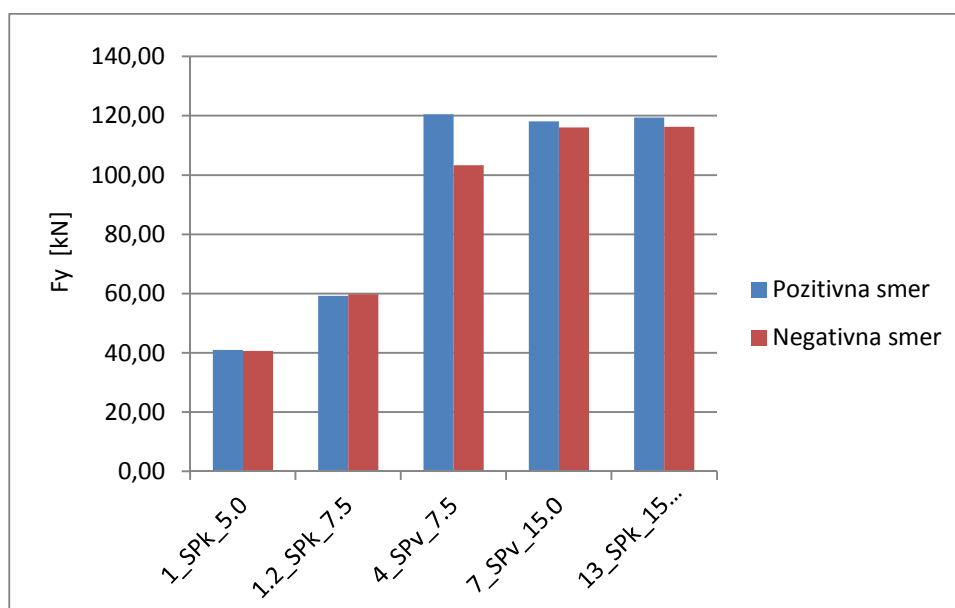


Slika 4.31: Strižna diagonalna porušitev zidu pri testu 13

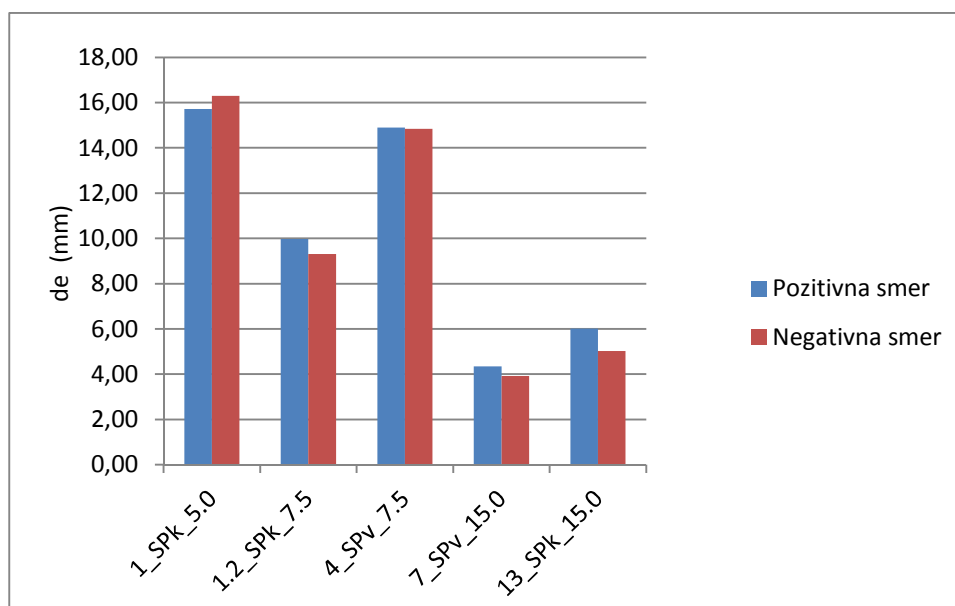


Slika 4.32: Razpoka v srednji ravnini zidu pri testu 13

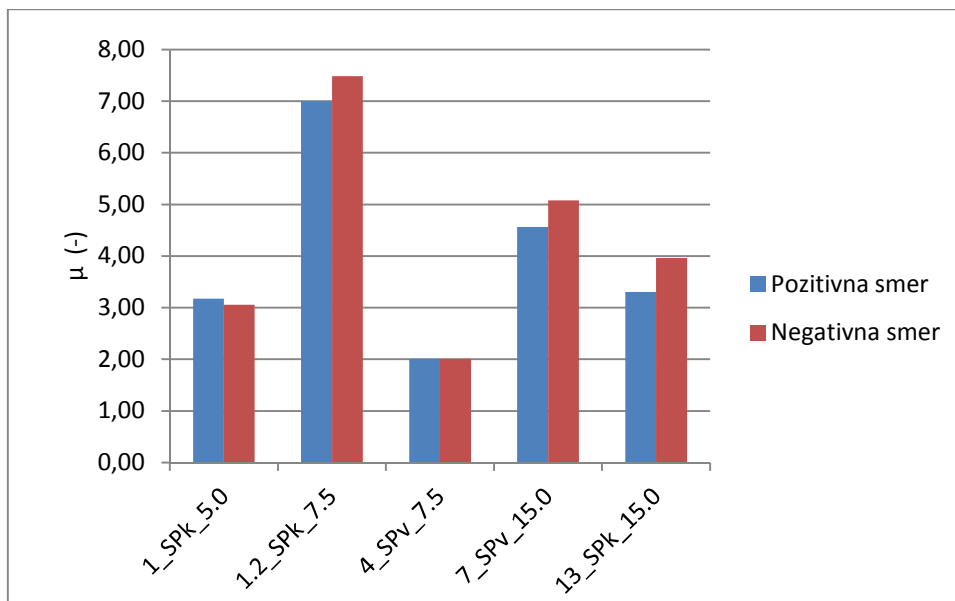
Sedaj primerjajmo dobljene karakteristike zidov ob idealizaciji njihovega histereznega obnašanja. V oznaki testa zadnja številka predstavlja nivo predkompresije. Nivo predkompresije izražamo v % tlačne trdnosti zidu, ki smo jo dobili iz tlačnih preiskav in je znašala 6 MPa. Prva črka (S) pove, da gre za strižni test, druga, da gre za povezani zid (P), zadnja pa način vpetja; (k) pomeni konzolno vpetje, kjer je bil na spodnjem robu sproščen zasuk, (v) kot vpeto pa predstavlja fiksno vpeti rotaciji na obeh koncih.



