

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:

Ristić, U., 2016. Ocena globine razpok v betonu z metodo Impact Echo. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 84 str.

Datum arhiviranja: 06-09-2016

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:

Ristić, U., 2016. Ocena globine razpok v betonu z metodo Impact Echo. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 84 pp.

Archiving Date: 06-09-2016

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO  
SMER GRADBENE  
KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

**UROŠ RISTIČ**

**OCENA GLOBINE RAZPOK V BETONU Z METODO  
IMPACT ECHO**

Magistrsko delo št.: 30/II.GR

**EVALUATION OF CRACK DEPTH IN CONCRETE  
USING IMPACT ECHO METHOD**

Graduation – Master Thesis No.: 30/II.GR

**Mentor:**

prof. dr. Boštjan Brank

**Somentor:**

dr. Uroš Bohinc

Ljubljana, 01. 09. 2016

## POPRAVKI

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

## IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani/-a študent/-ka Uroš Ristić, vpisna številka 26410098, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Ocena globine razpok v betonu z metodo Impact Echo

### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljani

Datum: 24.8.2016

Podpis študenta/-ke:

\_\_\_\_\_

**BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 539.219.2:624.04(497.4)(043)
- Avtor:** Uroš Ristić
- Mentor:** prof. dr. Boštjan Brank
- Naslov:** Ocena globine razpok v betonu z metodo Impact Echo
- Tip dokumenta:** Magistrsko delo
- Obseg in oprema:** 84 str., 70 sl., 14 tab., 82 en.
- Ključne besede:** Metoda Impact Echo, nedestruktivne preiskave, globina razpoke, numerična analiza, Abaqus

**Izvleček**

Glavni del magistrske naloge se nanaša na ocenjevanje globine razpok v betonu s pomočjo nedestruktivne metode imenovane Impact Echo. Predstavljeno je teoretično ozadje širjenja valov v elastičnih trdnih telesih in pripadajoča metodo končnih elementov. Prikazano je opravljeno eksperimentalno delo z Impact Echo metodo, kjer smo obravnavali dva sklopa razpok. Prvi sklop je zajemal navpične razpoke štirih globin: 149 mm, 119 mm, 88 mm in 58 mm. V drugem sklopu smo obravnavali razpoke posebnih konfiguracij. Pri eksperimentu smo uporabili postopke, ki so opisani v knjigi [1]. Za razpoko globine 149 mm smo naredili numerično simulacijo po metodi končnih elementov s programom Abaqus. Primerjavo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov smo predstavili v obliki tabel in grafov. Pri numerični simulaciji smo dobili natančnejše rezultate.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

- UDC:** 539.219.2:624.04(497.4)(043)
- Author:** Uroš Ristić
- Supervisor:** prof. Boštjan Brank PhD
- Title:** Evaluation of crack depth in concrete using Impact Echo method
- Type of document:** M. Sc. Thesis
- Notes:** 84 p., 70 fig., 14 tab., 82 eq.
- Key words:** Impact Echo method, nondestructive testing, crack depth, numerical analysis, Abaqus

**Abstract**

The main part of the master thesis is related to an evaluation of a crack depth in concrete by using a non-destructive method called Impact Echo. The theoretical background of the wave propagation in elastic solids and the related finite element method are presented. In the experimental work we performed measurements on two sets of cracks. The first set consisted of four vertical cracks of different depths: 149 mm, 119 mm, 88 mm and 58 mm. The second set consisted of cracks of specific configurations. We used the experimental procedures described in the book [1]. For a crack depth of 149 mm a numerical simulation was done by using the finite element method and Abaqus computer code. Comparison of the experimental and numerical results is presented in the tables and graphs. The numerical simulation accurately predicts the results.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in vodenje pri izdelavi magistrskega dela se zahvaljujem mentorju, prof. dr. Boštjanu Branku, in somentorju, dr. Urošu Bohincu.

Posebna zahvala gre očetu in materi ter bratu in njegovi družini, ki so mi stali ob strani ves čas študija.

Zahvaljujem se Zavodu za gradbeništvo Slovenije, ki mi je omogočil izvajanje vseh preizkusov, in vsem zaposlenim, ki so me spodbujali.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	CILJI	1
1.2	ZGRADBA MAGISTRSKE NALOGE	1
<b>2</b>	<b>IMPACT ECHO METODA ZA MERJENJE DEFEKTOV V MATERIALIH</b>	<b>3</b>
2.1	OPIS IN DELOVANJE METODE	3
2.2	ANALIZA IN INTERPRETACIJA REZULTATOV DOBLJENIH Z IMPACT ECHO	4
<b>3</b>	<b>ŠIRJENJE VALOV V ELASTIČNEM MEDIJU</b>	<b>9</b>
3.1	HITROST VALOVANJA	11
3.2	UKLON VALOVANJA	13
3.3	VALOVNA ENAČBA V ENI RAZSEŽNOSTI	13
3.4	ENAČBA GIBANJA	17
3.5	VALOVANJE V ELASTIČNEM MEDIJU V ENI RAZSEŽNOSTI	17
3.6	VALOVANJE V ELASTIČNEM MEDIJU V 2D IN 3D	22
3.7	VALOVANJE V HETEROGENIH MATERIALIH	23
<b>4</b>	<b>METODA KONČNIH ELEMENTOV ZA SIMULACIJO ŠIRJENJA VALOV V ELASTIČNEM MEDIJU</b>	<b>25</b>
4.1	REŠEVANJE 1D VALOVANJA V ELASTIČNEM MEDIJU S POMOČJO METODE KONČNIH ELEMENTOV	27
4.2	EKSPLICITNA DINAMIČNA ANALIZA	33
<b>5</b>	<b>DOLOČITEV GLOBINE RAZPOK V BETONSKEM ELEMENTU</b>	<b>35</b>
5.1	OPIS PROBLEMA	35
5.2	IZVEDBA PREISKAVE Z IMPACT ECHO METODO	35
5.2.1	<i>Oprema</i>	35
5.2.2	<i>Priprava vzorcev</i>	36
5.3	DOLOČITEV HITROSTI	42
5.4	POTEK MERITEV	43
5.5	OBDELAVA SIGNALOV	45
5.5.1	<i>Pregled podatkov</i>	45
5.5.2	<i>Branje podatkov</i>	46
5.6	REZULTATI LABORATORIJSKEGA PREIZKUSA	47
5.6.1	<i>5.6.1 Navpične razpoke</i>	48



5.6.2	<i>5.6.2 Razpoke s posebnostmi</i>	62
5.7	SIMULACIJA EKSPERIMENTA V RAČUNALNIŠKEM PROGRAMU ABAQUS	64
5.7.1	<i>Model</i>	65
5.7.2	<i>Rezultati analize</i>	75
5.8	PRIMERJAVA EKSPERIMENTALNIH IN NUMERIČNIH REZULTATOV	78
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>VIRI</b>	<b>83</b>

## SEZNAM SLIK

Slika 1: Poenostavljen prikaz delovanja metode Impact Echo .....	4
Slika 2: ToFD pristop k merjenju globine razpoke .....	5
Slika 3: Odboj in uklon P-valov zaradi vidne razpoke, ki je pravokotna na površino .....	6
Slika 4: Shematični prikaz merjenja globine razpoke ter vzorec pulza, ki ga zaznata oba senzorja. ....	7
Slika 5: Dvodimenzionalni model elastične snovi .....	9
Slika 6: Longitudinalno valovanje .....	10
Slika 7: Transverzalno valovanje.....	10
Slika 8: Rayleighjevi valovi.....	10
Slika 9: Hitrost širjenja longitudinalnega valovanja po togem telesu .....	12
Slika 10: Primer funkcije $f\xi = f(x - \alpha t)$ v času $t_0$ in $t$ . ....	15
Slika 11: Funkcija $f\xi$ , ki opisuje valovanje, ki se širi v pozitivni smeri osi $x$ . ....	16
Slika 12: (a) razdelitev ravnine območja na točke, (b) pomiki točk zaradi tlačnega vala. ....	19
Slika 13: (a) razdelitev ravnine območja na točke, (b) pomiki točk zaradi strižnega vala. ....	21
Slika 14: 1D, 2D in 3D končni elementi .....	25
Slika 15: Shema obravnave problema z metodo končnih elementov.....	26
Slika 16: Porazdelitev pomikov $u_1$ pri času $t$ . ....	28
Slika 17: Aproksimacija pomikov $u_1$ pri času $t$ s 6-imi končnimi elementi. ....	29
Slika 18: Osnovne funkcije.....	30
Slika 19: Koeficienti $d_i$ za obravnavan primer.....	30
Slika 20: Prikaz opreme: 1) računalnik, 2) PCB 086c01 impulzno kladivo, 3) ojačevalnik SIRIUS, 4) pospeškometer KISTLER 8636c5 in 5) pospeškometer PCB 352c68.....	36

Slika 21: Primer poteka priprave vzorca: (a) priprava opaža in ulivanje betona, (b) po nekaj urah odstranimo pločevino, (c) razopaževanje (d) pripravljen vzorec .....	37
Slika 22: Vz dolžni prerez vzorca 1 .....	38
Slika 23: Shematičen 3D prikaz vzorca 1 .....	38
Slika 24: Pripravljen opaž za vzorec 1 .....	39
Slika 25: Vzorec 1 po odstranitvi pločevine .....	39
Slika 26: Vz dolžni prerez vzorca 2 .....	40
Slika 27: Shematičen 3D prikaz vzorca 2 .....	40
Slika 28: Pripravljen opaž za vzorec 2 .....	41
Slika 29: Vzorec 2 po odstranitvi pločevine .....	41
Slika 30: Primer izmerjenega spektra.....	43
Slika 31: Pozicija merilnih naprav glede na vzorec.....	44
Slika 32: Primer postavitve merilnih naprav. ....	45
Slika 33: Primer dobrega in slabega signala .....	46
Slika 34: Shematičen prikaz določitve začetka meritve oziroma prihoda signala.....	47
Slika 35: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160 na merskem mestu 1. ....	50
Slika 36: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160 iz meritev na merskem mestu 2. ....	51
Slika 37: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160. ....	51
Slika 38: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160 za primer M70.....	52
Slika 39: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130 na merskem mestu 1. ....	53
Slika 40: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130 na merskem mestu 2. ....	54
Slika 41: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130. ....	54

---

Slika 42: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130 za primer M70.....	55
Slika 43: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100 na merskem mestu 1. ....	56
Slika 44: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100 na merskem mestu 2. ....	57
Slika 45: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100. ....	57
Slika 46: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100 v primeru M70.....	58
Slika 47: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70 na merskem mestu 1. ....	59
Slika 48: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70 na merskem mestu 2. ....	60
Slika 49: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70. ....	60
Slika 50: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70 za primer M70.....	61
Slika 51: Abaqus/CAE moduli .....	65
Slika 52: Geometrija modela v metrih.....	66
Slika 53: Obravnavan 2D model v programu Abaqus/CAE.....	66
Slika 54: Pozicija merilnih mest in območja udarca v metrih .....	67
Slika 55: Prikaz pozicije merilnih mest in območja udarca v modelu v Abaqus/CAE .....	68
Slika 56: Prikaz podpor na spodnjem robu modela .....	70
Slika 57: Pozicija udarca oziroma obtežbe na zgornjem robu modela .....	71
Slika 58: Primer udarca izmerjenega pri preizkusu s pomočjo impulznim kladivom.....	71
Slika 59: Razdelitev območja na primerne odseke za uporabo “structured meshing” tehnike. (Z R so označene ravnine, s katerimi razdelimo območje) .....	72
Slika 60: Razdelitev modela na tri dele zaradi uporabe strukturne tehnike generiranja mreže končnih elementov .....	73
Slika 61: Izbira tehnike in oblike elementov.....	73
Slika 62: Tip elementa .....	74

Slika 63: Mreža končnih elementov (velikost elementa: <b>0.001m × 0.001m</b> ) .....	74
Slika 64: Definiranje pogoja največjega še stabilnega časovnega koraka .....	75
Slika 65: Preverjanje pogoja največjega še stabilnega časovnega koraka .....	75
Slika 66: Primer signalov na mestu pospeškomerov P30, P50 in P70.....	77
Slika 67: Širjenje valovanja a) <b>t = 0 s</b> , b) <b>t = 1,30 E – 06 s</b> , c) <b>t = 3,27 E – 05 s</b> .....	78
Slika 68: Primerjava dobljenih signalov pri simulaciji in testu v območju prihoda (P30) .....	79
Slika 69: Primerjava dobljenih signalov pri simulaciji in testu v območju prihoda (P50) .....	80
Slika 70: Primerjava dobljenih signalov pri simulaciji in testu v območju prihoda (P70) .....	80

**SEZNAM TABEL**

Tabela 1: Valovne dolžine za izbrane frekvence pri hitrosti razširjanja 3500 m/s v betonu. ...	24
Tabela 2: Označevanje razpok (enote so mm).....	42
Tabela 3: Izračun hitrosti za vzorec 1.....	43
Tabela 4: Izračun hitrosti za vzorec 2.....	43
Tabela 5: Rezultati meritev globine pri navpičnih razpokah.....	49
Tabela 6: Rezultati izračunane globine razpoke V1-160.....	52
Tabela 7: Rezultati izračunane globine razpoke V1-130.....	55
Tabela 8: Rezultati izračunane globine razpoke V1-100.....	58
Tabela 9: Rezultati izračunane globine razpoke V1-70.....	61
Tabela 10: Rezultati meritev globine pri razpokah s posebnostmi.....	63
Tabela 11: Rezultati simulacije za udarec na razdalji 70 mm. ....	76
Tabela 12: Rezultati simulacije za udarec na razdalji 50 mm. ....	76
Tabela 13: Rezultati simulacije za udarec na razdalji 30 mm. ....	77
Tabela 14: Primerjava globine razpoke. ....	79

## **1 UVOD**

Za gradbene objekte je značilno, da je njihov čas trajanja precej daljši od drugih proizvodov. S projektiranjem in postavitvijo objekta v prostor se začne njegov življenjski cikel. Zelo pomembno je vzdrževanje objektov, saj jim s tem podaljšamo tehnično in ekonomsko življenjsko dobo.

Konstrukcije obstoječih objektov so v času življenjske dobe izpostavljene različnim zunanjim dejavnikom, ki povzročajo vidne in nevidne znake dotrajanosti. Namen pregledovanja in preiskovanja konstrukcij je določiti stanje, stopnjo poškodb ter vzroke za njihov nastanek. To je osnova za pripravo ustrezne sanacije. Obseg in izbor potrebnih preiskav se določi na podlagi pregleda objekta, ki ga mora opraviti strokovnjak.

Metode preiskovanja konstrukcij in materialov v splošnem delimo na nedestruktivne preiskave (NDT), delno destruktivne preiskave (DDT) in destruktivne preiskave (DT). Izbor preiskav je odvisen od informacij, ki jih potrebujemo, stopnje natančnosti, izvedbenih pogojev ter odločitev, ki jih nameravamo sprejeti na podlagi dobljenih rezultatov.

Najpomembnejši gradbeni material – beton, je od vgradnje dalje izpostavljen propadanju, bodisi zaradi mehanskih vplivov, kot so preobremenitve in vibracije, fizikalnih vplivov, med katere štejemo erozijo, zmrzovanje in taljenje, abrazijo, krčenja in raztezanja zaradi sprememb temperature, itd., ali pa različnih kemijskih vplivov [2]. Propadanje betona se kaže predvsem v nastanku in širjenju razpok.

### **1.1 Cilji**

V magistrski nalogi smo obravnavali merjenje globine razpok v betonu z uporabo nedestruktivnih preiskav. Glavna cilja magistrske naloge sta bila: (i) podrobneje spoznati in predstaviti nedestruktivno metodo za določanja globine razpok v betonu ter (ii) za praktični primer izvesti numerično simulacijo s programom Abaqus.

Izvedbo nedestruktivnega preizkusa je omogočil Laboratorij za konstrukcije Zavoda za gradbeništvo Slovenije.

### **1.2 Zgradba magistrske naloge**

Magistrska naloga je sestavljena iz dveh delov. Prvi del zajema tri teoretična poglavja. Začne se s poglavjem o Impact Echo metodi, ki je bila uporabljena za določanje globine razpok, sledi ji poglavje o širjenju valovanja v elastičnem mediju, zaključuje pa se z opisom metode

končnih elementov. Praktična uporaba Impact Echo metode je zajeta v drugem delu magistrske naloge, ki obsega opis in izvedbo preiskave, obdelavo podatkov in predstavitev dobljenih rezultatov ter numerično simulacijo preiskave s programom Abaqus. V zaključku naloge sta podana povzetek in sklep.



## 2 IMPACT ECHO METODA ZA MERJENJE DEFEKTOV V MATERIALIH

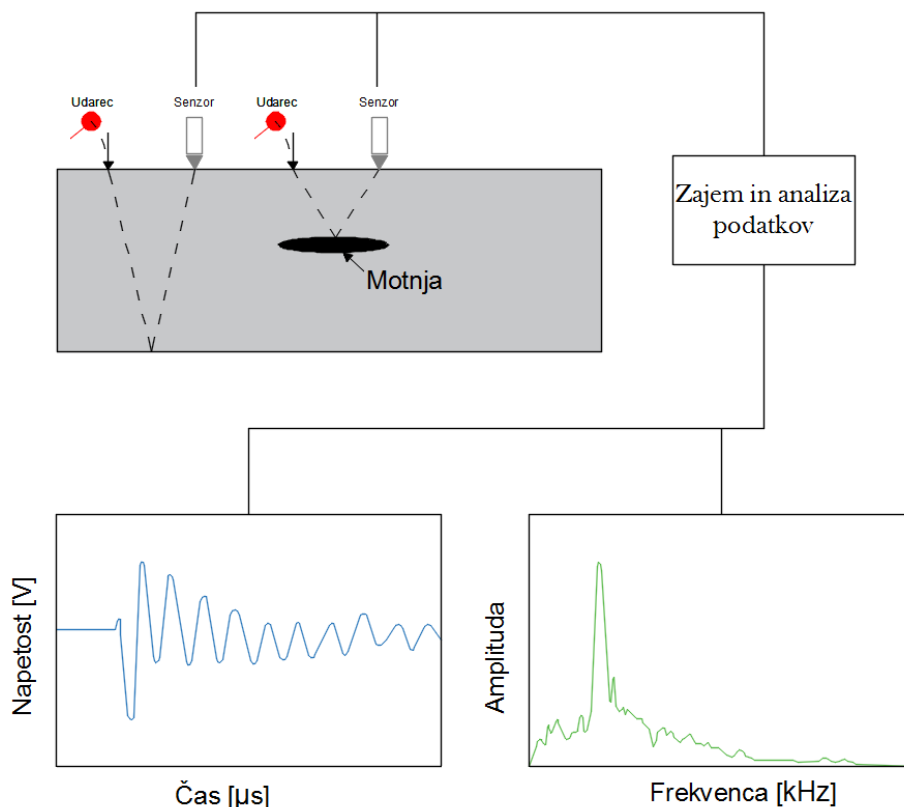
### 2.1 Opis in delovanje metode

Pregled, ocena in testiranje konstrukcij ter materialov, ne da bi pri tem izgubili funkcionalnost preizkušancev, imenujemo nedestruktivno preskušanje (testiranje) (NDT). To je tudi glavna prednost pred drugimi metodami, saj lahko proizvod ponovno uporabimo. V današnjem času se te metode uporabljajo predvsem za nadzorovanje objektov, ki so pod konstantnimi delovnimi obremenitvami in jih ni enostavno izključiti (npr. jedrski reaktorji, mostovi,...) [3].

Izmed vseh neporušnih preiskav so akustične metode najstarejše in najbolj uporabljane. Temeljijo na širjenju in odboju mehanskega valovanja v trdnih snoveh. Ena izmed akustičnih metod je tudi metoda z merjenjem odmeva udarnih valov – t.i. Impact Echo, ki se uporablja predvsem za raziskovanje in preučevanje stanja betonskih in zidanih konstrukcij. Valovanje, ki ga sprožimo z udarcem, se širi po preizkušancu ter odbija od notranjih napak, drugih prisotnih materialov in zunanjih mejnih površin. Z metodo Impact Echo se lahko določi lokacijo ter velikost razpok, delaminacije, praznine, armature, prednapetih kablov, itd. S to metodo lahko opravimo tudi meritve debeline različnih elementov kot so plošče, nosilci in stebri [1,4].

Kljub konceptualno preprosti zasnovi metode, je potreben konzervativen pristop in njena validacija oziroma primerjava z drugimi metodami. Izkušnje so pokazale, da je za uspešne rezultate ključno temeljito poznavanje metode ter znanje o materialih in konstrukcijskih elementih, ki jih preizkušamo [1].

Impact Echo metoda temelji na opazovanju prehodnih napetostnih oziroma zvočnih valov, ki so posledica elastičnega udarca na površini preizkušanca. Na sliki 1 je prikazan poenostavljen način delovanja metode. Za vzbujanje napetostnih valov običajno uporabimo kladivo ali majhno jekleno kroglo (običajno od 3 mm do 5 mm premera), s katero udarimo po površini betonske ali zidane konstrukcije oziroma preizkušanca. S tem ustvarimo napetostne valove, ki se širijo po elastičnem mediju, in odbijajo od notranjih ovir (motenj) ter zunanjih površin. Frekvenca valovanja je odvisna od časa trajanja udarca, premera krogle in kinetične energije krogle ob udarcu. Odbito valovanje ustvarja na površini določene pomike, ki jih zajemamo s sprejemnikom. Zajete signale lahko prikažemo z grafom napetost [V] – čas [ $\mu$ s], ali pa jih s Fourierjevo vrsto transformiramo v grafe amplituda [mm] – frekvenca [kHz] (slika 1) [1].



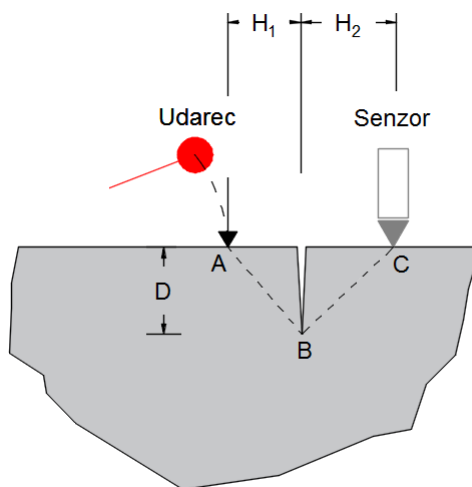
**Slika 1: Poenostavljen prikaz delovanja metode Impact Echo**

Merilno opremo za izvajanje metode Impact Echo sestavljajo pretvornik, instrumentalno kladivce ali jeklene krogle, ki jih uporabljamo kot izvor valovanja, analogno – digitalne naprave za zajem podatkov ter programska oprema za grafični prikazov in analizo rezultatov.

## 2.2 Analiza in interpretacija rezultatov dobljenih z Impact Echo

V nadaljevanju bo za lažje razumevanje na primeru navpične površinske razpoke prikazana analiza rezultatov, ki jih dobimo z metodo Impact Echo. Primer je povzet iz literature [1].

Ena od tehnik za merjenje globine razpoke v betonu, ki je bila uporabljena tudi v tej magistrski nalogi, je Time of Flight Diffraction ali krajše ToFD tehnika (slika 2).



Slika 2: ToFD pristop k merjenju globine razpoke

Udarec na površini preizkušanca ustvari napetostne valove, ki se širijo po mediju (slika 3a). Mesto udarca in senzorna sta ločena z razpoko, zato P- in S-valovi ter površinski R-valovi ne morejo direktno potovati do mesta merjenja (slika 3b). Šele, ko hitrejši longitudinalni P-valovi dosežejo konico razpoke, se ti uklonijo (na sliki 3 so označeni kot  $P_{kon}$ ) ter nadaljujejo svojo pot do senzorna, ki zajame meritve. Ob pogoju, da poznamo razdalji od mesta udarca do razpoke ( $H_1$ ) in od razpoke do mesta merjenja ( $H_2$ ), ter, da smo izmerili čas potovanja P-valov od začetka udarca do zajema meritev, lahko določimo globino razpoke s pomočjo naslednjih izrazov:

$$\overline{AB}^2 = H_1^2 + D^2, \quad (2.1)$$

$$\overline{BC}^2 = H_2^2 + D^2, \quad (2.2)$$

$$\overline{AB} + \overline{BC} = c_P \Delta t, \quad (2.3)$$

kjer so (slika 4):

- $\overline{AB}$ , razdalja od točke A do točke B,
- $\overline{BC}$ , razdalja od točke B do točke C,
- $D$ , globina razpoke,
- $c_P$ , hitrost P-valov, in
- $\Delta t$ , izmerjen čas potovanja P-valov.

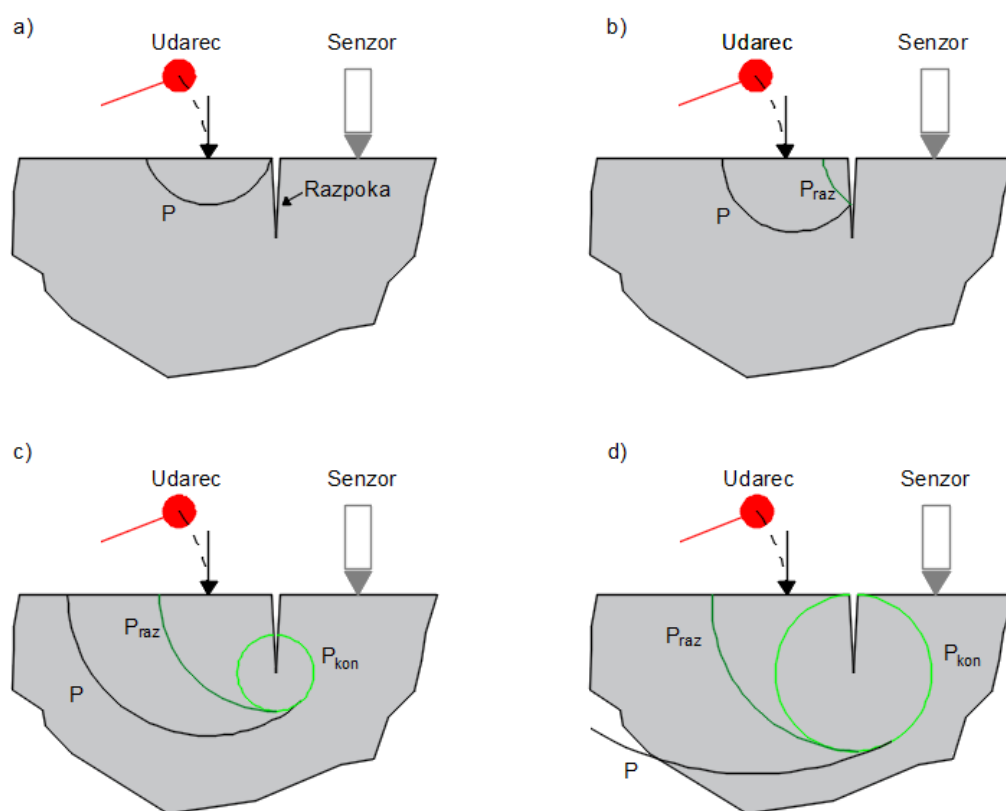
Splošen izraz za globino razpoke zapišemo kot

$$D = 0.5 \cdot c_p \cdot \Delta t \sqrt{1 - \left(\frac{H_2 - H_1}{c_p \cdot \Delta t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_2 + H_1}{c_p \cdot \Delta t}\right)^2}. \quad (2.4)$$

V primeru, da sta razdalji  $H_1$  in  $H_2$  enaki, se enačba za globino razpoke poenostavi v

$$D = \sqrt{\frac{(c_p \Delta t)^2}{4} - H^2}, \quad (2.5)$$

kjer je  $H = H_1 = H_2$ .



**Slika 3: Odboj in uklon P-valov zaradi vidne razpoke, ki je pravokotna na površino**

$\Delta t$  je označen čas potovanja valov od mesta udarca do mesta merjenja. Ker je začetek valovanja težko določiti neposredno, si pomagamo z dodatnim senzorjem, ki ga postavimo na isti strani razpoke, kjer smo predvideli udarec. Na sliki 4 je shematično prikazan načina merjenja globine razpoke ter signala, ki ga zaznata oba senzorja. S  $t_0$  je označen začetek udarca, s  $t_1$  čas prihoda P-valov do bližnjega senzorja (neposredna povezava) in s  $t_2$  čas

prihoda uklonjenih P-valov, ki dosežejo senzor na drugi strani razpoke. S pomočjo naslednjih dveh enačb

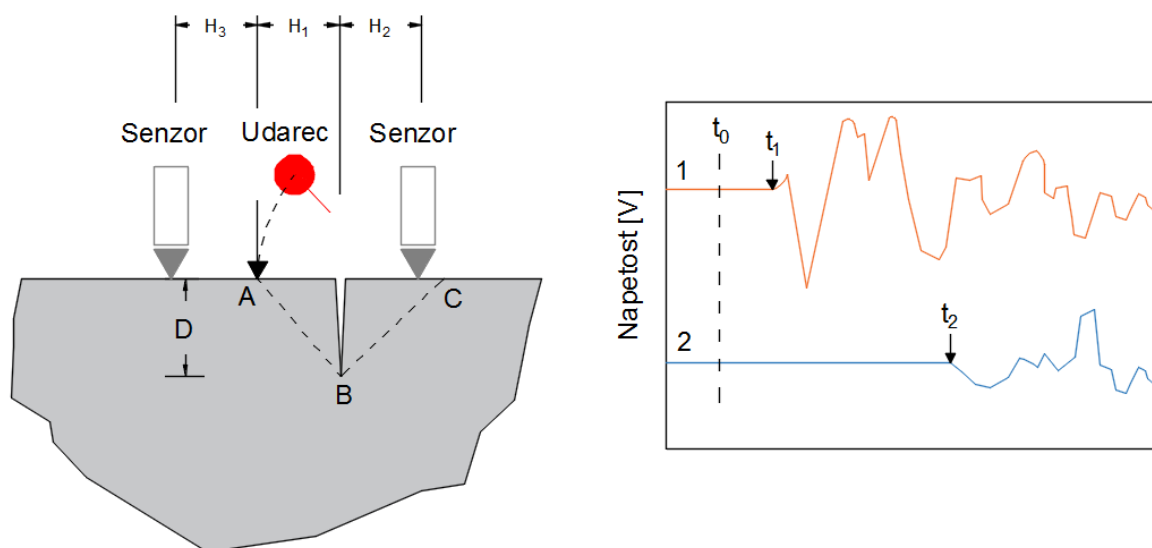
$$t_1 - t_0 = \frac{H_3}{c_p}, \quad (2.6)$$

$$\Delta t = t_2 - t_0, \quad (2.7)$$

lahko dobimo končno enačbo za izračun iskanega potovalnega časa P-valov

$$\Delta t = (t_2 - t_1) + \frac{H_3}{c_p} \quad (2.8)$$

Ko poznamo čas potovanja P-valov, lahko z že znano enačbo izračunamo globino razpoke  $D$ .



**Slika 4: Shematični prikaz merjenja globine razpoke ter vzorec pulza, ki ga zaznata oba senzorja.**

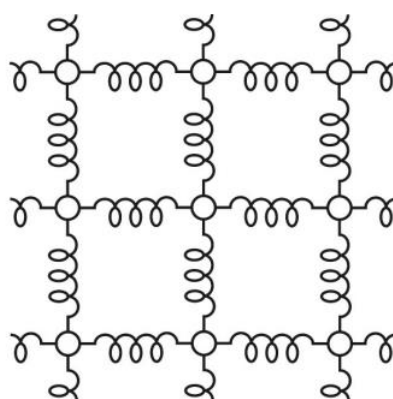
Pri udarcu se aktivirajo različne vrste valov, ki se širijo z različnimi hitrostmi. Med vsemi so longitudinalni (P) valovi najhitrejši. Da bi pri izvajanju ToFD meritev zagotovili čas, kjer bi se P-valovi ločili od drugih valov, avtorja [1] podajata okvirne razdalje  $H_2$  in  $H_3$ :

- razdalja  $H_2$ , med senzorjem 2 in razpoko, naj bo med okoli 0,03 m in 0,05 m,
- razdalja  $H_3$ , med senzorjem 1 in mestom udarca, naj bo med 0,05 m in 0,15 m.

Podane so tudi okvirne velikosti za udarne glave, katerih razpon je med 5 in 12 mm, s katerimi dosežemo čas trajanja udarca med 20  $\mu$ s in 60  $\mu$ s.

### 3 ŠIRJENJE VALOV V ELASTIČNEM MEDIJU

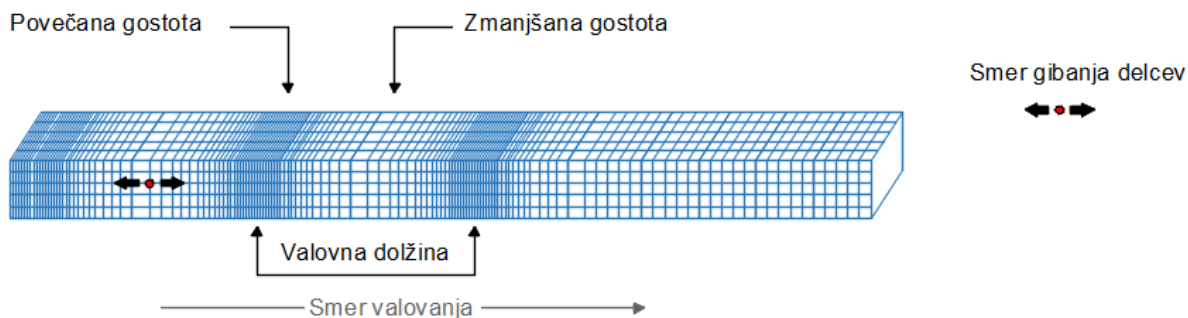
Mehansko valovanje je širjenje motnje, ki potuje z določeno hitrostjo ter pri tem prenaša energijo po mediju. Energija se širi v isti smeri kot valovanje. Ker pri mehanskem valovanju ne gre za prenos snovi, ampak se motnja in pripadajoča energija širita z nihanjem delcev okoli ravnovesne lege, mora snov imeti prožno deformabilne lastnosti. Elastično snov si lahko v zelo grobem približku predstavljamo kot mrežo elementarnih mas, ki so med seboj povezane z elastičnimi vzmetmi (slika 5) [5].



Slika 5: Dvodimenzionalni model elastične snovi

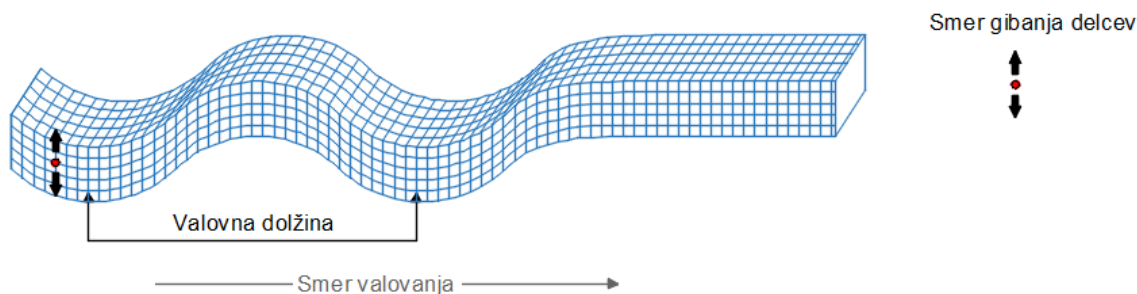
V elastičnem mediju se pojavljata dve vrsti valov: P-valovi in S-valovi. Ločimo jih po načinu gibanja delcev, ko se motnja širi skozi medij. Poleg omenjenih valov na površini medija najdemo tudi površinske oziroma R-valove [1,6,7].

P-valovi ali primarni valovi so longitudinalni valovi, ki povzročijo, da delec zaniha v smeri širjenja valovanja. Pri tej vrsti valovanja se v mediju pojavijo območja tlaka (zgoščnine) in območja natega (razredčine) [6,7]



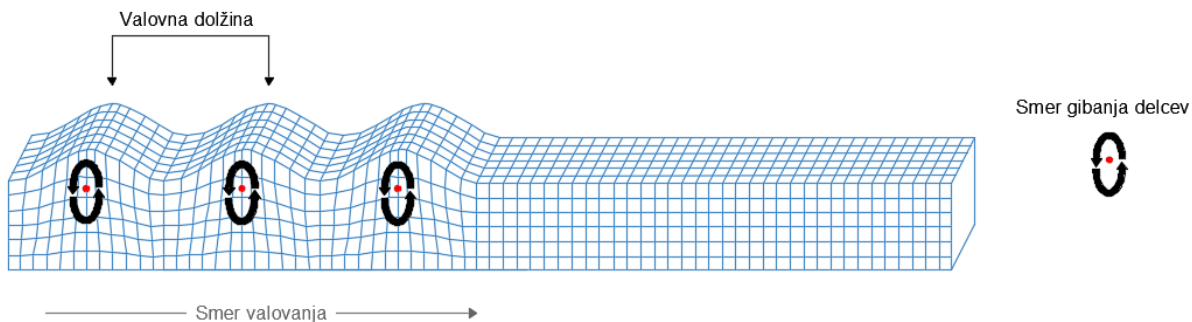
Slika 6: Longitudinalno valovanje

S-valovi ali strižni valovi so transverzalni ali prečni valovi, kjer delci snovi nihajo pravokotno na smer širjenja motnje. Ta vrsta valov povzroči, da se v mediju pojavijo strižne napetosti [6,7]



Slika 7: Transverzalno valovanje

Rayleigh ali R-valovi so površinski valovi, ki se širijo po površini trdnega medija. To valovanje povzroči, da je gibanje delcev na površini telesa eliptično. Amplituda teh valov se z globino eksponentno zmanjšuje [6,7].



Slika 8: Rayleighjevi valovi



### 3.1 Hitrost valovanja

Hitrost širjenja mehanskega valovanja v neskončnem izotropnem elastičnem mediju je odvisna samo od materialnih karakteristik medija, kar bo na koncu podpoglavja tudi predstavljeno na primeru longitudinalnega valovanja. Ta vrsta valov je v trdni snovi tudi najhitrejša. Hitrost longitudinalnih valov običajno označimo s  $c_p$  [6,7,12]:

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.1)$$

S-valovi so počasnejši od P-valov in potujejo s hitrostjo  $c_s$  [12]:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.2)$$

Med vsemi tremi valovanji so R-valovi najpočasnejši. Njihova hitrost je [16]:

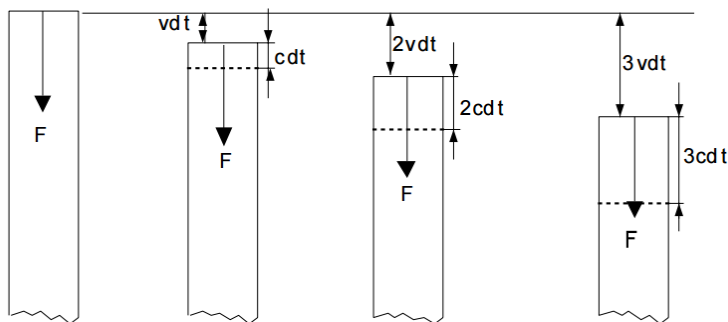
$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (3.3)$$

V zgoraj predstavljenih enačbah se pojavljajo naslednje materialne karakteristike:

- $E$ , modul elastičnosti,
- $G$ , strižni modul,
- $\rho$ , gostota materiala,
- $\nu$ , Poissonov količnik.

#### Primer: Hitrost longitudinalnega valovanja [8]

Vzemimo dolgo palico s presekom  $S$ , za katero velja Hook-ov zakon. V nekem trenutku začne na en konec palice delovati vzdolžna sila  $F$ , zaradi katere se začne konec palice premikati s hitrostjo  $v$ , meja med deformiranim in nedeformiranim delom palice pa se pomika naprej s hitrostjo  $c$  (hitrost razširjanja motnje).



Slika 9: Hitrost širjenja longitudinalnega valovanja po togem telesu

Za zgornji primer lahko zapišemo Hook-ov zakon v naslednji obliki:

$$\frac{F}{S} = E \frac{vdt}{cdt}, \quad (3.4)$$

kjer je:

- $E$ , elastični modul snovi,
- $vdt$ , dolžina premika konca palice,
- $cdt$ , razdalja, ki jo prepotuje motnja,
- $dt$ , čas.

Za določitev hitrosti potrebujemo še izrek o gibalni količini, ki ga zapišemo z naslednjo enačbo:

$$F = vdm \quad (3.5)$$

kjer je:

- $v$ , hitrost,
- $dm$ , masa gibajočega deformabilnega dela palice,
- $F$ , sila.

Ob upoštevanju, da se masa gibajočega deformabilnega dela palice spreminja kot  $dm = \rho S c dt$ , lahko zapišemo enačb (3.5) kot:

$$F dt = \rho S c dt v \quad (3.6)$$

Po vstavitvi (3.5) v (3.4) dobimo

$$c = c_p = \sqrt{E/\rho}. \quad (3.6)$$

Zgornja enačba pove, da hitrost širjenja motnje ni odvisna od sile ampak samo od lastnosti medija.

### 3.2 Uklon valovanja

Za valovanje so značilni pojavi kot so interferenca, odboj, lom ter uklon. Valovanje se od razpoke odbija, dokler ne doseže konice razpoke, kjer pride do uklona ter novega izvora krogelnega vala, ki nadaljuje pot z isto hitrostjo kot izvorni val (slika 3). Ta pojav opisuje Huygensovo načelo in igra pomembno vlogo pri določitvi globine površinskih razpok [9].