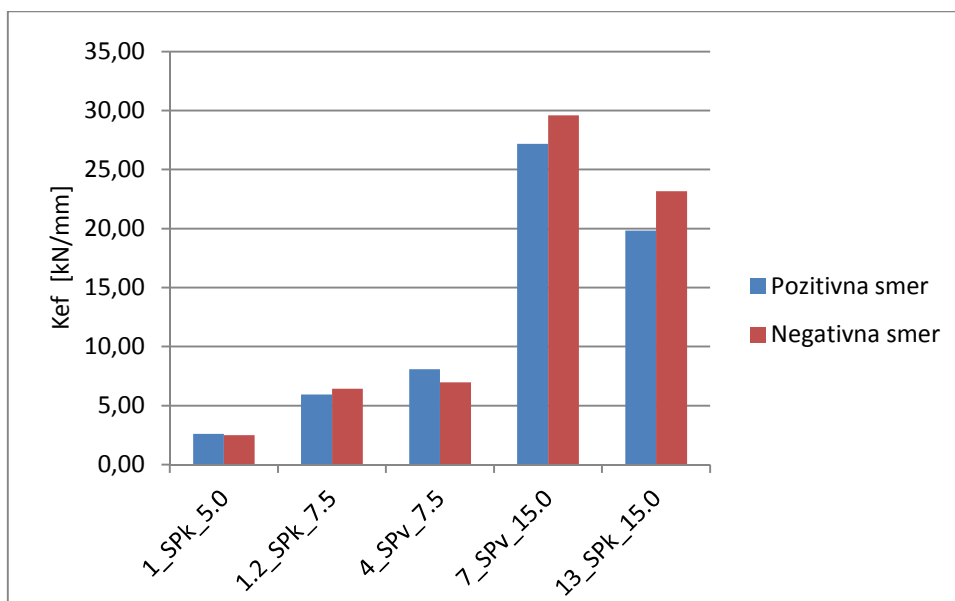
Grafikon 4.1: Nosilnosti zidov iz idealiziranih diagramov



Grafikon 4.2: Elastični pomiki zidov iz idealiziranih diagramov



Grafikon 4.3: Duktilnost zidov iz idealiziranih diagramov



Grafikon 4.4: Togosti zidov iz idealiziranih diagramov

Za vse teste na splošno opazimo, da se mehanski parametri pri posameznem testu ne razlikujejo veliko za pozitivno in negativno smer obremenjevanja. Razlika nastane zato, ker zid po vsakem obremenjevanju, prejme nekaj mehanske energije, ki delno povzroči tudi plastične deformacije, ki spremenijo mehanske karakteristike. Zato se nato v drugo smer vede nekoliko drugače.

4.1 Različna robna pogoja

Za primerjavo med robnima pogojema si izberemo testa 7 in 13, saj imata oba enako stopnjo predkompresije 15%. Pri testu 7 smo imeli na spodnjem robu zida preprečen zasuk, pri testu 13 pa je bil mogoč. Iz grafikona 4.1 vidimo, da sta nosilnosti za ta primer idealizacij zelo podobni, v obeh smereh obremenjevanja. Pri obeh testih opazimo, da je pozitivna nosilnost za malenkost večja od negativne. Se pa nekoliko bolj razlikujeta elastična pomika. Na grafikonu 4.2 je vidno, da je dosežen elastični pomik 6 mm pri omogočenem zasuku, pri fiksnem vpetju pa le 4mm. To seveda nista dejanska pomika, saj smo ju dobili iz idealiziranega diagrama, zato ne moramo zagotovo sklepati, da rezultata kažeta na to, da zid pri sproščeni podpori doseže manjšo togost, kar bi bilo za pričakovati. Idealizaciji si lahko ogledamo grafično (Slika 4.17, Slika 4.22), dejanski odziv obeh zidov pa vidimo na slikah vseh histereznih zank (Slika 4.15, Slika 4.20) in na njunih ovojnica (Slika 4.16, Slika 4.21). Vidimo tudi, da je pri obeh testih prišlo do mehanizma strižne porušitve (Slika 4.24, Slika 4.31).

Poglejmo si še duktilnosti na grafikonu 4.3. Ker je duktilnost pri testu 7 nekoliko večja kot pri testu 13, za elastična pomika pa velja ravno obratno, sklepamo, da smo pri obeh testih prišli do približno enakega končnega pomika. Pri obeh testih smo zidova obremenjevali do 20mm. Če ob upoštevanju enakih nosilnosti in končnih pomikov idealizacij, primerjamo elastična pomika, vidimo, da pri testu 7, kjer je elastični pomik manjši, dobimo večjo površino pod idealiziranim diagramom. Ta površina pa mora biti enaka površini diagrama pod ovojnicjo. Večja površina pod ovojnicjo pa kaže na več vnesene energije oz. na večjo efektivno togost.