### 3.3 Valovna enačba v eni razsežnosti

Valovanje v eni razsežnosti zapišemo z naslednjo enačbo [12]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (3.8)$$

ki je parcialna diferencialna enačba drugega reda, kjer je spremenljivka  $u$  (pomik) odvisna, spremenljivki  $t$  (čas) in  $x$  (lega) pa sta neodvisni;  $\alpha$  je konstanta. Splošno rešitev 1-dimenzionalne valovne enačbe lahko dobimo z uvedbo novih spremenljivk  $\xi = x - \alpha t$  in  $\eta = x + \alpha t$ . Odvisno spremenljivko  $u$  lahko nato zapišemo kot funkcijo spremenljivk  $x, t$  ali  $\xi, \eta$ :

$$u = u(x, t) = \tilde{u}(\xi, \eta). \quad (3.9)$$

Z upoštevanjem verižnega pravila parcialni odvod  $u$  po spremenljivki  $t$  zapišemo kot

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \\ &= -\alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} + \alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Na podoben način dobimo tudi drugi parcialni odvod:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t} \left( -\alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} + \alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left( -\alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} + \alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \right) \frac{\partial \xi}{\partial t} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( -\alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} + \alpha \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} \right) \frac{\partial \eta}{\partial t} = \end{aligned}$$

$$= \alpha^2 \left( \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \xi^2} - 2 \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \eta^2} \right). \quad (3.11)$$

Drugi parcialni odvod  $u$  po spremenljivki  $x$  lahko s pomočjo verižnega pravila zapišemo na podoben način kot

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \xi^2} + 2 \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \eta^2}. \quad (3.12)$$

Ob upoštevanju izrazov (3.11) in (3.12) za druge parcialne odvode, valovno enačbo v eni razsežnosti (3.8) zapišemo v obliki [12]

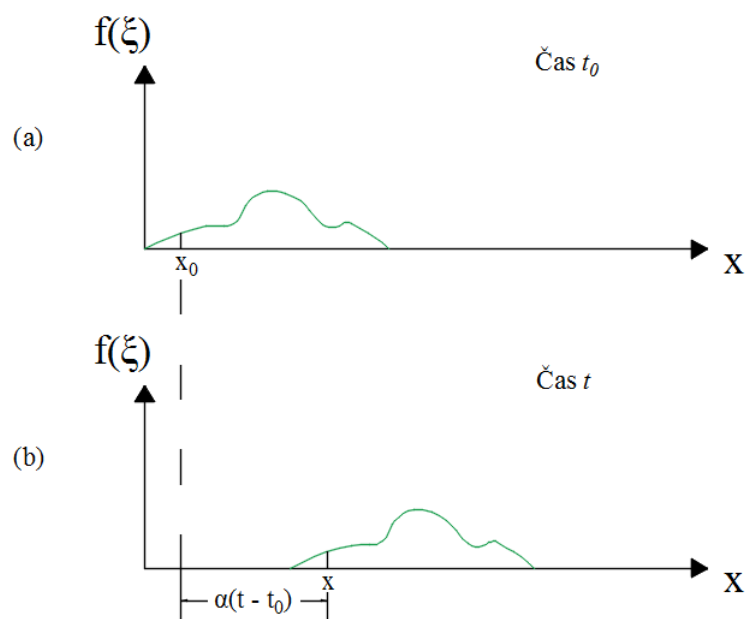
$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \xi \partial \eta} = 0. \quad (3.13)$$

Z dvojnimi integriranjem zgornje enačbe dobimo splošno rešitev 1-dimenzionalne valovne enačbe, ki jo imenujemo D'Alembertova rešitev [12]:

$$\tilde{u} = f(\xi) + g(\eta), \quad (3.14)$$

kjer sta  $f(\xi)$  in  $g(\eta)$  poljubni, dvakrat odvedljivi funkciji.

Poglejmo funkcijo  $f(\xi) = f(x - \alpha t)$ . Pri nekem času  $t_0$  je graf funkcije  $f(x - \alpha t_0)$  neka poljubna krivulja, kot je prikazano na sliki 10a.

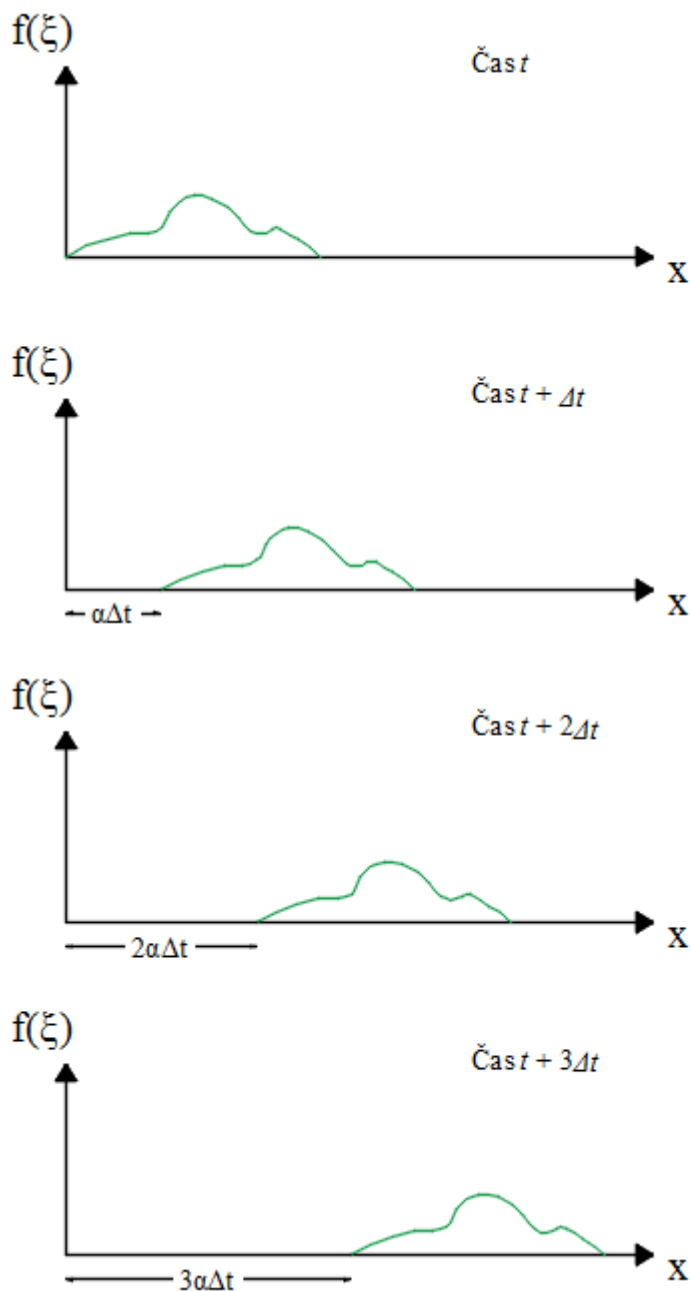


Slika 10: Primer funkcije  $f(\xi) = f(x - \alpha t)$  pri časih  $t_0$  in  $t$ .

Vrednost funkcije  $f(\xi)$  pri času  $t_0$  v točki  $x_0$  je  $f(x_0 - \alpha t_0)$ . Graf funkcije  $f(\xi)$  pri času  $t > t_0$  je prikazan na sliki 10b in ima v točki  $x$  vrednost  $f(x - \alpha t)$ . Ta vrednost je enaka vrednosti  $f(x_0 - \alpha t_0)$ , če je  $x - \alpha t = x_0 - \alpha t_0$  oziroma [12]

$$x = x_0 + \alpha(t - t_0). \quad (3.15)$$

Zgornji izraz nam pove, da se na časovnem intervalu  $[t_0, t]$ , graf funkcije  $f(\xi)$  premakne za  $\alpha(t - t_0)$  v pozitivni smeri osi  $x$ . S povečevanjem časa se torej graf funkcije  $f(\xi)$  premika v pozitivni smeri osi  $x$  s konstantno hitrostjo  $\alpha$ .



Slika 11: Funkcija  $f(\xi)$ , ki opisuje valovanje, ki se širi v pozitivni smeri osi  $x$ .

Na enak način bi lahko pokazali, da se graf funkcije  $g(\eta)$  premika v negativni smeri osi  $x$  s konstantno hitrostjo  $\alpha$ .

Funkciji  $f(\xi)$  in  $g(\eta)$  torej opisujeta valovanje, ki se širi v pozitivni oziroma negativni smeri osi  $x$  z valovno hitrostjo  $\alpha$ .

### 3.4 Enačba gibanja

Enačbe gibanja opisujejo obnašanje fizikalnega sistema s pomočjo matematičnih funkcij, v katerih nastopajo dinamične spremenljivke. S pomočjo ravnotežnih, ohranitvenih in konstitutivnih enačb, lahko enačbe gibanja linearnega elastičnega materiala izrazimo s pomiki medija na naslednji način [10,12]:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial x_m} + \mu \frac{\partial^2 u_m}{\partial x_k \partial x_k}, \quad (3.16)$$

ali pa v vektorski obliki kot [10,12]:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}), \quad (3.17)$$

kjer je

$$\nabla = \sum_{i=1}^n \vec{e}_i \frac{\partial}{\partial x_i}. \quad (3.18)$$

V zgornjih dveh enačbah vektor  $\mathbf{u}$  predstavlja pomike medija relativno na začetno stanje, skalar  $\rho_0$  pa gostoto materiala.  $\lambda$  in  $\mu$  sta Lamjevi konstanti, ki se lahko izrazita z Youngovim modulom elastičnosti  $E$  in Poissonovim količnikom  $\nu$  [12]:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (3.19)$$

Indeksa  $k, m$  tečeta od 1 do 2 za dvo razsežni problem in od 1 do 3 za tro razsežni problem.

### 3.5 Valovanje v elastičnem mediju v eni razsežnosti

Spoznali smo že dve glavni vrsti valovanj, ki se pojavljata v elastičnih trdnih medijih. V nadaljevanju si pogledjmo, kako njihove lastnosti opisuje valovna enačba.

#### Longitudinalni valovi

Gibanje materiala je definirano s poljem pomikov  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, t)$ . Predpostavimo, da so pomiki medija na začetku enaki nič, torej je  $\mathbf{u}(x, t) = 0$  za  $t = 0$  (začetni pogoj). Za  $t > 0$  definiramo enotne robne pomike pri  $x = x_1 = 0$  z enačbo [12]

$$u_1(0, t) = p(t), \quad (3.20)$$

kjer je  $p(t)$  predpisana funkcija časa. S tem smo predpisali robni pogoj.

Ker je gibanje na robu v smeri  $x_1$  enotno, ni vpliva na smeri  $x_2$  in  $x_3$ , zato se vsaka točka premika le v smeri  $x_1$ .

Z upoštevanjem polja pomikov [12]

$$u_1 = u_1(x_1, t), \quad (3.21)$$

$$u_2 = 0, \quad (3.22)$$

$$u_3 = 0, \quad (3.23)$$

ter enačbe gibanja izražene s pomiki, lahko zapišemo končno enačbo [12] kot

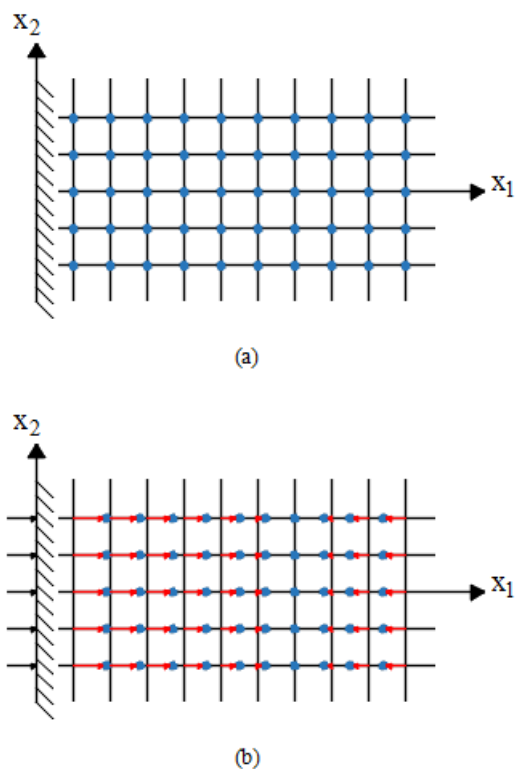
$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2}, \quad (3.24)$$

kjer je  $\alpha$  konstanta. Vidimo lahko, da gibanje elastičnega materiala ureja eno-dimenzionalna valovna enačba s hitrostjo valovanja [12]

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}}. \quad (3.25)$$

Takim valovom pravimo longitudinalni valovi, ali pa tudi tlačni oziroma P-valovi. Enačbo lahko rešimo z upoštevanjem začetnega in robnega pogoja.





Slika 12: (a) razdelitev ravnine območja na točke, (b) pomiki točk zaradi tlačnega vala.

Polje pomikov, ki opisuje longitudinalno valovanje, lahko dobimo tudi, če definiramo napetostni robni pogoj z enačbo [12]

$$\sigma_{11}(0, t) = \bar{p}(t), \quad (3.26)$$

kjer je  $\bar{p}(t)$  predpisana funkcija časa in velja za  $t > 0$ .

Z uporabo konstitutivnih enačb lahko zgornji robni pogoj zapišemo s pomikom [12]

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1}(0, t) = p(t), \quad (3.27)$$

kjer je [12]

$$p(t) = \frac{1}{\lambda + 2\mu} \bar{p}(t). \quad (3.28)$$

V primeru, da nimamo nobenih napetosti, lahko robni pogoj zapišemo kot

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1}(0, t) = 0. \quad (3.29)$$

Transverzalni valovi

V primeru transverzalnih valov definiramo robni pogoj za pomike [12] kot

$$u_2(0, t) = p(t), \quad (3.30)$$

kjer je  $p(t)$  predpisana funkcija časa, ki velja za  $t > 0$ .

Dobljeno polje pomikov lahko sedaj zapišemo kot [12]

$$u_1 = 0, \quad (3.31)$$

$$u_2 = u_2(x_1, t), \quad (3.32)$$

$$u_3 = 0. \quad (3.33)$$

Ker je gibanje na robu v smeri  $x_2$  enotno, ni vpliva na smeri  $x_1$  in  $x_3$ , zato se vsaka točka premika le v smeri  $x_2$ .

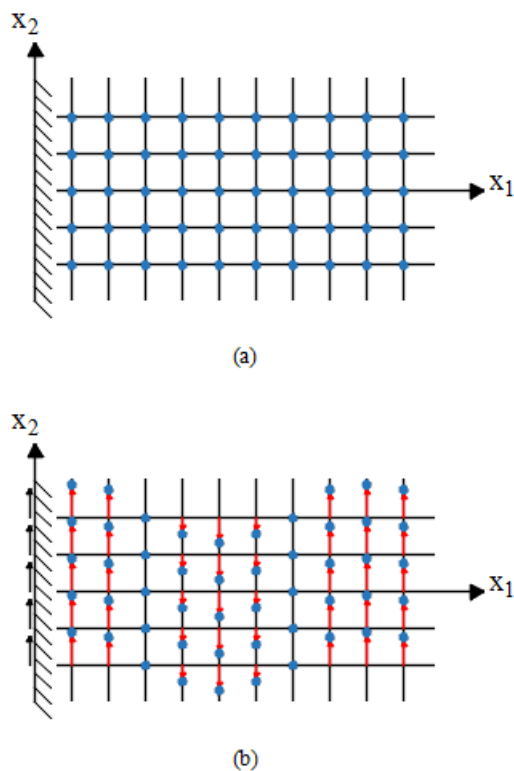
Podobno kot pri longitudinalnih valovih lahko tudi tukaj zapišemo gibanje elastičnega medija kot [12]

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \beta^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2}, \quad (3.34)$$

kjer je  $\beta$  konstanta. Vidimo lahko, da gibanje elastičnega materiala ureja eno-dimenzionalna valovna enačba s hitrostjo valovanja [12]

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0}}. \quad (3.35)$$

Tako valovanje imenujemo transverzalno valovanje. Pojavljajo se tudi imena kot so strižno valovanje ali S-valovanje.



Slika 13: (a) razdelitev ravnine območja na točke, (b) pomiki točk zaradi strižnega vala.

Polje pomikov, ki opisuje transverzalno valovanje, lahko dobimo tudi, če definiramo napetostni robni pogoj z enačbo [12]

$$\sigma_{12}(0, t) = \bar{p}(t), \quad (3.36)$$

kjer je  $\bar{p}(t)$  predpisana funkcija časa in velja za  $t > 0$ .

Z uporabo konstitutivnih enačb lahko zgornji robni pogoj zapišemo s pomikom [12]

$$\frac{\partial u_2}{\partial x_1}(0, t) = p(t), \quad (3.37)$$

kjer je [12]

$$p(t) = \frac{1}{\mu} \bar{p}(t). \quad (3.38)$$

V primeru, da nimamo nobenih napetosti, robni pogoj lahko zapišemo kot [12]

$$\frac{\partial u_2}{\partial x_1}(0, t) = 0. \quad (3.39)$$

### 3.6 Valovanje v elastičnem mediju v 2D in 3D

Za razliko od 1D, so pri 2D problemih količine odvisne od dveh koordinat, npr.: od koordinat  $x_1$  in  $x_2$ . Iz splošne ravnotežne enačbe pri upoštevanju pogoja neodvisnosti od koordinate  $x_3$ , torej, da je  $\frac{\partial}{\partial x_3} = 0$ , dobimo dva ločena sistema [10],

$$\sigma_{3k,k} = \rho_0 \ddot{u}_3 \quad (3.40)$$

in

$$\sigma_{mk,k} = \rho_0 \ddot{u}_m, \quad (3.41)$$

kjer črki  $m$  in  $k$  zavzemata samo indeksa 1 in 2 [10, 12].

V nadaljevanju nas bo predvsem zanimala druga enačba, saj imamo pri obravnavanem problemu v 2D samo pomike  $u_m$ , ki so odvisni od koordinat  $x_1$  in  $x_2$  ter od časa  $t$ . Pri reševanju sistema moramo upoštevati ravninsko deformacijsko stanje, v nadaljevanju RDS. Za RDS je značilno, da imamo deformacije samo v ravnini  $x_1x_2$ , torej velja [17]

$$\varepsilon_{33} = 0, \quad (3.42)$$

$$\gamma_{13} = \gamma_{12} = 0, \quad (3.43)$$

kjer je:

- $\varepsilon_{33}$ , normalna deformacija v smeri  $x_3$ ,
- $\gamma_{13}$ , inženirska strižna deformacija v ravnini  $x_1x_3$ ,
- $\gamma_{12}$ , inženirska strižna deformacija v ravnini  $x_1x_2$ .

Z upoštevanje zgornjih pogojev lahko Hook-ov zakon zapišemo z naslednjimi relacijami [17]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}, \quad (3.44)$$

$$\sigma_{33} = \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}),$$

oziroma z zapisano z indeksi kot [12]

$$\sigma_{mk} = \lambda u_{l,l} \delta_{mk} + \mu(u_{m,k} + u_{k,m}), \quad (3.45)$$

$$\sigma_{33} = \lambda u_{l,l}, \quad (3.46)$$

kjer indeksi  $m, k$  in  $l$  zavzemajo vrednosti 1 in 2, Kroneckerjev delta pa zapišemo kot

$$\delta_{mk} = \begin{cases} 1; & \text{pri } m = k \\ 0; & \text{pri } m \neq k \end{cases}$$

V nadaljevanju dobimo z upoštevanjem izraza za  $\sigma_{mk}$  naslednji zapis za enačbo gibanja elastičnega medija v 2D [12]:

$$\rho_0 \ddot{u}_m = (\lambda + \mu) u_{k,km} + \mu u_{m,kk}, \quad (3.47)$$

kjer indeksa  $m$  in  $k$  zavzemata vrednosti 1 in 2.

Če bi problem obravnavali v 3D prostoru, bi nastopajoče količini bile odvisne od vseh treh koordinat, torej bi indeksa  $m$  in  $k$  zavzemala vrednosti 1, 2 in 3.

### 3.7 Valovanje v heterogenih materialih

Beton je mešanica različnih, med seboj povezanih sestavin, zato ga uvrščamo v skupino heterogenih materialov. Širjenje valov v heterogenih materialih je pogojeno elastičnim karakteristikam vsebovanih materialov, saj se na stiku dveh različnih materialov del valovanja odbije, del pa se ga prenese. Razmerje med odbitim in prepuščenim valovanjem je odvisno od akustične impedance obeh materialov, ki je določena kot zmnožek gostote in hitrosti valovanja [13].

Velikost območji z različnim materialom, razdalja med njimi in valovna dolžina imajo velik vpliv na širjenje valovanja. Če označimo velikost območji in razdaljo med njimi z  $D$  ter valovno dolžino z  $\lambda$ , lahko obravnavamo naslednja primera [13]:

- $\lambda \gg D$ , valovna dolžina mnogo večja kot velikost območji in medsebojne razdalje
- $\lambda \approx D$ , valovna dolžina v velikostnem razredu območji in medsebojnih razdalj

V primeru  $\lambda \gg D$  je odboj valovanja majhen in nima velikega vpliva na širjenje valov. Slednje pa ne velja za primer  $\lambda \approx D$ , saj imamo veliko število odbojev, kar povzroči, da je širjenje valovanja naključno. V tabeli 1 so prikazane valovne dolžine za izbrane frekvence pri hitrosti razširjanja 3500 m/s v betonu [13].