Logična predpostavka bi sedaj bila, da je zid pri testu 7 dosegel tudi večjo strižno togost zaradi bolj togega vpetja. Če pogledamo grafikon 4.4, vidimo, da je tudi temu tako. Zaradi istih nosilnosti in istih končnih pomikov sta togosti sedaj po medsebojni primerjavi ravno obratno veliki, kot elastična pomika. Manjši elastični pomik pomeni torej večjo strižno togost.

4.2 Nivoji predkompresije

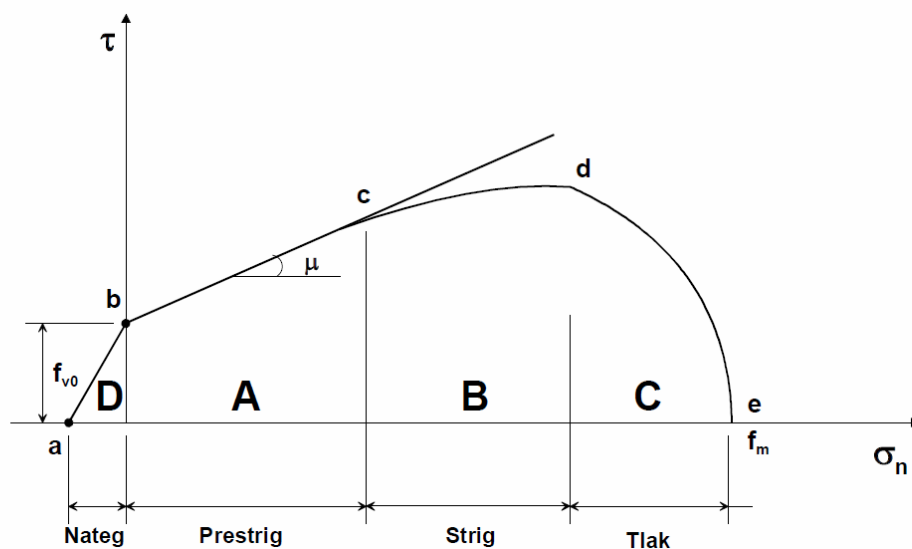
Med sabo bomo najprej primerjali testa 4 in 7, pri katerih je bil na spodnjem robu preprečen zasuk. Nato pa bomo še primerjali testa 1 in 13, ki pa imata sproščen zasuk na spodnjem robu. Pri prvi primerjavi imamo za test 4 nivo predkompresije 7.5%, za test 7 pa 15%. Vidimo, da

smo pri obeh testih dosegli nosilnost, ki je nekoliko manjša od 120 kN. Le v negativni smeri pri testu 4 dobimo nosilnost okrog 100 kN. To se vidi tudi na slikah idealizacij (Slika 4.17, Slika 4.12). Taka odstopanja so pri eksperimentih običajna in so posledica predvsem različnih poškodb pri obremenjevanju. Kljub temu lahko sklepamo, da sta nosilnosti zidov približno enaki. Je pa zato toliko večja razlika pri elastičnem pomiku, ki znaša za test 4 okoli 15 mm, za test 7 pa le 4 mm. Za primerjavo lahko pogledamo tudi ovojnici testov (Slika 4.11, Slika 4.16). Duktilnosti sta tudi tokrat primerjano s pomikoma obratni po velikosti. Za test 4 dobimo duktilnost 2, za test 7 pa okrog 4.5. Mejna računsko pomika imamo pri prvem testu 30 mm, pri drugem pa 18 mm. Dejansko smo pri testih obremenjevali do pomikov 30 mm in 20 mm. Vidimo, da smo lahko pri testu z dvakrat nižjim nivojem predkompresije obremenjevali do pomika, ki je za tretjino daljši. V obeh primerih je prišlo do strižne porušitve, kjer so razpoke večinoma potekale po stikih diagonalno v obeh smereh, nekaj pa jih je nastalo tudi v kamnih (Slika 4.17, Slika 4.24).

Večji nivo predkompresije pomeni večje normalne tlačne napetosti v zidu. Končno nosilnost zida smo torej pri večjih tlačnih napetostih dosegli pri manjšem končnem pomiku, kar kaže na to, da nivo predkompresije, vpliva na sposobnost deformiranja zida v plastičnem območju. Vidimo tudi, da se je pri večjih tlačnih obremenitvah zid sposoben manj deformirati. Iz grafikona 4.4 opazimo tudi, da je zid, ki je bil dvakrat bolj tlačno obremenjen, dosegel tudi dvakrat večjo strižno togost. Iz tega lahko sklepamo, da je povezava med strižnimi in tlačnimi napetostmi taka, da večje tlačne napetosti povišajo tudi strižno togost zidu.

Poglejmo sedaj še primerjavo med testoma 1 in 13. Pri prvem smo imeli nivo predkompresije le 5%, pri drugem pa 15%. Za prvi test dobimo nosilnost 40 kN, ki je dokaj nizka, pri drugem pa nosilnost 120 kN, podobno kot pri prejšnjih dveh primerjanih testih. Vidimo, da tudi pri konzolnem vpetju večji nivo tlačnih napetosti, da tudi večjo strižno nosilnost zidu. Ker smo predkompresijo bistveno povečali, se je tudi nosilnost znatno povečala.

Dejansko se zidovi na strižne obremenitve odzivajo različno v različnih območjih nivojev tlačnih obremenitev. Na spodnji sliki je prikazana ovojnica strižnega obnašanja za 4 različna območja strižnega obnašanja zidu.