**Tabela 1: Valovne dolžine za izbrane frekvence pri hitrosti razširjanja 3500 m/s v betonu.**

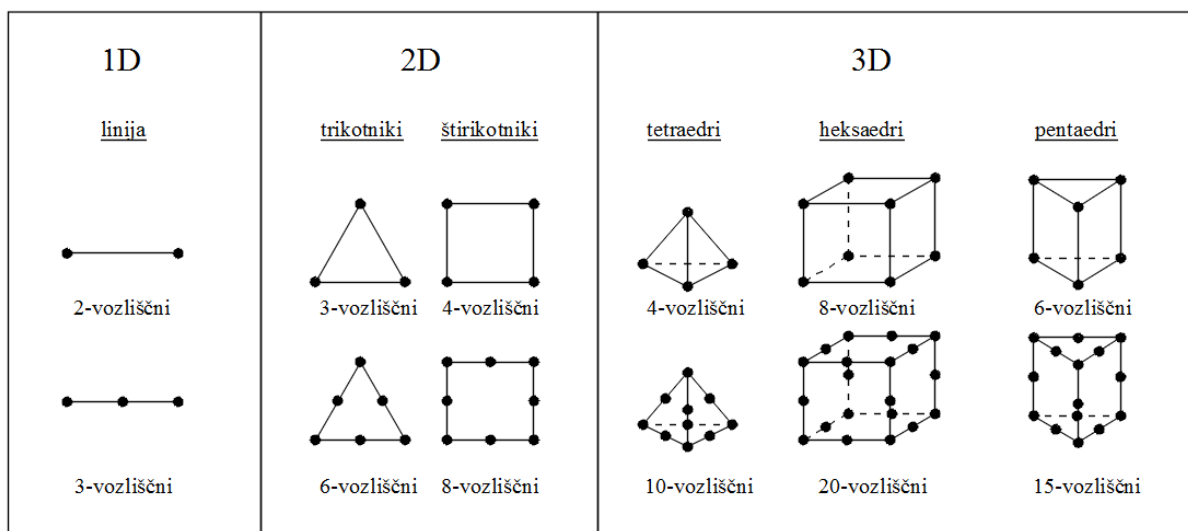
Frekvenca [kHz]	Valovna dolžina [m]
1	3.5
10	0.35
50	0.07
100	0.035
500	0.007
1000	0.0035

#### 4 METODA KONČNIH ELEMENTOV ZA SIMULACIJO ŠIRJENJA VALOV V ELASTIČNEM MEDIJU

Metoda končnih elementov (MKE) je numerična tehnika za izračun približka rešitve parcialne diferencialne enačbe (PDE). Je najbolj razširjena metoda pri praktičnem inženirskem in znanstvenem delu. Temelji na variacijski metodi. Poleg iskanja rešitve PDE jo uporabljamo tudi za reševanje integralnih enačb [14].

V današnjem času večina inženirjev nima poglobljenega znanja o metodi končnih elementov, saj se ne ukvarjajo s programiranjem MKE, ampak uporabljajo na tržišču dosegljivo programsko opremo.

Pri metodi končnih elementov je obravnavano telo »sestavljeno« iz končnih elementov, ki so medsebojno povezani v vozliščih, katerih število je odvisno od izbrane vrste končnih elementov (slika 14) [15,16].

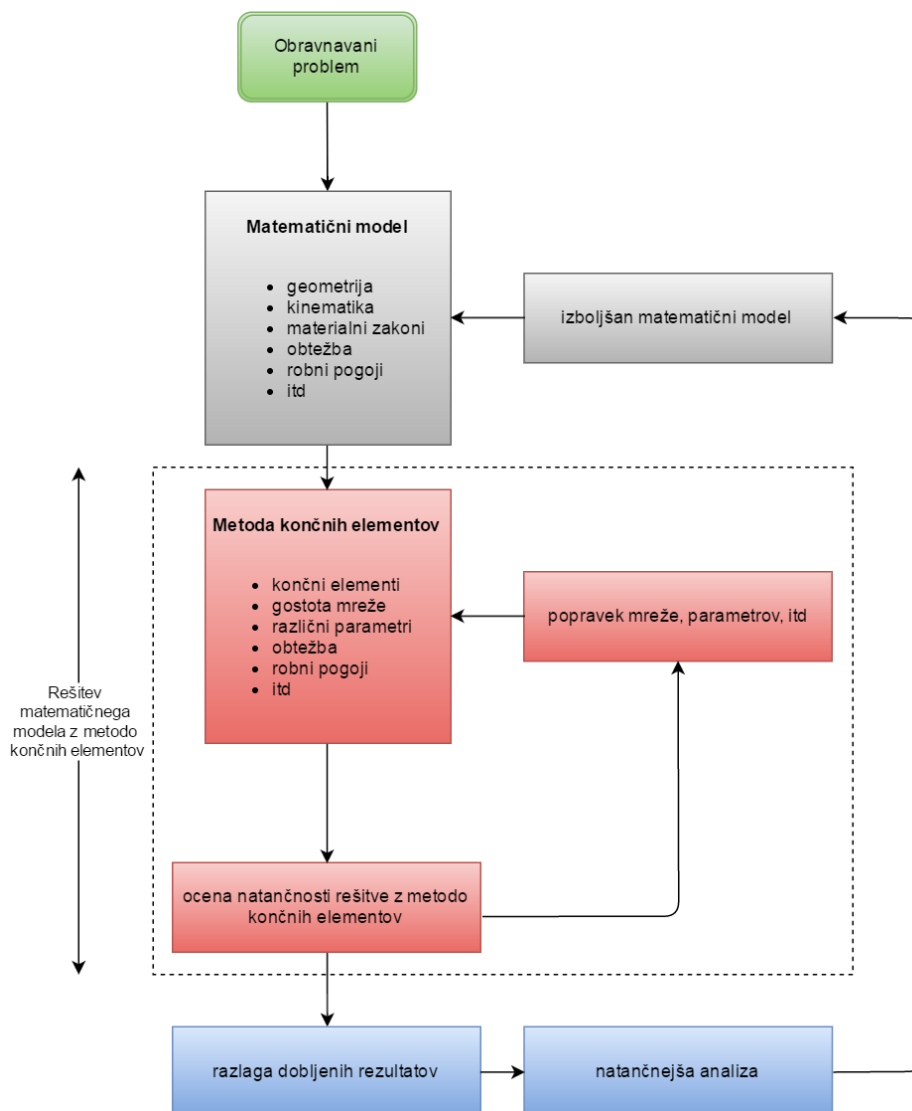


Slika 14: 1D, 2D in 3D končni elementi

Metodo končnih elementov lahko na kratko opišemo z naslednjimi temeljnimi točkami [15]:

- 1.) Območje problema razdelimo na končne elemente (majhni, enostavni deli),
- 2.) Iskano funkcijo  $y(x)$  znotraj vsakega končnega elementa aproksimiramo z neko preprosto funkcijo  $u(x)$ ,
- 3.) Funkcija  $u(x)$  je odvisna od vrednosti iskane funkcije  $y(x)$  v vozliščih končnih elementov,

- 4.) Z integriranjem funkcije  $u(x)$  znotraj vsem končnih elementov ter s seštevkom vseh delnih integralov, izračunamo približno vrednost funkcionala,
- 5.) Približna vrednost funkcionala je odvisna le od vrednosti neznane funkcije v vozliščih, zato spreminjamo vrednosti potenciala toliko časa, da dosežemo minimalno vrednost funkcionala.



**Slika 15: Shema obravnave problema z metodo končnih elementov**

V nadaljevanju bo predstavljeno reševanje enačbe gibanja elastičnega telesa s pomočjo metode končnih elementov.



#### 4.1 Reševanje 1D valovanja v elastičnem mediju s pomočjo metode končnih elementov [12]

Vzemimo elastičen izotropen medij z dolžino  $H$ , ki je nepomično podprt na svojem desnem robu (pri  $x_1 = H$ ).

Pri  $x_1 = 0$  je izpostavljen naslednjemu napetostnemu pogoju

$$\sigma_{11}(0, t) = \bar{p}(t), \quad (4.1)$$

kjer je  $\bar{p}(t)$  predpisana funkcija po času. Napetost  $\sigma_{11}$  lahko zapišemo z upoštevanjem polja pomikov kot

$$\sigma_{11} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_1}{\partial x_1}. \quad (4.2)$$

Nadalje lahko oba robna pogoja zapišemo z naslednjima enačbama

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_1}{\partial x_1}(0, t) = \bar{p}(t), \quad (4.3)$$

$$u_1(H, t) = 0. \quad (4.4)$$

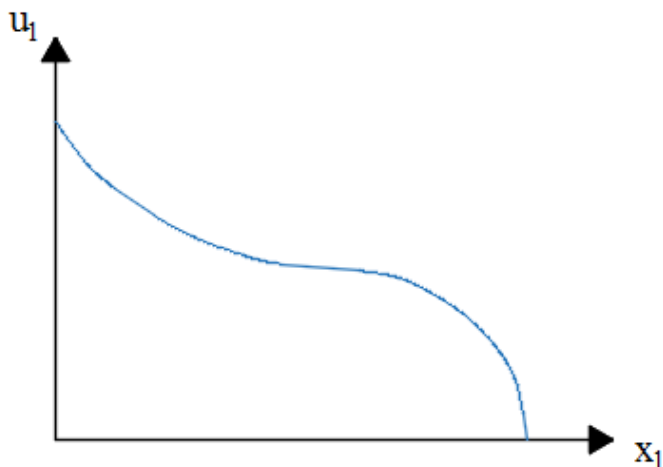
Imamo problem eno-dimenzionalnega valovanja, ki ga opisuje spodnja enačba

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2}, \quad (4.5)$$

kjer je  $\alpha$  hitrost valov.

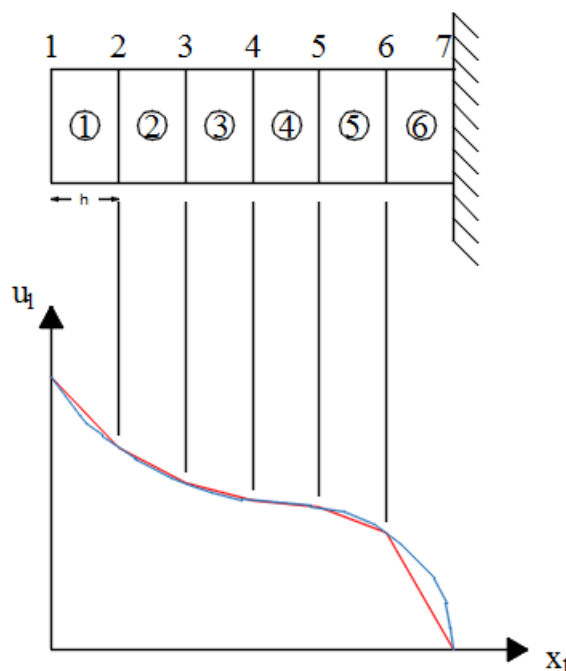
Cilj je, da z upoštevanjem obeh robnih pogojev rešimo zgornjo enačbo in dobimo polje pomikov  $u_1(x_1, t)$ .

Vzemimo, da je polje pomikov takšno, kot ga prikazuje slika 16.



Slika 16: Porazdelitev pomikov  $u_1$  pri času  $t$ .

Da pridemo do osnove, ki jo uporabimo pri metodi končnih elementov, moramo obravnavano domeno diskretizirati v  $n$  –končnih elementov, ki so dolžine  $h = H/n$ . Iskano funkcijo znotraj vsakega končnega elementa aproksimiramo z linearno funkcijo. To pomeni, da iskano polje pomikov aproksimiramo z neprekinjeno, odsekoma linearno funkcijo (slika 17). S povečevanje števila končnih elementov zmanjšujemo napako, ki jo naredimo zaradi približka z linearno funkcijo. Zavedati pa se moramo, da se s povečanjem števila elementov podaljša čas računanja, in zato je potrebno premisliti, kakšna natančnost izračuna nam je pri določenem problemu potrebna.



Slika 17: Aproximacija pomikov  $u_1$  pri času  $t$  s 6-imi končnimi elementi.

Ključni korak pri metodi končnih elementov je uvedba osnovne funkcije, ki opisuje potek pomikov znotraj vsakega končnega elementa. Izbira osnovnih funkcij je odvisna od problema, ki ga obravnavamo. Za naš problem se običajno uporabljajo funkcije, ki so prikazane na sliki 18. Te funkcije imajo vrednost 1 v enem izmed vozlišč, medtem ko imajo v ostalih vozliščih vrednost 0. Če označimo funkcije z oznakami  $B_i$ , kjer  $i$  teče od 1 pa do  $N$ , lahko pomik  $u_1(x_1, t)$  izrazimo z naslednjo enačbo

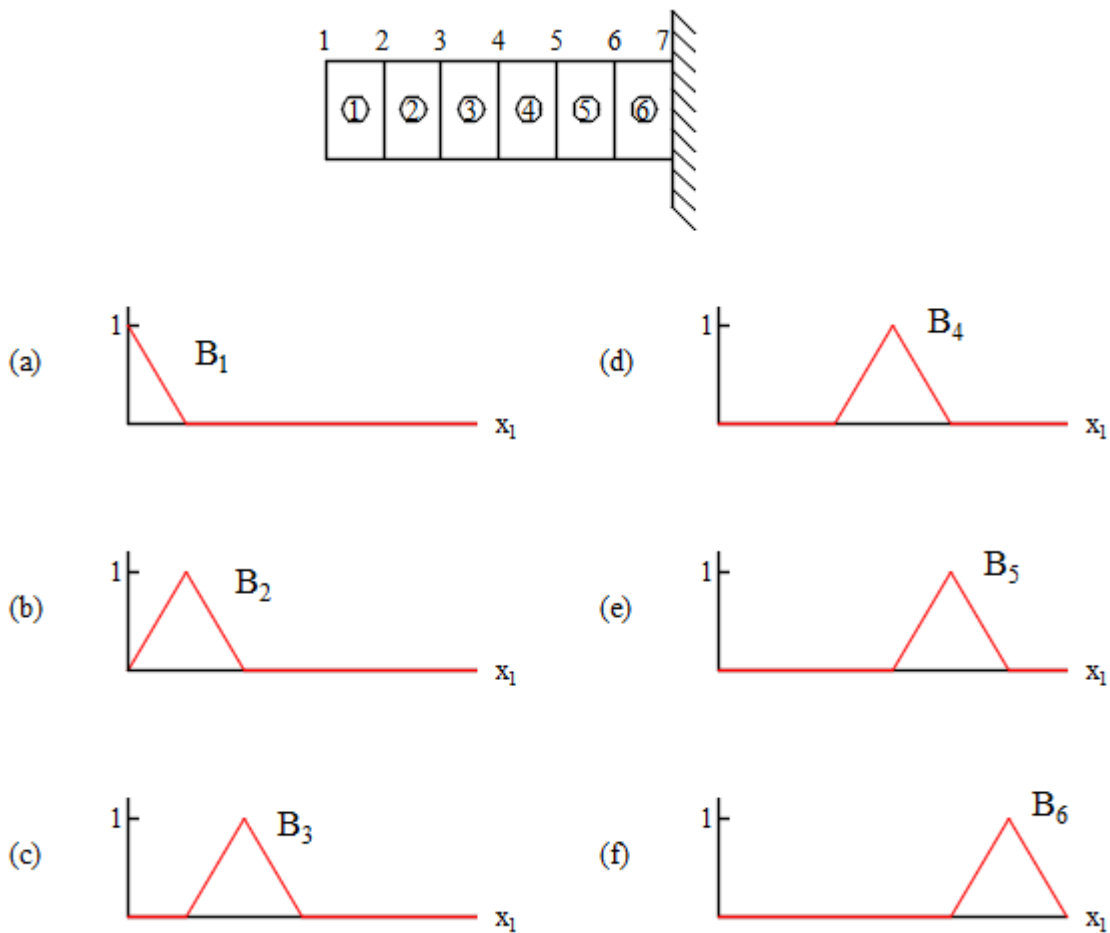
$$u_1 = \sum_{i=1}^N d_i B_i, \quad 0 \leq x_1 \leq H, \quad (4.6)$$

kjer so koeficienti  $d_i$  odvisni samo od časa.  $N$  je število nepodprtih vozlišč (6 v našem primeru, glej sliko 17). Ti koeficienti predstavljajo vrednosti pomikov v vozliščih in skupaj z osnovnimi funkcijami sestavljajo neprekinjeno, odsekoma linearno porazdelitev pomikov po obravnavanem območju.

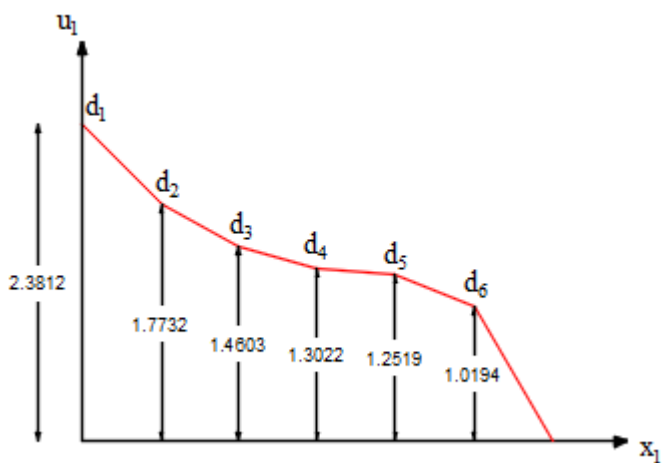
Aproximacijo pomikov v času  $t$  za primer na sliki 17 opišemo kot

$$u_1 = 2.3812B_1 + 1.7732B_2 + 1.4603B_3 + 1.3022B_4 + 1.2519B_5 + 1.0194B_6,$$

kar je tudi prikazano na sliki 19. Če želimo dobiti približno rešitev polja pomikov obravnavanega problema, moramo določiti koeficiente  $d_i$  v vsakem časovnem koraku.



Slika 18: Osnovne funkcije



Slika 19: Koeficienti  $d_i$  za obravnavan primer.

Analitična rešitev problema ni vedno možna. To posebno velja v primerih, ko imamo kompleksne domene, stike različnih materialov, itd. Poleg tega so zahteve po zveznosti polja spremenljivk stroge in robnih pogojev ni vedno mogoče natančno upoštevati. Da bi se izognili zgornjim težavam, uvedemo šibko obliko enačbe, ki je osnova za rešitev po metodi končnih elementov.

Naj bo  $w(x_1)$  funkcija, ki je na nepomično podprtem robu obravnavanega primera enaka nič:

$$w(H) = 0. \quad (4.7)$$

V nadaljevanju pomnožimo enačbo  $\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2}$  s funkcijo  $w(x_1)$  in integriramo po območju  $x_1 \in [0, H]$ :

$$\rho_0 \int_0^H \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} w \, dx_1 = (\lambda + 2\mu) \int_0^H \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} w \, dx_1. \quad (4.8)$$

Z uporabo spodnjega izraza

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} w \right) = \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} w + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \frac{dw}{dx_1}. \quad (4.9)$$

in integracije "per partes" za desno stran enačbe, dobimo naslednjo enačbo

$$\rho_0 \int_0^H \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} w \, dx_1 = (\lambda + 2\mu) \left[ \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} w \right]_0^H - (\lambda + 2\mu) \int_0^H \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \frac{dw}{dx_1} \, dx_1. \quad (4.10)$$

Z upoštevanjem pogojev  $w(H) = 0$  in  $(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_1}{\partial x_1}(0, t) = \bar{p}(t)$  lahko zgornjo enačbo zapišemo v naslednji obliki

$$\rho_0 \int_0^H \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} w \, dx_1 = -\bar{p}(t)w(0) - (\lambda + 2\mu) \int_0^H \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \frac{dw}{dx_1} \, dx_1. \quad (4.11)$$

To obliko zapisa imenujemo šibka oblika obravnavanega problema.

Za reševanje šibke oblike enačbe z metodo končnih elementov potrebujemo že zgoraj predstavljen zapis z osnovnimi funkcijami. Funkcijo  $w(x_1)$  prav tako izrazimo z osnovnimi funkcijami, razlika je v tem, da so koeficienti  $c_m$  poljubni. S tem zagotovimo, da bo funkcija  $w(x_1)$  enaka nič na mestu podprtja.

$$w(x_1) = c_m B_m \quad (4.12)$$

V nadaljevanju lahko z upoštevanjem osnovnih funkcij šibko obliko problema izrazimo kot

$$\rho_0 \int_0^H \frac{d^2 d_m}{dt^2} B_m c_k B_k dx_1 = -\bar{p}(t) c_k \delta_{k1} - (\lambda + 2\mu) \int_0^H d_m \frac{dB_m}{dx_1} c_k \frac{dB_k}{dx_1} dx_1. \quad (4.13)$$

Kronecker-jev delta  $\delta_{k1}$  smo uporabili, ker je pri  $w(0)$   $B_1$  edina osnovna funkcija, ki ni enaka 0. Če uvedemo konstante

$$M_{km} = \rho_0 \int_0^H B_k B_m dx_1, \quad (4.14)$$

$$K_{km} = (\lambda + 2\mu) \int_0^H \frac{dB_k}{dx_1} \frac{dB_m}{dx_1} dx_1, \quad (4.15)$$

$$f_k = -\bar{p}(t) \delta_{k1}, \quad (4.16)$$

lahko šibko obliko zapišemo kot

$$\left( M_{km} \frac{d^2 d_m}{dt^2} + K_{km} d_m - f_k \right) c_k = 0. \quad (4.17)$$

Zgoraj smo že zapisali, da so koeficienti  $c_k$  poljubni, zato bo sistem enačb enolično rešljiv samo, če bo izraz znotraj oklepaja enak nič

$$M_{km} \frac{d^2 d_m}{dt^2} + K_{km} d_m = f_k, \quad \text{za } k, m = 1, 2, \dots, N. \quad (4.18)$$

Zgornjo enačbo lahko zapišemo tudi v matrični obliki

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{d}}{dt^2} + \mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{f}, \quad (4.19)$$

kjer sta matriki  $\mathbf{M}$  in  $\mathbf{K}$  konstantni ( $\mathbf{K}$  je konstantna za geometrijsko linearne probleme, ki so tema te naloge). Matrika  $\mathbf{M}$  predstavlja masno matriko, matrika  $\mathbf{K}$  pa togostno matriko. Z  $\mathbf{d}$  in  $\mathbf{f}$  smo označili vektor pomikov v vozliščih oziroma vektor obtežbe. Linearni sistem enačb rešimo numerično.

Matriki  $\mathbf{M}$  in  $\mathbf{K}$  imata obliko

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N1} & \cdots & M_{NN} \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & \cdots & K_{NN} \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

vektor  $\mathbf{f}$  pa

$$\mathbf{f} = -\bar{p}(t) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

## 4.2 Eksplicitna dinamična analiza

Rešitev zgornje dinamične enačbe dobimo z integriranjem enačb gibanja po času. Na voljo imamo dinamični integracijski shemi, ki sta poznani kot eksplicitna oziroma implicitna integracijska shema. Pri obravnavi našega problema smo uporabili eksplicitno dinamično analizo. To je matematična tehnika, ki uporablja centralni diferencialni operator [15]

$$\dot{\mathbf{d}}^t = \frac{\mathbf{d}^{t+\Delta t} - \mathbf{d}^{t-\Delta t}}{2\Delta t}, \quad \ddot{\mathbf{d}}^t = \frac{\mathbf{d}^{t+\Delta t} - 2\mathbf{d}^t + \mathbf{d}^{t-\Delta t}}{\Delta t^2}. \quad (4.23)$$

Ob upoštevanju zgornjih dveh enačb lahko ravnotežno enačbo zapišemo v naslednji obliki [15]

$$\mathbf{d}^{t+\Delta t} = 2\mathbf{d}^t - \mathbf{d}^{t-\Delta t} + \Delta t^2 \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}^t - \mathbf{K}\mathbf{d}^t) \quad (4.24)$$

kjer imamo na levi strani pomike pri novem času (ki jih iščemo), na desni strani pa same znane količine. Uporabimo diagonalizirano masno matriko  $\mathbf{M}$  [15].

Eksplicitna dinamična analiza je pogojno stabilna metoda, zato moramo določiti največji še stabilni časovni korak  $\Delta t$ . Ta je odvisen od dolžine elementa  $h$ , elastičnega modula  $E$  in gostote  $\rho_0$ . Največji še stabilni časovni korak izračunamo po naslednji enačbi [15]

$$\Delta t \leq \frac{h}{\sqrt{E/\rho_0}}, \quad (4.25)$$

ki označuje čas v katerem valovna fronta prepotuje dolžino končnega elementa.



## **5 DOLOČITEV GLOBINE RAZPOK V BETONSKEM ELEMENTU**

V tem poglavju bo predstavljen obravnavani primer ter izvedba eksperimenta. Nato se bomo posvetili modeliranju problema po metodi končnih elementov s pomočjo programa Abaqus, zaključili pa bomo z analizo rezultatov.

### **5.1 Opis problema**

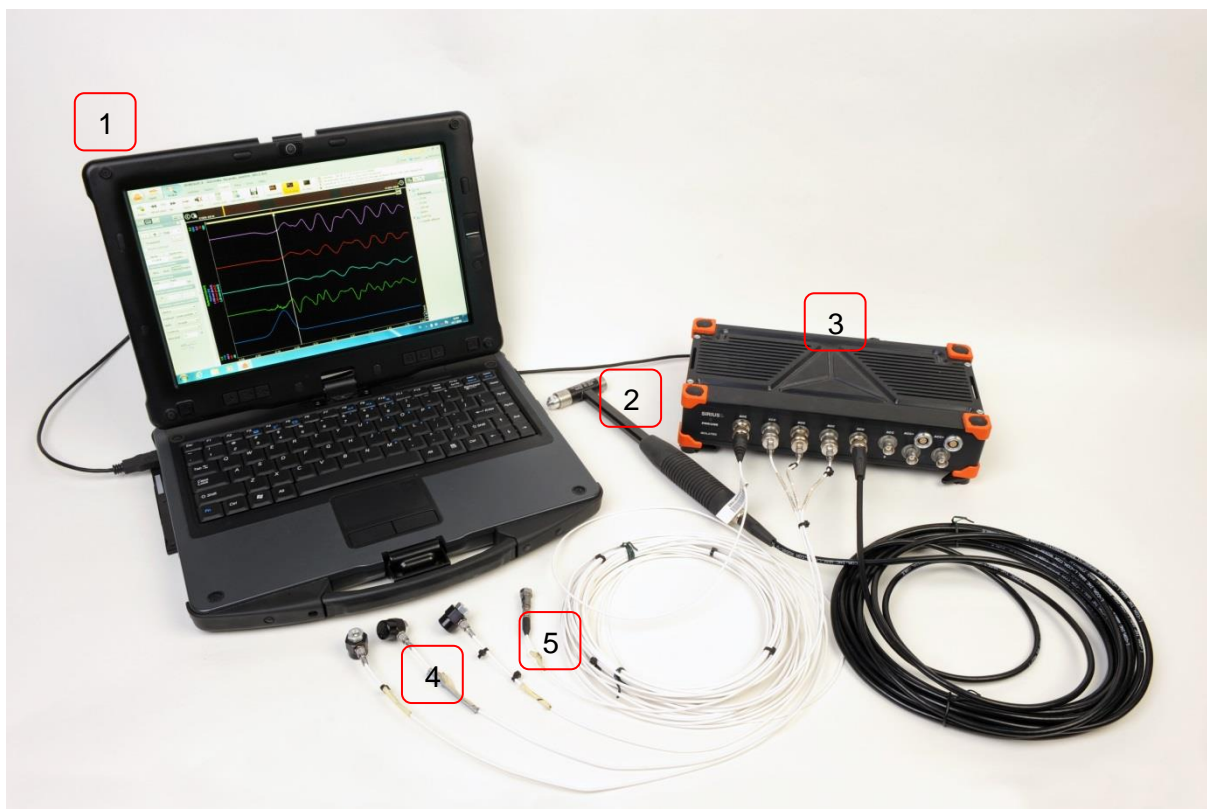
V času življenjske dobe objekta nanj delujejo najrazličnejše vrste direktnih (lastna teža, nekonstruktivni elementi, naravni vplivi, udarci vozil, ...) in indirektnih obtežb (vsiljene deformacije). Ti vplivi pustijo posledice na konstrukciji v različnih oblikah poškodb, ki imajo lahko velik vpliv na življenjsko dobo samega objekta in lahko posredno ogrožajo uporabnika. Med vsemi oblikami poškodb so najpogostejše razpoke. Te so lahko vidne na površini objekta ali pa so nevidne v notranjosti konstrukcijskega elementa.

Izbrani problem te magistrske naloge so površinske razpoke. Te se pojavljajo v različnih oblikah, širinah in globinah ter s tem odpirajo pot v notranjost elementa. Določitev globine razpoke je bistveno težavnejša od določitve širine razpoke. Z uporabo nedestruktivnih metod je mogoče neposredno izmeriti oziroma oceniti globino in s tem razširiti nabor pridobljenih podatkov. Informacija o globini razpoke je zelo pomembna, saj pomaga oceniti ogroženost območij v konstrukcijskih elementih oziroma z rednim evidentiranjem določiti njen razvoj.

### **5.2 Izvedba preiskave z Impact Echo metodo**

#### **5.2.1 Oprema**

Pri izvedbi meritev globin razpok z metodo Impact Echo sem uporabili različne opreme ter merilne naprave za zajem ter obdelavo meritev. Začetni udarec je bil izveden s PCB 086c01 impulznim kladivom. Za merjenje signalov sem uporabil štiri pospeškomere. Referenčni signal sem zajemal s PCB 352c68 pospeškomerom, za preostale tri signale pa sem uporabil pospeškomere KISTLER 8636c5. Vse uporabljene merilne naprave so bile preko ojačevalnika in analogno digitalnega pretvornika DEWESoft SIRIUS povezane na računalnik. Za zajem in prikaz rezultatov sem uporabil program DEWESoft X2, za obdelavo rezultatov pa program Matlab.

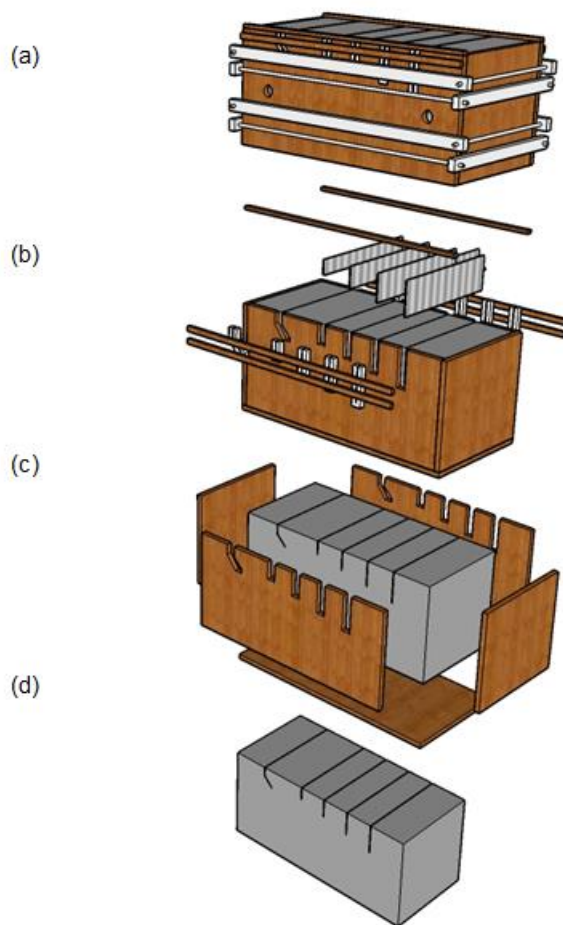


**Slika 20: Prikaz opreme: 1) računalnik, 2) PCB 086c01 impulzno kladivo, 3) ojačevalnik SIRIUS, 4) pospeškometri KISTLER 8636c5 in 5) pospeškometer PCB 352c68.**

Vsi testi so bili izvedeni junija 2016 v Laboratoriju za konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo Slovenije v Ljubljani.

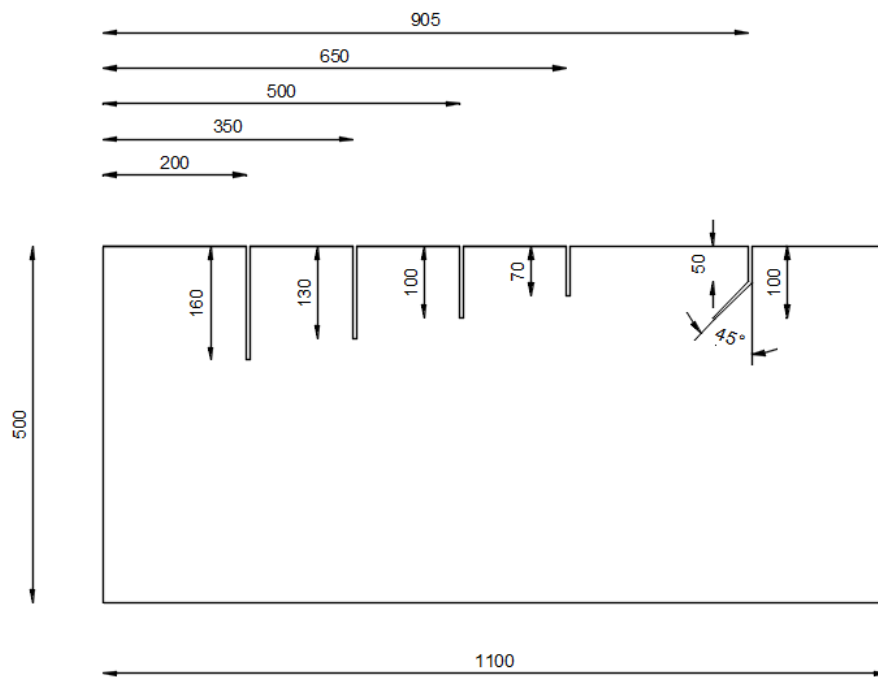
### 5.2.2 Priprava vzorcev

Za meritev globine razpok smo pripravili dva betonska vzorca z razpokami. Vzorca sta bila velikost 50 cm × 50 cm × 110 cm, razpoke pa smo pripravili s pomočjo različnih pločevin debeline 5 mm. Te je bilo potrebno, zaradi zmanjšanja sprijemosti z betonom, namazati z oljem. Po nekaj urah po vgradnji betona, smo plošče izvlekli iz opaža. Potek priprave vzorcev je prikazan na sliki 21.

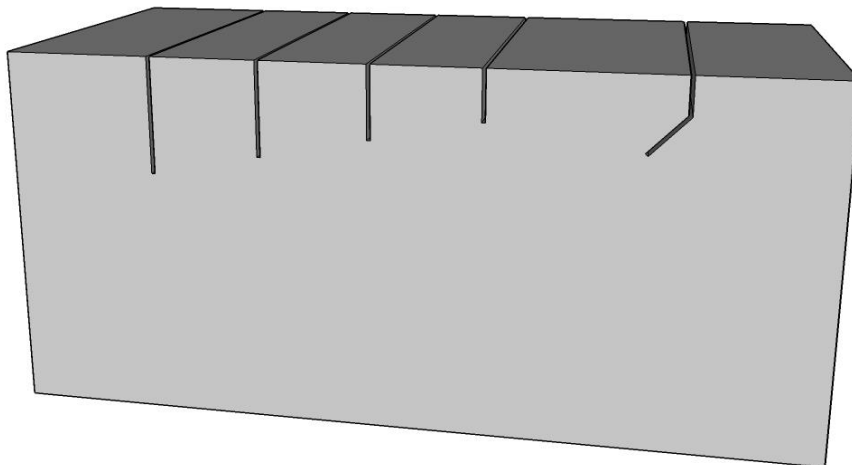


**Slika 21: Primer poteka priprave vzorca: (a) priprava opaža in ulivanje betona, (b) po nekaj urah odstranimo pločevino, (c) razopaževanje (d) pripravljen vzorec**

Vzorec 1 vključuje sklop razpok, kjer posamezno obravnavamo štiri razpoke globin 160 mm, 130 mm, 100 mm in 70 mm, ter razpoko, ki do globine 50 mm poteka vertikalno, nato pa pod kotom 45° do globine 100 mm (sliki 22 in 23). Vzorec 2 obsega sklop razpok, kjer opazujemo tri verjetne realne dogodke: dve razpoki globin 100 mm in 115 mm v neposredni bližini, razpoka globine 100 mm, ki se konča tik pred dosegom armaturne mreže (os armaturne mreže je na globini 110 mm), in razpoka globine 100 mm, ki poteka preko armaturne mreže (os armaturne mreže je na globini 50 mm) (sliki 26 in 27). Vsaka razpoka ima svojo oznako, ki je oblike  $Vx - y - z$ , kjer  $x$  pomeni številko vzorca,  $y$  predstavlja globino razpoke, dodatne posebnosti pa napišemo na mesto  $z$ . Vse oznake in posebnosti so prikazane v tabeli 2.



**Slika 22: Vzdolžni prerez vzorca 1**



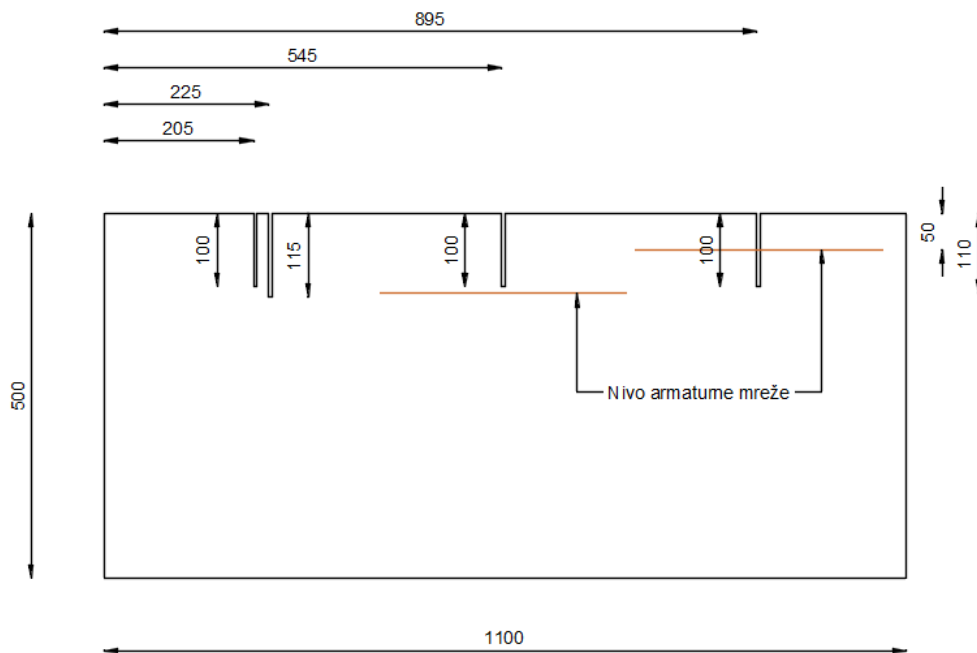
**Slika 23: Shematičen 3D prikaz vzorca 1**



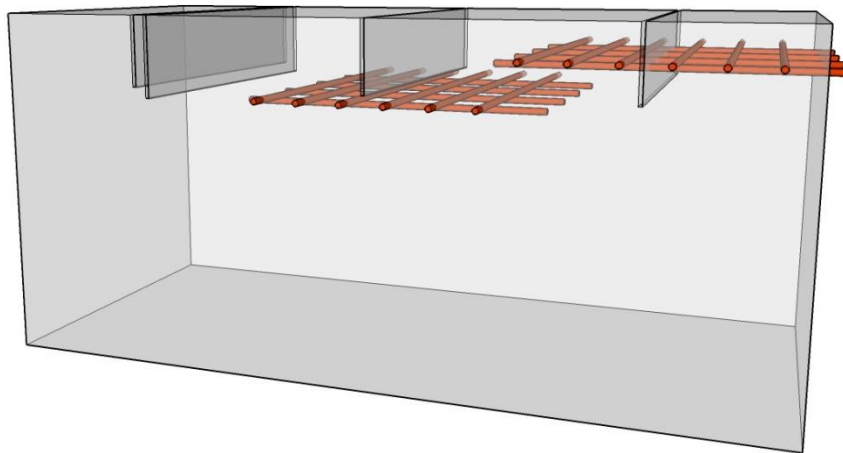
**Slika 24: Pripravljen opaž za vzorec 1**



**Slika 25: Vzorec 1 po odstranitvi pločevine**



**Slika 26: Vzdolžni prerez vzorca 2**



**Slika 27: Shematičen 3D prikaz vzorca 2**



**Slika 28: Pripravljen opaž za vzorec 2**



**Slika 29: Vzorec 2 po odstranitvi pločevine**

Tabela 2: Označevanje razpok (enote so mm)

Oznaka razpoke	Vzorec	Globina razpoke	Širina razpoke	Dodatno
V1-160	vzorec 1	160	5	/
V1-130		130	5	/
V1-100		100	5	/
V1-70		70	5	/
V1-100-45°		100	5	pod kotom 45°
V2-100-115	vzorec 2	100	5	razpoka v bližini, globina 115 mm
V2-100-A110		100	5	armaturna mreža na globini 110 mm
V2-100-A50		100	5	armaturna mreža na globini 50 mm

**Opomba:** V imenu razpoke se na prvem mestu pojavi vzorec (npr.: V1), na drugem mestu globina razpoke (npr.: 100), in na tretjem dodatne posebnosti (npr.: 45° - razpoka pod kotom 45°)

### 5.3 Določitev hitrosti

Hitrost valovanja v vzorcih sem izračunal iz izmerjenih lastnih frekvenc nihanja plošče po naslednji enačbi [1]

$$c_p = \frac{2Tf_{max}}{0.96}, \quad (5.1)$$

kjer je  $T$  debelina plošče in  $f_{max}$  izmerjena lastna frekvenca nihanja plošče. Enačba opisuje širjenje valovne fronte v plošči. Frekvenca pulzev je določena s časom prihoda dveh



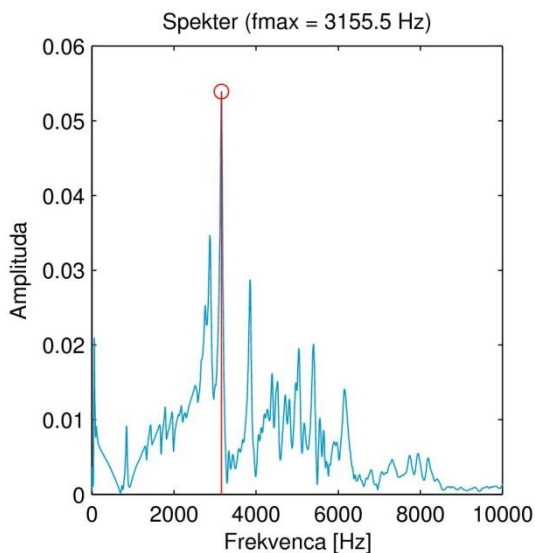
zaporednih odbojev med ploskvama in zato neposredno povezana s hitrostjo širjenja valovanja.