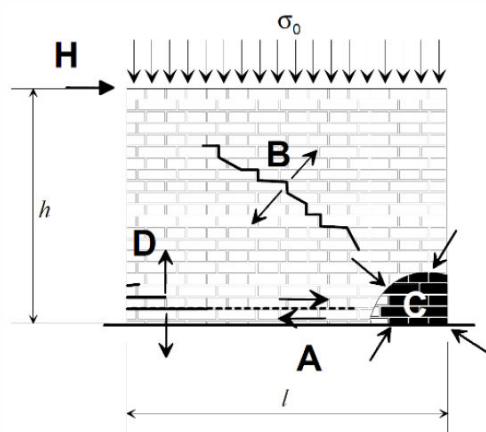
Slika 4.33: Ovojnica strižnega obnašanja zidu v odvisnosti od nivoja tlačnih obremenitev
(Bosiljkov in sod., 2010a)

Analizirajmo strižni odziv prikazan na diagramu. V območju D, kjer imamo natezne normalne napetosti v zidu, vidimo, da je nosilnost zidu, dosežena že pri nizkih strižnih obremenitvah. Tudi sama natezna nosilnost zidu ni velika. Točka *a* na grafu predstavlja natezno nosilnost zidu, točka *b* pa začetno strižno nosilnost zidu, ki je določena pri 0-tih normalnih obremenitvah. Naslednje je območje A, kjer imamo nizke tlačne napetosti v zidu. Tu strižna nosilnost linearno narašča z enakomernim večanjem tlačnih obremenitev. Odnos med strižno nosilnostjo in tlačno napetostjo je določen s kotom μ . V točki *c* dosežemo mejni nivo tlačnih napetosti, do katerega je ta odnos linearen. Če sedaj povečujemo tlačne napetosti pridemo v območje B, kjer odnos postane nelinearen in se ob večanju tlačnih napetosti v zidu strižna nosilnost vedno manj povečuje. V točki *d* dosežemo maksimalno strižno nosilnost, ki jo zid premore. Za točko *d*, nastopi območje C, kjer začnejo za porušitev postajati kritične tlačne napetosti in strižna nosilnost hitro upada z večanjem tlaka. V točki *e* dobimo maksimalno tlačno nosilnost zidu pri 0-tih strižnih obremenitvah.

4.3 Porušni mehanizmi

Primerjajmo sedaj vse teste skupaj. Če pogledamo grafikon 4.1, vidimo pri testu 1, da pri nizki predkompresiji dobimo tudi nizko nosilnost ob konzolnem vpetju. Če sedaj nivo tlačnih

napetosti povečamo iz 5% na 7,5%, torej za eno tretjino, se nam tudi nosilnost poveča iz 40 kN na 60 kN, kar je tudi za eno tretjino, ob istem konzolnem vpetju. Zavedati se moramo, da so to nosilnosti idealiziranega diagrama, in se dejanski nosilnosti razlikujeta za nekoliko različno razmerje. Enakost razmerij kaže na to, da smo še vedno v linearnem območju D oziroma A. Za oba primera testov dobimo enak upogibni način porušitev, kjer se stik med zgornjima dvema vrstama kamnov odpre (Slika 4.10, Slika 4.11). Ta način porušitve je na spodnji sliki za porušne mehanizme označen s črko D. Črke za porušne mehanizme na tej sliki sovpadajo s črkami za območja strižnih odzivov na prejšnji sliki za ovojnico strižnega obnašanja zidu.



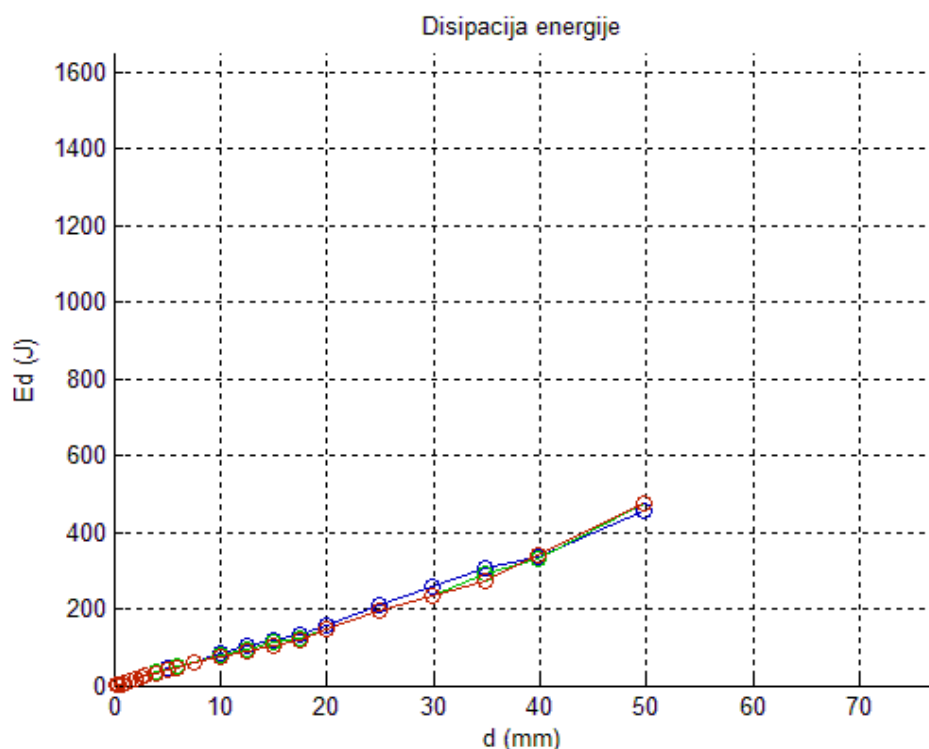
Slika 4.34: Mehanizmi porušitve za zidove, obremenjene v ravlini (Bosiljkov in sod., 2010b)