**Tabela 3: Izračun hitrosti za vzorec 1**

Vzorec 1			
Merilno mesto	$f_{max}$ [Hz]	$T$ [m]	$c_p$ [m/s]
1	3125	0.5	3255
2	3125	0.5	3255
3	3155,5	0.5	3281
4	3100	0.5	3229
Povprečno			3255

**Tabela 4: Izračun hitrosti za vzorec 2**

Vzorec 2			
Merilno mesto	$f_{max}$ [Hz]	$T$ [m]	$c_p$ [m/s]
1	3125	0,50	3255
2	3100	0,50	3229
3	3150	0,50	3280
4	2950	0,47	3270
Povprečno			3258

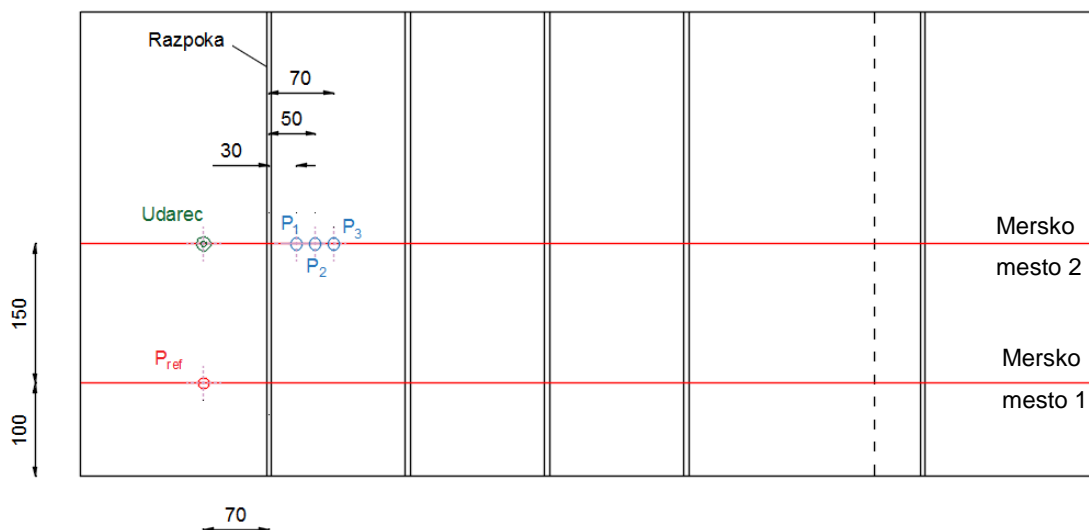


**Slika 30: Primer izmerjenega spektra**

#### 5.4 Potek meritev

Globino posamezne razpoke smo merili na dveh mestih, 100 mm in 250 mm od vzdolžnega roba vzorca kot je prikazano na sliki 31. Pri tem smo na strani udarca imeli postavljen referenčni pospeškometer na razdalji 150 mm od osi udarca ter 70 mm od roba razpoke, na nasprotni strani pa so signal zajemali trije pospeškometri, postavljeni v osi udarca na razdalji

30 mm, 50 mm in 70 mm od roba razpoke (sliki 31 in 32). Valovanje v vzorcih smo sprožili z impulznim kladivom na treh različnih mestih: 30 mm, 50 mm in 70 mm od roba razpoke. Zaradi zmanjšanja napake meritve se vsaka od meritev večkrat ponovi (v našem primeru več kot dvajsetkrat). Časovni korak zajemanja signalov je znašal  $5 \mu\text{s}$ .



Slika 31: Pozicija merilnih naprav glede na vzorec



**Slika 32: Primer postavitve merilnih naprav.**

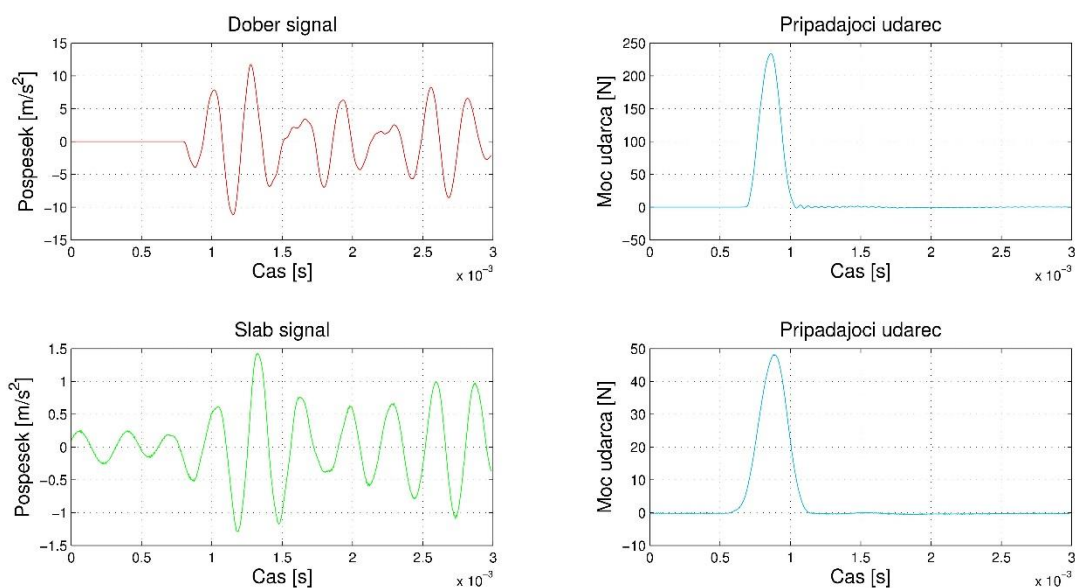
## **5.5 Obdelava signalov**

Pri obdelavi podatkov je ključnega pomena določitev časa prihoda P-valov iz dobljenih signalov. Zaradi velikega števila meritev smo si v programu Matlab pripravili orodje za obdelovanje signalov in izračun globin razpok.

### **5.5.1 Pregled podatkov**

Z orodjem v programu Matlab smo najprej pregledali podatke, ter odstranili tiste meritve, ki so bile zaradi topega udarca nepravilne. To se je zgodilo zaradi drobljenja materiala pod silo udarca. Na sliki 33 sta prikazana dober in slab signal ter pripadajoča udarca.

## Primer dobrega in slabega signala



Slika 33: Primer dobrega in slabega signala

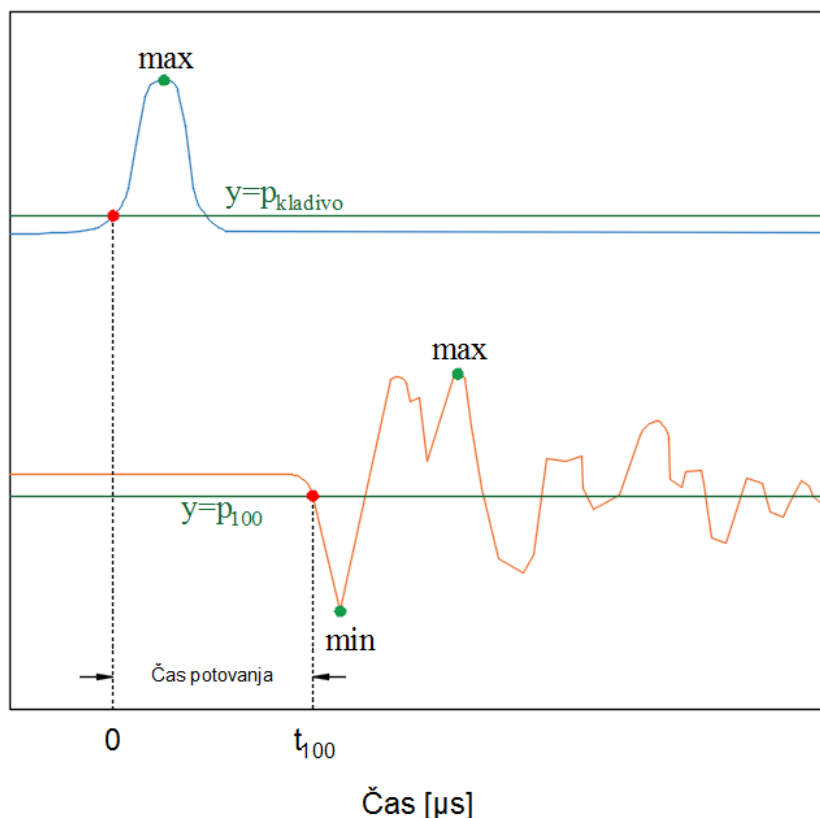
## 5.5.2 Branje podatkov

Po pregledu podatkov smo nadaljevali z odčitavanjem začetka meritev ter prihoda signalov. To je ključni korak obdelave. Da bi odčitavanje potekalo kar se da samodejno in hkrati robustno, je bil algoritem razvit tako, da se je oprl na relativno spremembo signala glede na določen odstotek največjega razpona signala. Pri tem so bile uporabljene naslednje oznake:

- $p_{kladivo}$ , ki predstavlja določen odstotek maksimalne vrednosti udarca,
- $p_{70}$ , ki predstavlja določen odstotek razlike maksimalne in minimalne vrednosti signala pri pospeškometeru na razdalji 70 mm od razpoke,
- $p_{50}$ , ki predstavlja določen odstotek razlike maksimalne in minimalne vrednosti signala pri pospeškometeru na razdalji 50 mm od razpoke ter
- $p_{30}$ , ki predstavlja določen odstotek razlike maksimalne in minimalne vrednosti signala pri pospeškometeru na razdalji 30 mm od razpoke.

Vse parametre smo najprej s poskušanjem določili z uporabo prvega sklopa meritev, tj. na razpoki globine 150 mm, na razdalji 100 mm od vzdolžnega roba vzorca. Izbrane vrednosti parametrov smo nato uporabili na vseh ostalih razpokah.

Parametri so predstavljali vrednost  $m$  v enačbi  $y = m$ . Navpični črti skozi prvo presečišče med definirano premico  $y = m$  in signalom označujeta začetek meritve oziroma prihod udarnega vala do sprejemnika (slika 34).



Slika 34: Shematičen prikaz določitve začetka meritve oziroma prihoda signala

Iz dobljenih odčitkov smo izračunali čas potovanja valov in nato globine. Edina sprememba, ki smo jo naredili v primerjavi s podanimi enačbo (2.8) v teoretičnem delu magistrske naloge, je, da smo za določitev časa potovanja valov uporabili signal kladiwa in ne signal referenčnega pospeškomera.

## 5.6 Rezultati laboratorijskega preizkusa

Rezultati laboratorijskega preizkusa so razdeljeni v dva sklopa. Prvi sklop zajema navpične površinske razpoke štirih različnih globin. Zaradi krčenja betona so bile dejanske razpoke nekoliko manjše od načrtovanih. Izmerjene globine vseh štirih razpok so znašale 149 mm, 119 mm, 88 mm in 58 mm. Širina razpok se je iz 5 mm povečala na 6 mm. Drugi sklop predstavljajo posebne konfiguracije razpok, katerih podrobna analiza presega okvire tega magistrskega dela.

### 5.6.1 5.6.1 Navpične razpoke

V tabeli 5 so predstavljeni vsi rezultati izračunanih globin za navpične razpoke. Tabela je razdeljena na dva dela. V prvem delu so vse informacije o obravnavani razpoki, tj. oznaka, izmerjena globina, mersko mesto in upoštevane meritve pri izračunu. V drugem delu so prikazane izračunane vrednosti globin za srednjo in maksimalno vrednost ter pripadajoči relativni napaki.

Kljub predhodnemu pregledu dobljenih podatkov se je še vedno pojavilo nekaj slabih signalov, ki so vplivali na končne rezultate. Rezultatov nismo dodatno obdelali, za globino razpoke smo upoštevali najpogostejšo vrednost v histogramu. V tabeli smo za primerjavo prikazali tudi rezultate za srednjo vrednost.

Po pričakovanjih lahko iz tabele 5 ugotovimo, da so relativne napake najmanjše pri najgloblji razpoki in največje pri razpoki z najmanjšo globino. Razlog za to je sorazmerno velika valovna dolžina, zaradi katere so absolutne napake podobnega velikostnega reda pri vseh razpokah, in manjša globina razpoke. Najmanjša relativna napaka najpogostejše vrednosti je znašala 1,3% pri razpoki V1-160, največja pa 26,1% pri razpoki V1-100. Ta rezultat precej odstopa od ostalih rezultatov pri razpoki V1-100, za kar je možnih več razlag.

Pri vsaki razpoki smo meritve izvajali na dveh mestih s čimer smo želeli preveriti občutljivost meritev glede mikrolokacije postavitve senzorjev. Hkrati smo s primerjavo teh rezultatov preverili raztros meritev. Z upoštevanjem vseh rezultatov povečujemo statistični vzorec, s čimer zmanjšujemo raztros. Povečanje števila meritev je edini način za zmanjšanje napake, saj je meritev časa obremenjena z več naključnimi napakami.

Za konec smo naredili primerjavo še med vsemi meritvami in meritvami, pri katerih ne upoštevamo udarca in sprejemnika na razdalji 70 mm od razpoke. To primerjavo smo želeli narediti zaradi priporočil v knjigi [1]. Priporočajo, naj se meritve izvajajo na razdalji 30 – 50 mm od razpoke. Pri treh razpokah od štirih smo zmanjšali napako najpogostejše vrednosti ali pa ostali na istem. Rezultati nakazujejo na to, da je priporočila dobro upoštevati. Kljub temu tudi meritve pri neoptimalni razdalji prispevajo k izboljšanju statistike.

Tabela 5: Rezultati meritev globine pri navpičnih razpokah

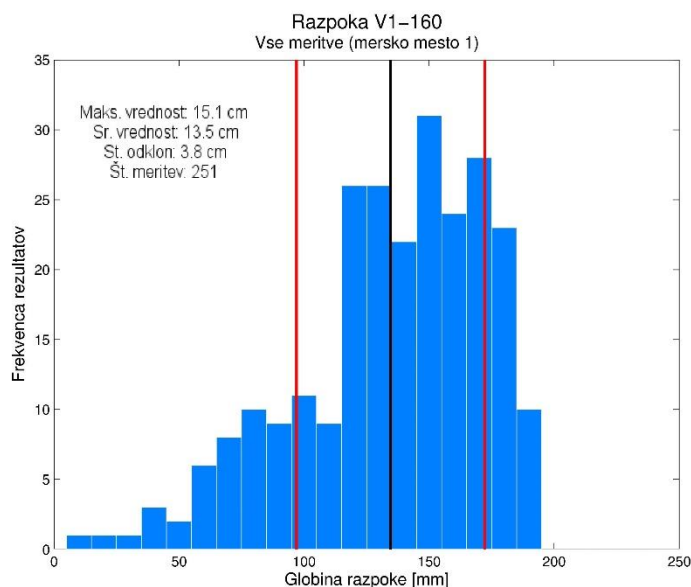
Oznaka razpoke	Izmerjena globina [mm]	Mesto meritve	Meritve	Izračunana globina [mm]			
				Srednja vrednost [mm]	Relativna napaka [%]	Maksimalna vrednost [mm]	Relativna napaka [%]
V1-160	149	1	Vse	135	9,4	151	1,3
		2	Vse	144	3,4	151	1,3
		1 in 2	Vse	140	6,0	151	1,3
			M70	140	6,0	161	8,0
V1-130	119	1	Vse	114	4,2	131	10,1
		2	Vse	114	4,2	131	10,1
		1 in 2	Vse	114	4,2	131	10,1
			M70	105	11,7	121	1,7
V1-100	88	1	Vse	73	17,0	91	3,4
		2	Vse	94	6,8	111	26,1
		1 in 2	Vse	82	6,8	91	3,4
			M70	78	11,3	91	3,4
V1-70	58	1	Vse	64	10,3	70	20,7
		2	Vse	69	18,9	70	20,7
		1 in 2	Vse	64	10,3	70	20,7
			M70	48	17,2	50	13,8

**Opomba:** »Vse« pomeni, da so bile upoštevane vse meritve, »M70« pomeni, da nismo upoštevali udarca in pospeškomera na razdalji 70 mm od razpoke.

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati meritev posameznih razpok. Pri vsaki razpoki je prikazan histogram za posamezno mersko mesto, za vse meritve in za vse meritve v primeru M70. Črna navpičnica na histogramu predstavlja srednjo vrednost, rdeča pa standardni odklon. Poleg tega je vsak histogram opremljen z izpisanimi rezultati za maksimalno vrednost, srednjo vrednost, standardni odklon in število meritev.

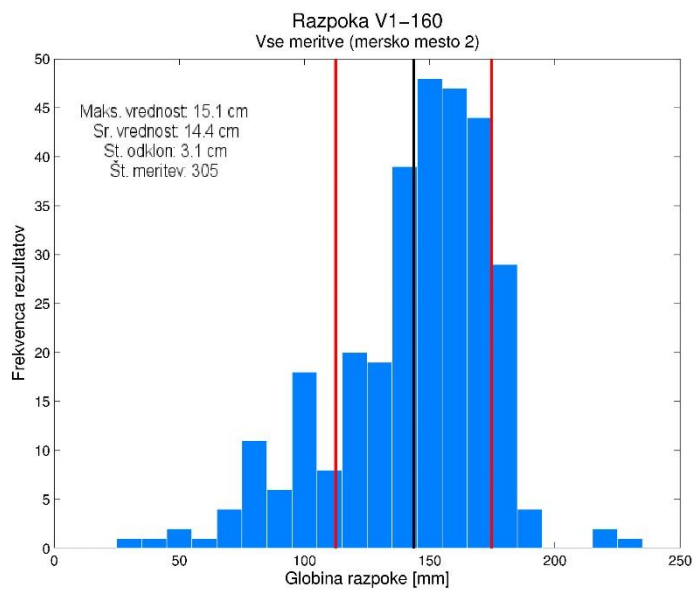
### **Razpoka V1-160:**

Vzorec pri razpoki V1-160 je obsegal 556 meritev. S primerjavo spodaj predstavljenih histogramov lahko vidimo, da so vsi asimetrični v levo. To pomeni, da se nagibajo v desno, in da so rezultati z nizkimi frekvencami, ki formirajo »rep«, v območju manjših globin. Vpliv teh rezultatov na srednjo vrednost in standardni odklon bi najverjetneje zmanjšali s povečanjem vzorca. Maksimalna vrednost vseh meritev znaša 151 mm in je enaka tudi pri meritvah na posameznem merskem mestu. Iz števila meritev na sliki 38 lahko vidimo, da smo v primeru M70 upoštevali slabih 60% meritev manj. Maksimalna vrednost se tako spremeni iz 151 mm na 161 mm.