Če sedaj pri vpetju preprečimo zasuk in ohranimo isti nivo tlačnih napetosti v zidu, pa se nam nosilnost naenkrat za faktor 2 poveča. Vidimo, da na nosilnost lahko tudi bistveno vpliva način vpetja. Spremeni se tudi način porušitve. Iz dejanske slike porušitve (Slika 4.17) je razvidno, da dobimo strižni porušni mehanizem, za katerega so značilne diagonalne strižne razpoke. Dobili smo jih v obeh smereh, ker smo v obe smeri obremenjevali zid. Tak način obremenjevanja je zelo značilen za potrese. Mehanizem je na zgornji sliki označen s črko B. Iz opisanega je razvidno, da lahko način vpetja odloči o tem, kakšen porušni mehanizem se pri obremenjevanju vzpostavi. Podvojimo sedaj nivo predkompresije in ohranimo vpetost. Nosilnost se pri tem skoraj ne spremeni. Lahko bi rekli, da se gibljemo nekje v območju B, kjer ima ovojnica za naš primer vpetosti in vrste zidu dokaj blagi naklon. Tudi strižni mehanizem porušitve ostane isti (Slika 4.24). Poglejmo še zadnji test, ki ima tudi visok nivo

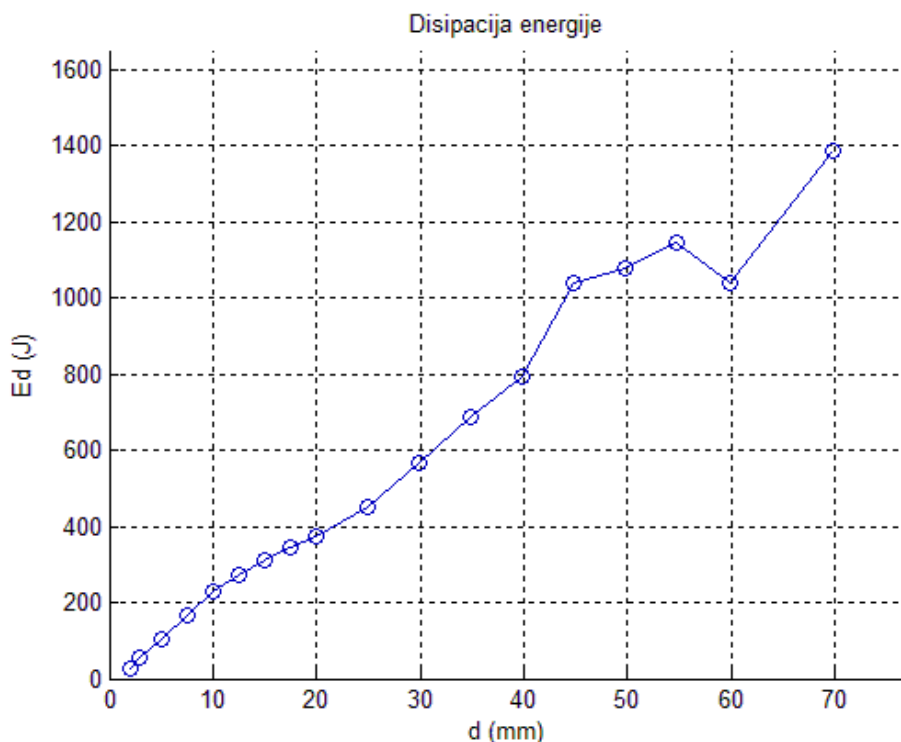
predkompresije 15%, vendar ima konzolni način vpetja. Nosilnost se bistveno ne spremeni. Ponovno se vzpostavi strižni porušni mehanizem (Slika 4.31). Sedaj vidimo, da ne glede na to, da imamo pri visokem nivoju predkompresije enkrat konzolno vpetje, drugič pa preprečen zasuk, se zid odzove na enak način. Iz tega lahko sklepamo, da ima način vpetja, le v določenem območju nivoja predkompresije vpliv na odziv zidu. To območje je bilo pri nas pri 7.5% vertikalne predkompresije.

4.4 Disipacija energije po posameznem ciklu

Sedaj, ko smo dobili predstavo o porušnih mehanizmih zidov in o pogojih, ki so potrebni, da se vzpostavi določen mehanizem, ilustrirajmo še to dogajanje s pomočjo disipacije energije. Za vsak test lahko poračunamo površino posameznih histereznih zank in jih narišemo v odvisnosti od pripadajočih amplitudnih pomikov. Začnimo s prvima dvema testoma (Grafikon 4.5, Grafikon 4.6).



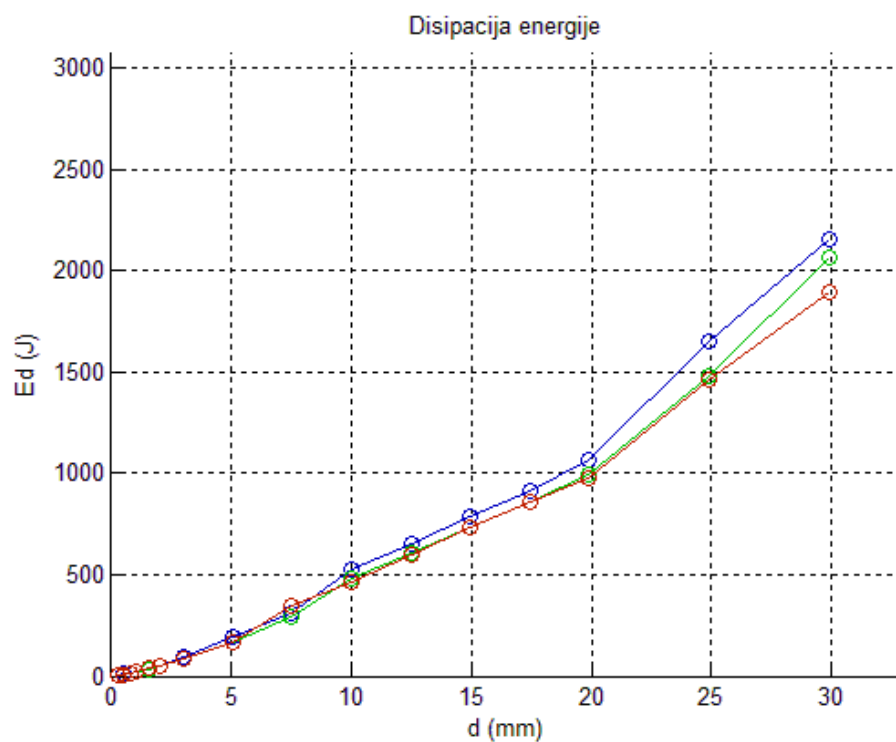
Grafikon 4.5: Disipacija energije za test 1



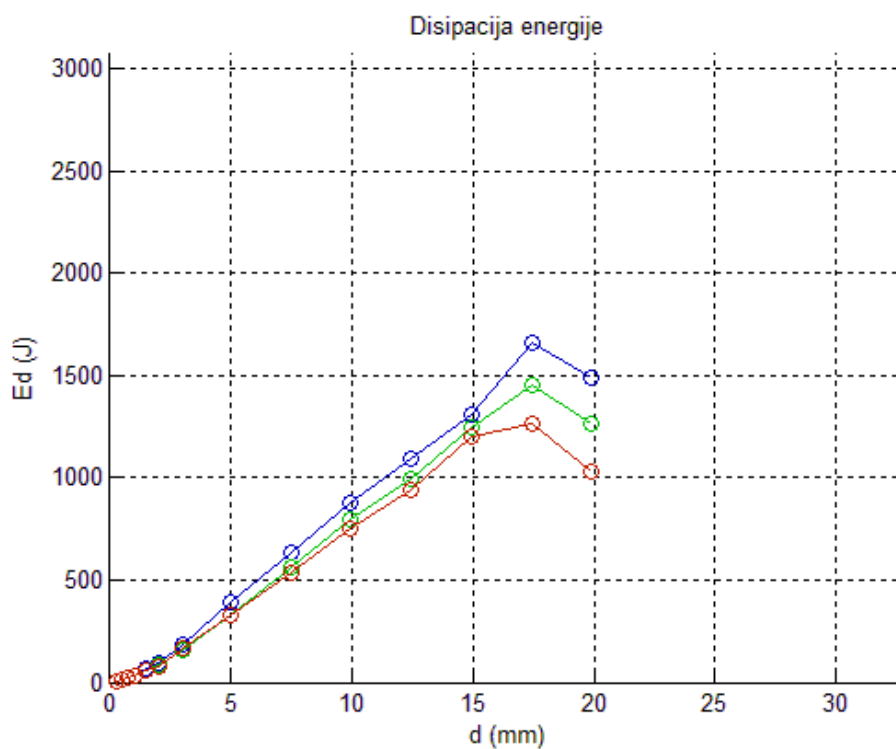
Grafikon 4.6: Disipacija energije za test 1-2

Na grafikonu 4.5 imamo 3 krivulje. Modra predstavlja prvo zanko pri obremenjevanju, zelena in rdeča pa drugo in tretjo. Na grafikonu 4.6 pa imamo samo eno krivuljo, ker smo pri tem testu za vsak amplitudni pomik le enkrat zid obremenili. Grafikon sta opremljena z enakima intervaloma na abscisni in ordinatni osi. Pri testu 1 vidimo dokaj linearni potek disipacije in pri pomiku 50 mm pridemo do slabih 500 J disipirane energije. Če primerjamo to vrednost sedaj z vrednostjo na grafikonu 4.6 za test 1-2, vidimo, da smo za isti pomik prišli do 1100 J disipirane energije. Pri obeh testih se je pojavil mehanizem, ko se zgornji dve vrsti kamnov na stiku razcepita. Ker imata oba zidova isto vpetje, si razliko v energiji lahko razlagamo z večjo stopnjo predkompresije testa 1-2 in z dejstvom, da se je oblikovala nekoliko drugačna porušitev. Za razliko od testa 1 se je tu pojavilo nekaj strižnih razpok.