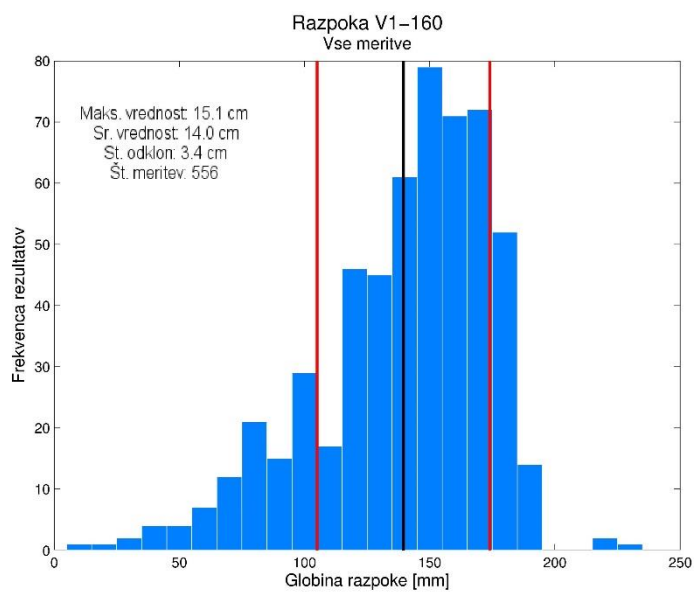


**Slika 35: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160 na merskem mestu 1.**

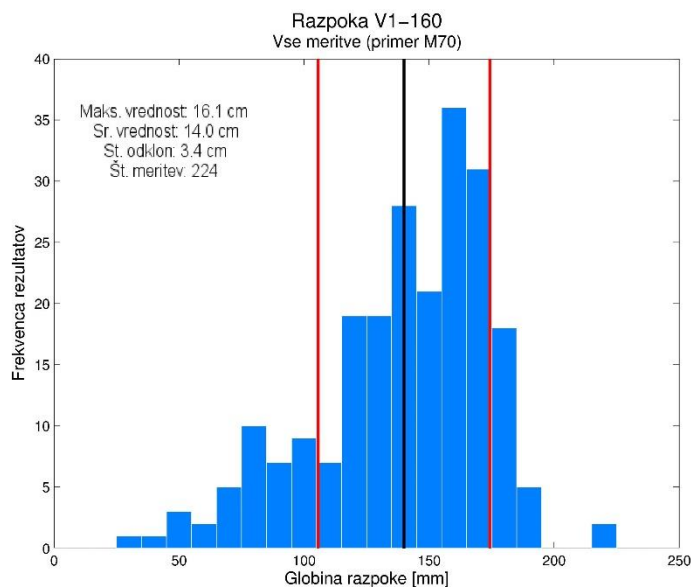




**Slika 36: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160 iz meritev na merskem mestu 2.**



**Slika 37: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160.**



**Slika 38: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-160 za primer M70.**

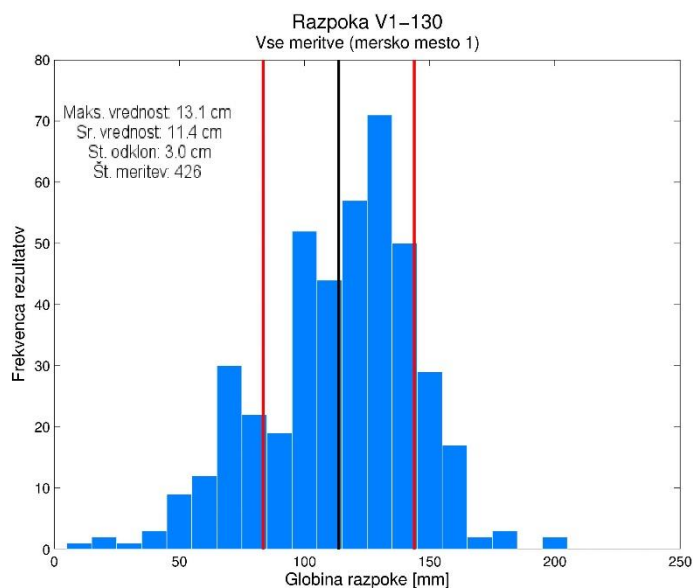
V tabeli 6 so prikazane izračunane globine razpoke V1-160, katere izmerjena globina znaša 149 mm. Vidimo lahko, da je relativna napaka za najpogostejšo vrednost na obeh merskih mestih enaka in znaša 1,3%. Tudi relativna napaka vseh upoštevanih meritev je enaka 1,3%. V primeru M70 pa se napaka poveča na 8,0%. Razlog za to je izguba slabih 60% meritev, ki so povzročili, da se je najpogostejša vrednost povečala iz 151 mm na 161 mm.

**Tabela 6: Rezultati izračunane globine razpoke V1-160.**

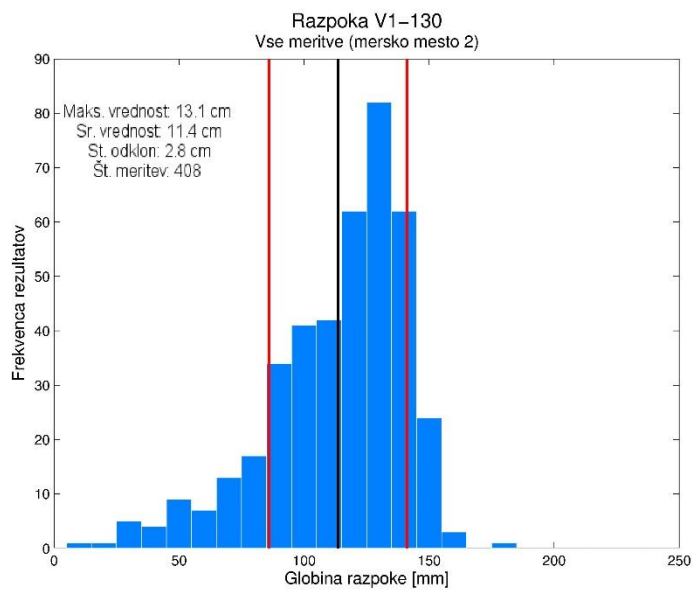
Oznaka razpoke	Izmerjena globina [mm]	Mesto meritve	Meritve	Izračunana globina [mm]			
				Srednja vrednost [mm]	Relativna napaka [%]	Maksimalna vrednost [mm]	Relativna napaka [%]
V1-160	149	1	Vse	135	9,4	151	1,3
		2	Vse	144	3,4	151	1,3
		1 in 2	Vse	140	6,0	151	1,3
			M70	140	6,0	161	8,0

**Razpoka V1-130:**

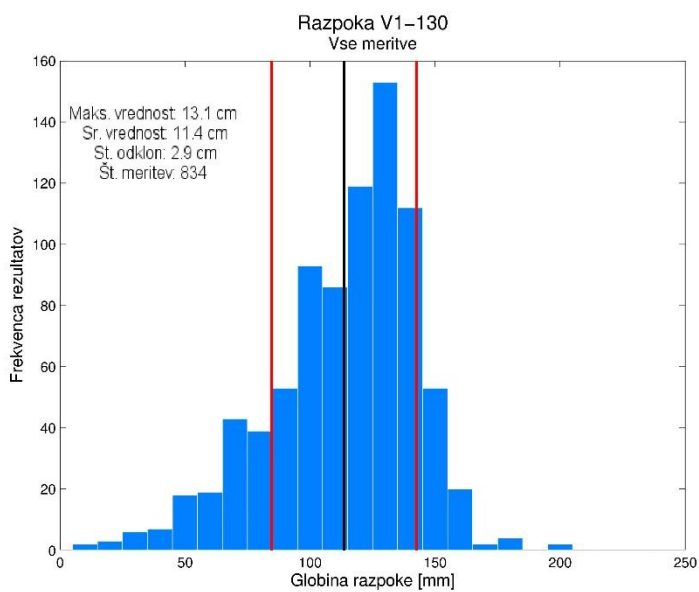
Pri razpoki V1-130 smo naredili 834 meritev. Histogrami te razpoke so tudi asimetrični v levo. Najpogostejša vrednost vseh meritev znaša 131 mm. Enak rezultat smo dobili tudi pri meritvah za posamezno mersko mesto. V primer M70 je najpogostejša vrednost za 7,6% manjša, vendar smo pri tem upoštevali slabih 54% meritev manj. Razpršenost podatkov je v vseh primerih približno enaka.



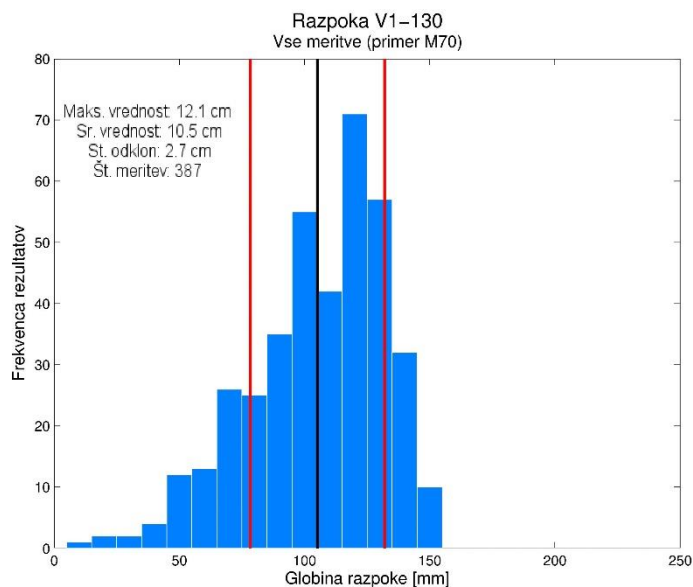
**Slika 39: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130 na merskem mestu 1.**



Slika 40: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130 na merskem mestu 2.



Slika 41: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130.



**Slika 42: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-130 za primer M70.**

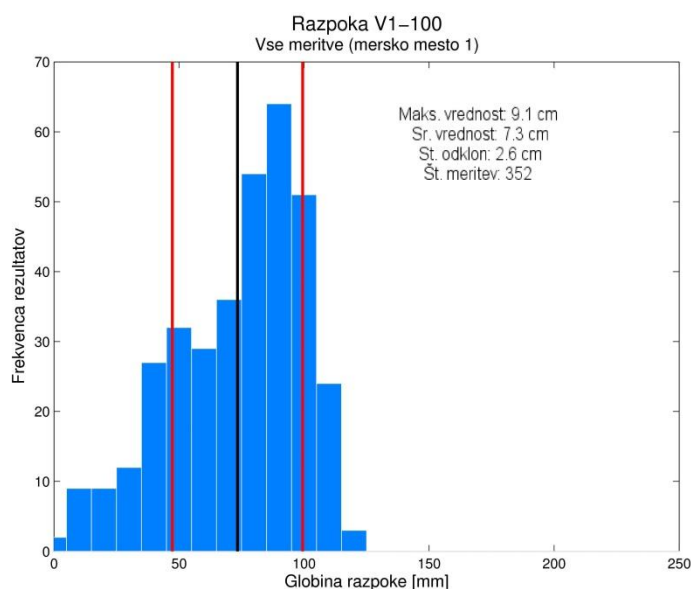
Izmerjena globina razpoke V1-130 znaša 119 mm. V tabeli 7 vidimo, da najpogostejša vrednost vseh meritev odstopa za 10,1% od izmerjene globine in znaša 131 mm. Enako velja za posamezni merski mesti. Ob upoštevanju primera M70 se napaka najpogostejše vrednosti zmanjša iz 10,1% na 1,7%. To nakazuje, da bi bilo smiselno izvajati meritve v območju 30 mm – 50mm od razpoke, vendar bi za potrditev morali opraviti še več meritev.

**Tabela 7: Rezultati izračunane globine razpoke V1-130.**

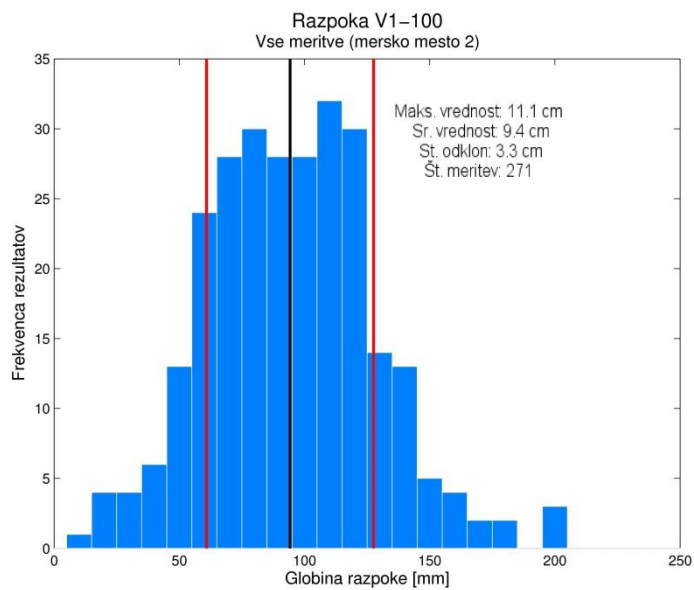
Oznaka razpoke	Izmerjena globina [mm]	Mesto meritve	Meritve	Izračunana globina [mm]			
				Srednja vrednost [mm]	Relativna napaka [%]	Maksimalna vrednost [mm]	Relativna napaka [%]
V1-130	119	1	Vse	114	4,2	131	10,1
			Vse	114	4,2	131	10,1
		1 in 2	Vse	114	4,2	131	10,1
			M70	105	11,7	121	1,7

**Razpoka V1-100:**

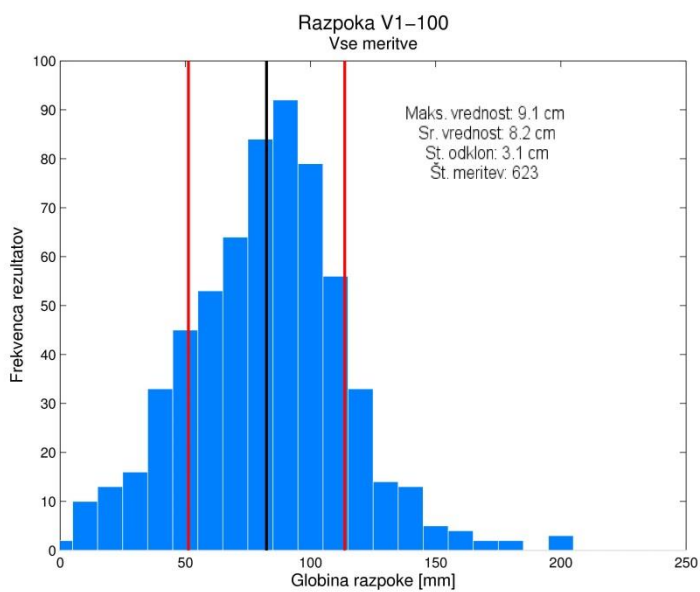
Pri razpoki globine 88 mm imamo 623 vseh meritev. Dobili smo večjo razliko med najpogostejšimi vrednostmi posameznih merskih mest. S primerjavo obeh histogramov vidimo, da imamo v drugem primeru 23% manj meritev in, da je histogram sploščen v območju najpogostejših vrednosti. Sklepamo, da bi z dodatnimi meritvami formirali konico in tako zmanjšali odstopanje, kar se nato lepo vidi na histogramu, kjer upoštevamo vse rezultate. Najpogostejša vrednost za vse meritve tako znaša 91 mm. V primeru M70 uporabimo slabih 55% manj podatkov in ne dobimo bistvenih izboljšav. Zmanjša se le razpršenost podatkov.



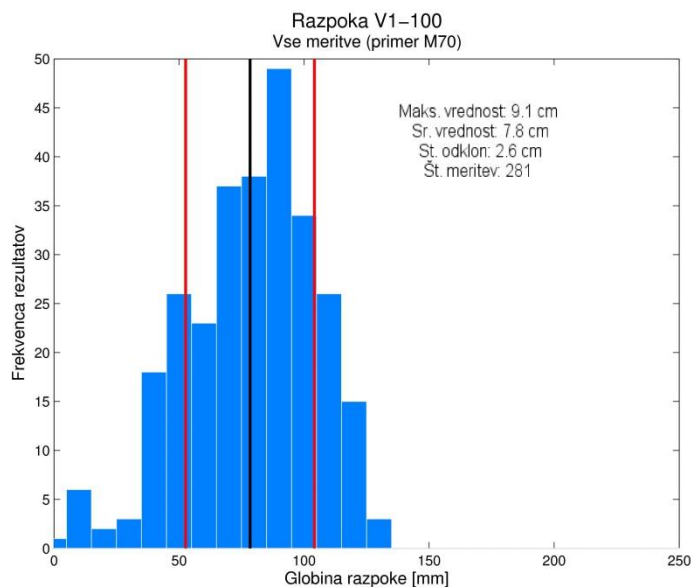
**Slika 43: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100 na merskem mestu 1.**



Slika 44: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100 na merskem mestu 2.



Slika 45: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100.



**Slika 46: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-100 v primeru M70.**

Izmerjena globina razpoke V1-100 znaša 88 mm. Iz primerjave rezultatov vseh upoštevanih meritev v tabeli 8 vidimo, da se večja odstopanja posameznih merskih mest zmanjšajo, ko jih združimo. Iz tega lahko domnevamo, da se s povečevanjem vzorca relativna napaka zmanjšuje. Pri 623 meritvah tako znaša 3,4% in ostane enaka tudi v primeru M70.

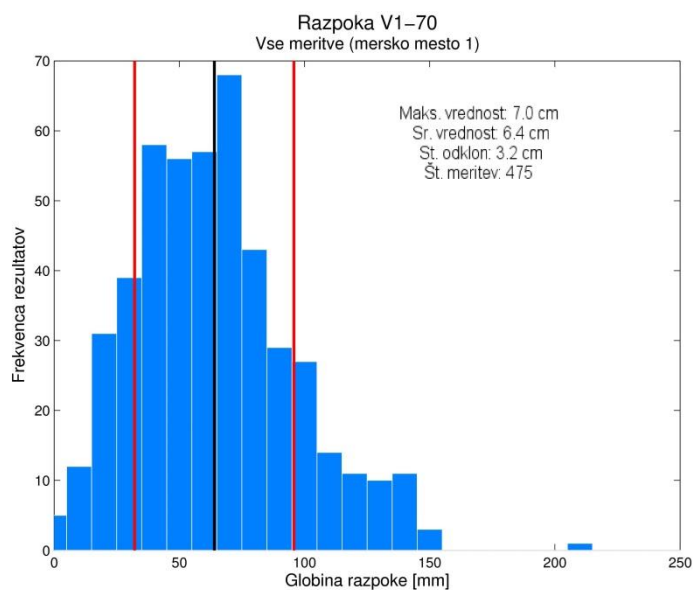
**Tabela 8: Rezultati izračunane globine razpoke V1-100.**

Oznaka razpoke	Izmerjena globina [mm]	Mesto meritve	Meritve	Izračunana globina [mm]			
				Srednja vrednost [mm]	Relativna napaka [%]	Maksimalna vrednost [mm]	Relativna napaka [%]
V1-100	88	1	Vse	73	17,0	91	3,4
		2	Vse	94	6,8	111	26,1
		1 in 2	Vse	82	6,8	91	3,4
			M70	78	11,3	91	3,4

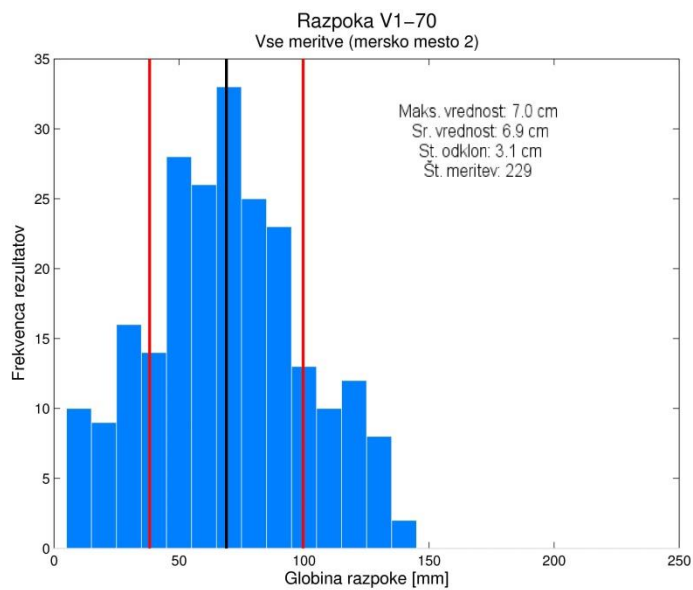


**Razpoka V1-70:**

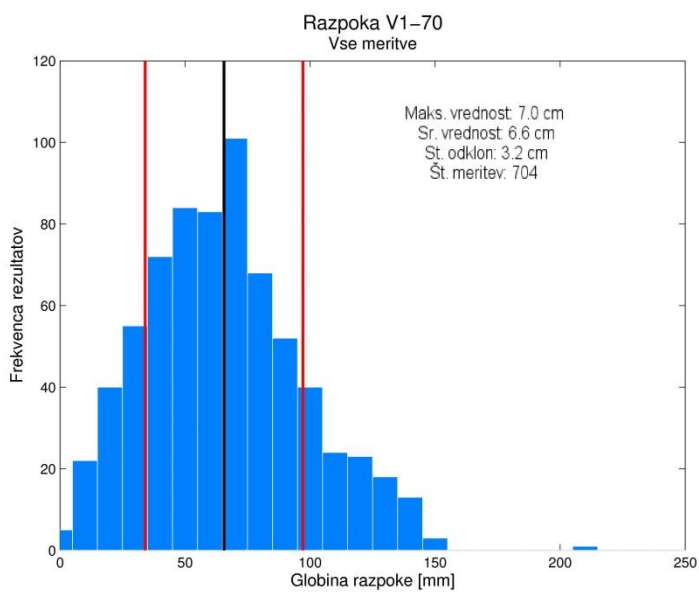
Pri razpoki V1-70 je bilo opravljenih 704 meritev. Najpogostejša vrednost le teh znaša 70 mm. Enaki vrednosti dobimo tudi za posamezno mersko mesto. Histograma na merskem mestu 1 in za vse meritve sta rahlo asimetrični v desno, v ostalih dveh primerih pa je nakazana simetrija. Pri upoštevanju primera M70 dobimo zmanjšanje najpogostejše vrednosti iz 70 mm na 50 mm. Pri tem se zmanjša tudi razpršenost rezultatov. Standardni odklon se zmanjša za približno 10 mm.