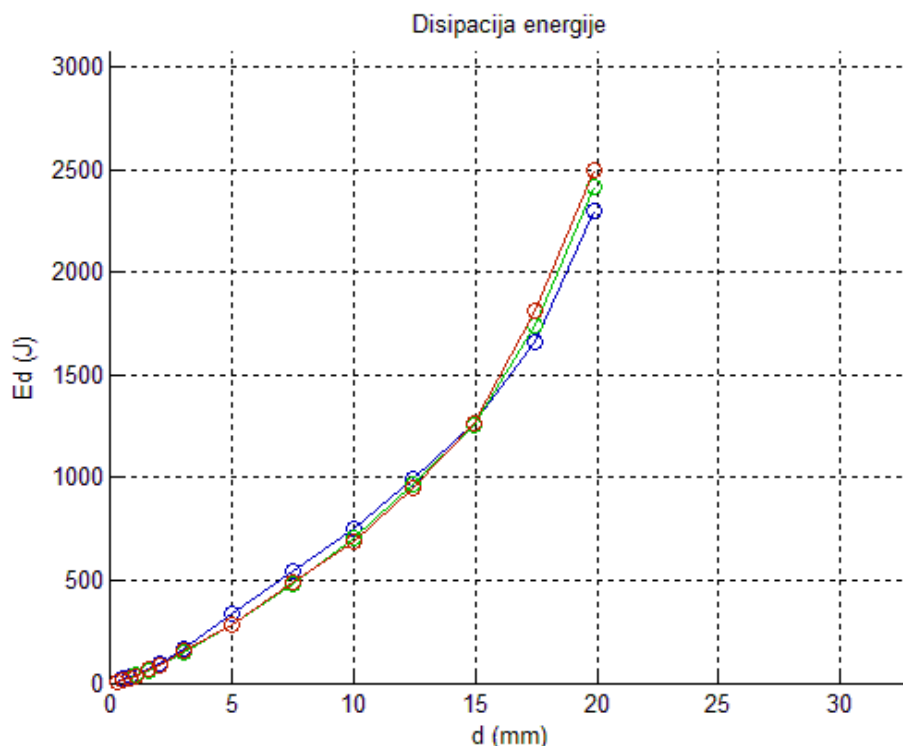
Poglejmo še ostale tri teste. Ker so se pri njih vzpostavili strižni porušni mehanizmi, smo prišli do bistveno manjših končnih pomikov, zato pri teh testih pomanjšajmo nekoliko skalo za pomik na abscisni osi. Ker so disipirane energije bistveno večje, zgornjo mejo na ordinatni osi povečamo. Disipacije so prikazane na naslednjih treh grafikonih.



Grafikon 4.7: Disipacija energije za test 4



Grafikon 4.8: Disipacija energije za test 7



Grafikon 4.9: Disipacija energije za test 13

Takoj na začetku opazimo, da dosežemo pri teh testih veliko večje energije, kot pri prejšnjih dveh. Tu dobimo za pomik 20 mm 2000, 1500 in 2500 J energije. Pri testih 1 in 1-2 pa dobimo pri 20 mm le 180 in 400 J. Ker se je pri vseh zadnjih 3 testih razvil strižni porušni mehanizem, sklepamo, da se pri tem porušnem mehanizmu za območje B absorbira veliko več energije kot pri porušnem mehanizmu za območje D.

Opazimo še, da se pri zadnjih treh testih disipirane energije dokaj razlikujejo med sabo. Pri testu 4 imamo predkompresijo 7.5%, pri testu 7 pa smo jo povečali na 15% in se je končna disipirana energija povečala iz 750 J na 1250 J energije. Togost se je pri tem bistveno povečala iz približno 7.5 kN/mm na 27.5 kN/mm. Zato tudi pridemo pri testu 4 do 30 mm končnega pomika, pri testu 7 pa le do 20 mm, ker se pri tem testu, veliko energije že prej absorbira. Sklepamo torej, da povečanje tlačnih napetosti dviguje tudi sposobnost disipacije energije. Kar je logično, saj smo v poglavju 4.2 na diagramu strižnega obnašanja zidu videli, da večje tlačne obremenitve, povečajo strižno nosilnost zidu. V tem poglavju pa smo ugotovili, da ta posledično poveča sposobnost disipacije energije preizkušanca.

Če sedaj še primerjamo test 13 s testom 7, vidimo, da se, ko sprostimo zasuk ob vpetju zida pri istem visokem nivoju predkompresije, absorbirana energija do določene točke ne spremeni. Zid pri pomiku 15 mm v obeh testih absorbira okoli 1250 J energije. Se pa spremeni odziv zidu v končnem območju pomikov. Od 15 mm do končnega pomika 20 mm disipirana energija pri vpetem zidu začne padati in doseže maksimum 1500 J. Pri zidu, kjer smo sprostili pomik, se pa disipirana energija še naprej povečuje in naraste na koncu do 2500 J, kar je bistveno več kot pri testu 7. Efektivna togost pri tem nekoliko pade iz približno 28 kN/mm na 22 kN/mm. Tudi duktilnost nekoliko pade iz 4.5 na 3.5. Nosilnosti v obeh smereh pa ostaneta isti. Elastični pomik idealizacije, pa se celo poveča iz povprečno 4 na 5.5 mm.

Sedaj lahko vidimo, kakšno uporabno vrednost ima način vpetja. Če dosežemo dovolj visok nivo tlačnih napetosti v zidu, lahko s sprostitvijo zasuka ob podpori, absorbiramo veliko več energije v končnem plastičnem območju. Zid pri tem le malo izgubi na togosti in duktilnosti, nosilnost ostane ista, elastično območje idealiziranega diagrama pa se pri tem celo razširi. Kar je ugodno, saj pri zmernih potresih, tako zid še vedno lahko ohranimo v elastičnem območju in je objekt še naprej primeren za uporabo. In to je bistvo potresnega projektiranja konstrukcij. Da s preišljenim statičnim sistemom in konstrukcijskimi ukrepi, dosežemo dober odziv objekta, ki je zmožen absorbirati čim več energije, ki jo dovajajo potresni sunki.

5 ZAKLJUČEK

Moje delo v laboratoriju je trajalo skupaj 3 mesece povprečno po 8 ur na dan. Po opravljenem laboratorijskem delu je prišla na vrsto obdelava podatkov, za katero sta mi bili dani možnosti ročne obdelave podatkov ali programske. Odločil sem se za splošno programsko obdelavo, saj nam tako ostane program, ki pride prav tudi pri obdelavi rezultatov bodočih testov.

Program, ki sem ga razvil, zmore iz podatkov v Excelovih datotekah za določen test določiti vektorje za vsako histerežno zanko posebej in jih smiselno razporediti v matrike, kjer lahko uporabnik enostavno do njih dostopa. Pri tem upošteva vse motnje in se jim učinkovito ogne pri obdelavi podatkov. Poračuna nam računske amplitude in ponovitve za celoten test in preveri, če se te ujemajo s temi, ki jih je podal uporabnik. Izriše nam dejanski graf sile in pomikov v odvisnosti od časa. Izpiše nam število ciklov, ki smo jih opravili (en cikel v programu pomeni vse ponovitve za določen amplitudni pomik). Obvesti nas, če je bil zadnji cikel izločen, saj običajno predstavlja pomike, ki smo jih naredili, da smo zid na koncu potisnili v sredino. Izpiše nam tudi interpolacijsko natančnost pri izrisu grafa padanja togosti.

Vse ostale rezultate, kot računske amplitude in mehanske karakteristike ovojnic ter idealizacij, si lahko uporabnik sam prikliče ali pa si uredi izpis v datoteki za izpis rezultatov. Program nam še izriše vse histerezne zanke in pri tem isto pobarva in označi zanke za iste ponovitve. Izriše nam še obe ovojnici na eno sliko, ločeno pa nam izriše obe idealizaciji po obeh kriterijih. Na koncu še izriše upadanje togosti za obe smeri, krivulje disipirane energije tako, da posamezne zanke za isto ponovitev poveže s seboj in krivulje nato različno pobarva, ter še vse zanke za določen amplitudni pomik, ki ga uporabnik sam poda.

Program je napisan splošno, tako da zmore ob pravilnih nastavitvah ne glede na protokol obremenjevanja izračunati ter izrisati vse omenjene stvari. To pomeni, da lahko imamo za določen amplitudni pomik poljubno število ponovitev histereznih zank. Lahko se tudi število ponovitev spreminja tekom testa, tako da za različne amplitudne pomike izvedemo različno število ponovitev. Vse stvari se tako izračunajo po splošnih enačbah, ki predstavljajo osnovo za obdelavo testov cikličnega obremenjevanja zidanih konstrukcij.

Skupaj je celoten program nanese 973 vrstic, od katerih je bilo 865 vrstic programske kode, 108 vrstic pa uporabnih komentarjev k kodi. Kode je sprva nanese za več kot 1000 vrstic, vendar sem po celotnem pregledu programa nekaj kode na novo napisal v bolj strnjeni in učinkoviti obliki. Razlog za tako število vrstic, ki je nekoliko veliko glede na današnje sposobnosti programov, je tudi, da sem za določene izračune in izrise moral kodo napisati za vsako smer obremenjevanja posebej. Popolnoma kopirati se je ni dalo, saj je predznak, ki se za večino količin spremeni v drugi smeri, prinesel nekaj bistvenih sprememb pri označevanju elementov, pisanju pogojnih stavkov s neenačbami in zaporedju izvedenih zank. Na videz spremembe ni veliko, je pa bilo potrebnega toliko več tuhtanja pri prilagajanju kode.

Za moje delo sem potreboval skupaj približno 300 ur programiranja, ki sem jih opravil v 5 tednih. Večino znanja sem pridobil s 2 letnim prostovoljnim učenjem programiranja izven študijskih obveznosti, kjer sem se naučil uporabnih zvijač in možnosti, ki jih Matlab ponuja. Ob upoštevanju nekaj koristnega znanja še iz osnovnošolskih let, sem mnenja, da sem moral dati skozi veliko primerov iz praktičnega programiranja, da sem dosegel zadostno znanje, ki mi je omogočilo razviti opisani program v diplomu.

VIRI

Bosiljkov, V., Page, A.W., Bokan-Bosiljkov, V., Žarnić, R. 2010a. Evaluation of the seismic performance of brick masonry walls. Structural control & health monitoring, 2010. feb., letn. 17, št. 1, str. 100-118

Bosiljkov, V., Uranjek, M., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V. 2010b. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. Journal of cultural heritage, 11, 3: 239–249.

Čeru, A. 1996. Hispa - programsko orodje za analizo histereznega odziva konstrukcij, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 158 str.

Drysdale, R. G., Hamid, A. A., Baker, L. R. 1994. Masonry Structures – Behavior and Design. New Jersey, Prentice Hall: 784 str.

Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 550 str.

Hudobivnik, B. 2011. Eksperimentalne preiskave in numerična analiza opečnate zidovine, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 130 str.

Kareem, A., Gurley, K. 1996. Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 59: 131-157.

Kilar, V. 2004. Ocena potresne ogroženosti stanovanjskih stavb v Sloveniji. AR Arhitektura, raziskave. 2004/1: 62-65

McMahon, D. 2007. MATLAB Demystified, The McGraw-Hill companies: 326 str.

Tomaževič, M. 1987. Zidane zgradbe na potresnih območjih, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 1.zv. (loč. pag.)

Žarnič, R., 2006/2007. predavanja iz predmeta Gradiva, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Agencija republike Slovenije za okolje. 2012.

http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20aktivnost/magnitude_potresov.html

(Pridobljeno 7.8.2012.)

European-Mediterranean Seismological Centre. 2012.

<http://wija.ija.csic.es/gt/earthquakes/>

(Pridobljeno 29.8.2012.)

DELO. 2012.

<http://www.delo.si/novice/svet/cutili-smo-potres-epicenter-v-severni-italiji.html>

(Pridobljeno 12.8.2012.)

GradiSan d.o.o. 2012.

<http://www.gradisan.si>

(Pridobljeno 14.8.2012.)

KRAJI – Slovenija. 2012.

http://kraj.eu/slovenija/stanjel_kraska_hisa/DSC_8054_stanjel_kraska_hisa/slo

(Pridobljeno 2.9.2012.)