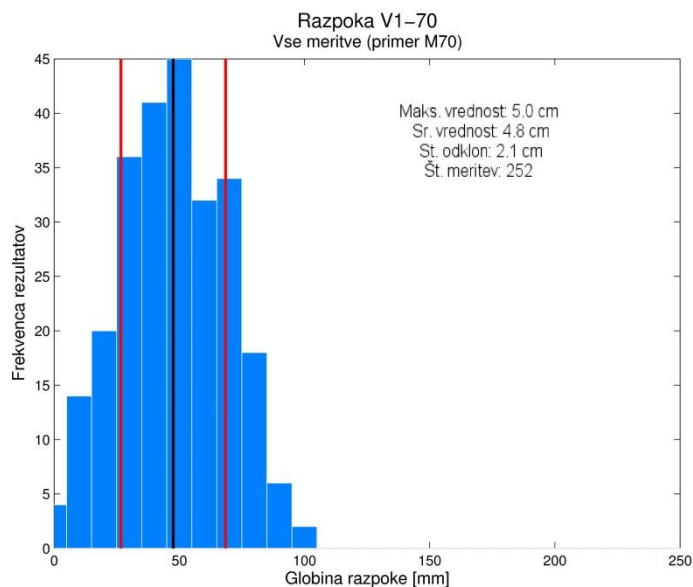
**Slika 47: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70 na merskem mestu 1.**



Slika 48: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70 na merskem mestu 2.



Slika 49: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70.



**Slika 50: Histogram vseh izračunanih globin razpoke V1-70 za primer M70.**

Pri razpoki z najmanjšo globino, ki je znašala 58 mm, smo pričakovano dobili največje relativne napake. Te znašajo za najpogostejšo vrednost od 13,8% pa do 20,7%. Pri upoštevanju primera M70 smo rezultate izboljšali. Relativna napaka se je zmanjšala iz 20,7% na 13,8%, vendar smo pri tem upoštevali 64% manj meritev.

**Tabela 9: Rezultati izračunane globine razpoke V1-70.**

Oznaka razpoke	Izmerjena globina [mm]	Mesto meritve	Meritve	Izračunana globina [mm]			
				Srednja vrednost [mm]	Relativna napaka [%]	Maksimalna vrednost [mm]	Relativna napaka [%]
V1-70	58	1	Vse	64	10,3	70	20,7
		2	Vse	69	18,9	70	20,7
		1 in 2	Vse	64	10,3	70	20,7
			M70	48	17,2	50	13,8

### 5.6.2 5.6.2 Razpoke s posebnostmi

Dodatna analiza razpok s posebnostmi presega okvire te magistrske naloge, zato bodo v tem poglavju rezultati samo tabelarično podani. Vsi dobljeni rezultati so predstavljeni v tabeli 10. Ta tabela je na enak način razdeljena in orientirana kot tabela 5 pri navpičnih razpokah.

Vse razpoke, razen V1-100-45°, so se nahajale na vzorcu 2. Obdelava podatkov je enaka kot pri navpičnih razpokah. To pomeni, da ni bilo nobenega dodatnega umerjanja, in da so vsi parametri ostali isti.

V tabeli 10 lahko takoj opazimo, da je raztros relativnih napak za najpogostejše vrednosti večji kot pri navpičnih razpokah. Najmanjša napaka znaša 0% pri razpoki V1-100-45°, največja pa 19% pri razpoki V2-100-115. Pri primerjavi rezultatov posameznih merskih mest se pojavljajo velika odstopanja. Za ta pojav ne poznamo vzroka. Morda je na to vplivala nehomogenost materiala, bližina roba vzorca ali pa kaj drugega. V primeru M70 pri vseh razpokah, z izjemo V2-100-115, dobimo manjše relativne napake.

Omenimo še, da napaka 0% pri razpoki V1-100-45° ni realen rezultat, saj je bil raztros meritev pri tej razpoki velik. V histogramu dobimo visoke frekvence rezultatov tudi na globinah 11 in 12 cm. Bolj realne rezultate bi dobili z večjim vzorcem.

Tabela 10: Rezultati meritev globine pri razpokah s posebnostmi

Oznaka razpoke	Izmerjena globina [mm]	Mesto meritve	Meritve	Izračunana globina [mm]			
				Srednja vrednost [mm]	Relativna napaka [%]	Maksimalna vrednost [mm]	Relativna napaka [%]
V2-100-115	110	1	Vse	120	9,0	131	19,0
		2	Vse	110	0,0	111	0,9
		1 in 2	Vse	115	4,5	131	19,0
			M70	105	4,5	131	19,0
V2-100-A110	95	1	Vse	103	8,4	96	1,1
		2	Vse	118	24,2	121	27,4
		1 in 2	Vse	110	15,7	111	16,8
			M70	93	2,1	101	6,3
V2-100-A50	102	1	Vse	113	10,8	131	28,4
		2	Vse	103	0,97	101	0,98
		1 in 2	Vse	108	5,9	111	8,8
			M70	93	8,8	101	0,98
V1-100-45°	101	1	Vse	116	14,9	171	67,6
		2	Vse	115	13,9	121	19,8
		1 in 2	Vse	116	14,9	101	0,0
			M70	91	9,8	101	0,0

**Opomba:** »Vse« pomeni, da so bile upoštevane vse meritve, »M70« pomeni, da nismo upoštevali udarca in pospeškomera na razdalji 70 mm od razpoke.

## 5.7 Simulacija eksperimenta v računalniškem programu Abaqus

Za simulacijo izvedenega laboratorijskega preizkusa smo uporabili komercialni računalniški program, ki je primeren za izvajanje analiz s končnimi elementi. Omogoča preverjanje novih zamisli, analizo konstrukcij in simulacije. Uporablja se v avtomobilski, letalski in vesoljski industriji, gradbeništvu, itd. Program je priljubljen tudi med akademskimi in raziskovalnimi institucijami, saj omogoča širok spekter uporabe in zmožnosti. Sam program je sestavljen iz petih programskih produktov

- **Abaqus/CAE** je produkt, s katerim lahko ustvarimo model. Ponuja nam tudi možnost, da sam model uvozimo iz CAD programov. Sam vmesnik nam omogoča upravljanje z najrazličnejšimi ukazi od ustvarjanja, urejanja in nadzorovanja modela pa do same kontrole analize in pregleda rezultatov.
- **Abaqus/Standard** je produkt za analizo po metodi končnih elementov. Uporablja implicitno integracijsko shemo pri dinamičnih problemih. Primeren je za statične in dinamične probleme, kjer je visoka natančnost rezultatov zelo pomembna.
- **Abaqus/Explicit** je produkt za analizo po metodi končnih elementov. Uporablja se predvsem za dinamične probleme, ki delujejo kratek čas. Zlasti je učinkovit pri obravnavi izrazito nelinearnega obnašanja.
- **Abaqus/CFD** je produkt, ki se uporablja za napredno računanje dinamike tekočin, kot so laminarni in turbulentni tok, toplotno konvekcijo, itd.
- **Abaqus/Electromagnetic** je produkt, ki se uporablja za napredno računanje elektromagnetnih problemov.

Vsaka dokončana analiza je sestavljena iz treh ločenih korakov:

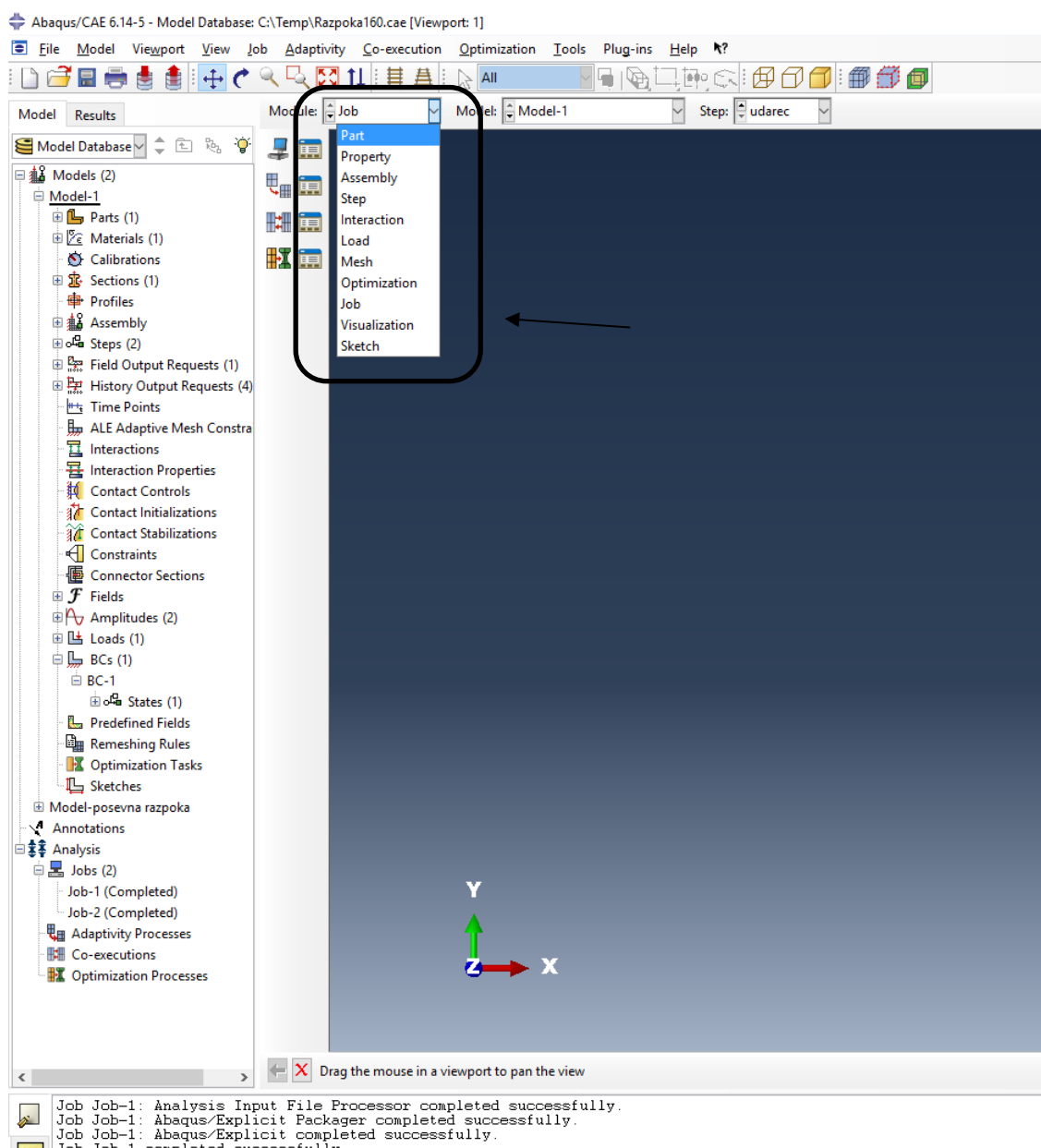
- **Modeliranje oziroma predprocesiranje:** v tem koraku uporabnik ustvari vhodno datoteko za reševalnik. Vhodna datoteka vsebuje vse potrebne podatke za analizo kot so geometrija, materialne karakteristike, obtežba, mreža končnih elementov, itd.
- **Analiza z metodo končnih elementov:** v tem koraku poteka analiza. Rezultat je izhodna datoteka.
- **Poprocesiranje:** v zadnjem koraku z obdelavo izhodne datoteke ustvarimo animacije in slike, poročila z rezultati in grafi, itd.

Modeliranje in poprocesiranje je možno z Abaqus/CAE, potek same analize pa lahko le spremljamo. Izbira reševalnika je odvisna od obravnavanega problema. Modeliranje seveda lahko opravimo tudi v kompatibilnih CAD programih ali pa celo v tekstovnem urejevalniku.

### 5.7.1 Model

Odločili smo se, da bomo v programu Abaqus modelirali razpoko globine 150 mm, kar bo v nadaljevanju tega poglavja tudi opisano in predstavljeno. Obravnavani problem bomo modelirali kot 2D.

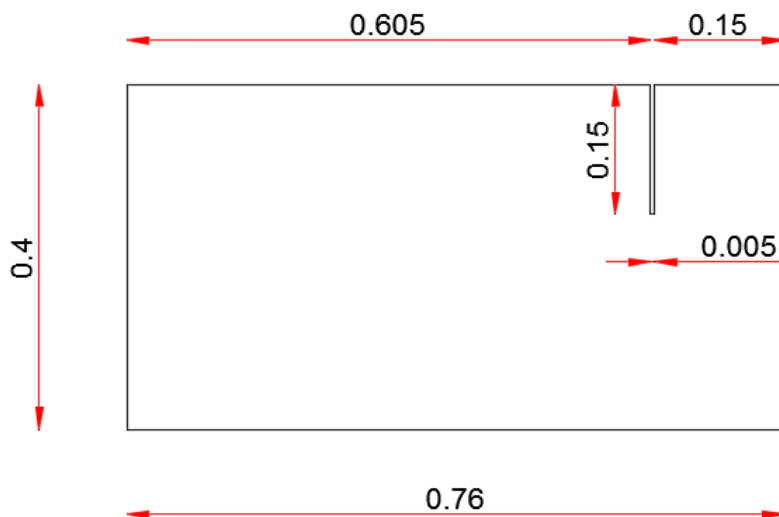
Kot lahko vidimo na sliki 51, ima Abaqus/CAE 11 modulov, ki jih bomo po vrstnem redu uporabili za uspešno dokončanje modela za analizo.



Slika 51: Abaqus/CAE moduli

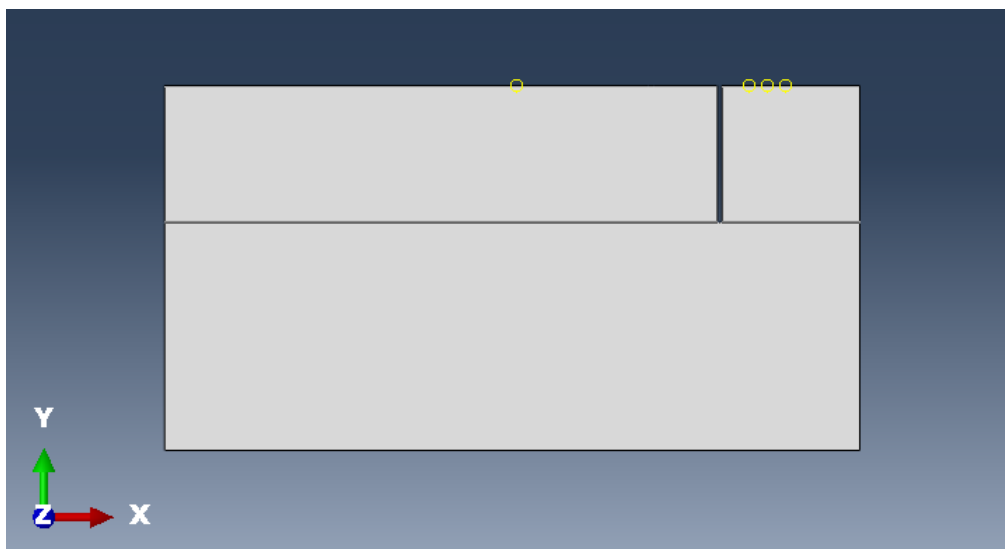
### 5.7.1.1 Geometrija

Na sliki 52 je prikazana geometrija obravnavanega območja.



Slika 52: Geometrija modela v metrih

V modulu »Part« se pripravi obravnavano območje, ki ga nato uporabimo za nadaljnje modeliranje. Na voljo imamo široko paleto orodji in ukazov za risanje. Uporabniku pa je na voljo tudi, da model uvozi iz kompatibilnih CAD programov. Na sliki 53 je prikazan izrisan model. Debelina 2d modela znaša 1 m.



Slika 53: Obravnavan 2D model v programu Abaqus/CAE



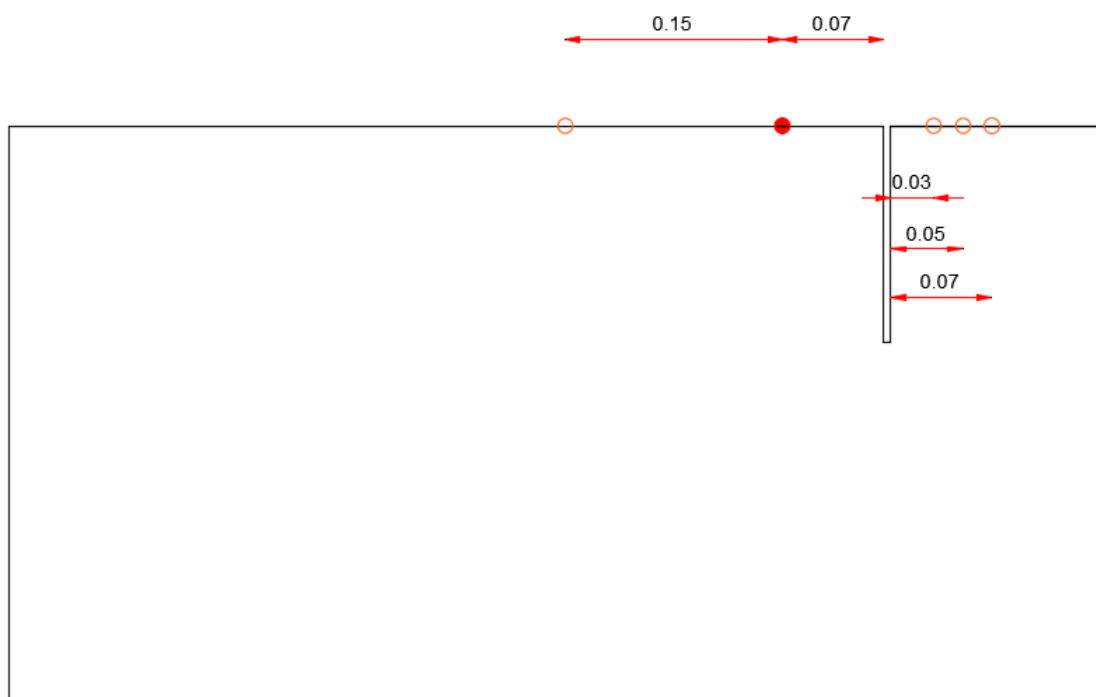
### 5.7.1.2 Material

Po izrisu geometrije modela sledi določitev materialnih karakteristik. Ker gre za elastično analizo potrebujemo naslednje karakteristike betona

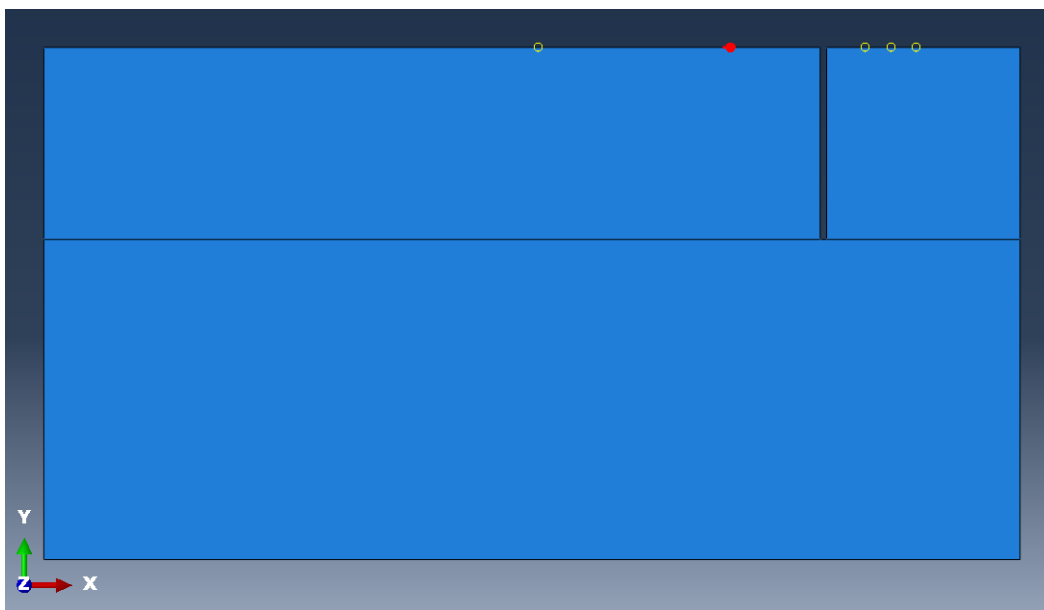
- Elastični modul:  $E = 20 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
- Poissonov količnik:  $\nu = 0.2$
- Gostota:  $\rho = 2120 \text{ kg/m}^3$

Elastične karakteristike betona so bile določene iz hitrosti P-valov, gostota je bila izračunana iz teže in volumna vzorca.

V nadaljevanju smo morali material pripisati modelu ter definirati merilna mesta in območje udarca. Pozicije merilnih mest in območja udarca so prikazane na slikah 54 in 55. Poleg udarca na razdalji 0,07 m smo modelirali tudi udarec na razdalji 0,05 m in 0,03 m.



Slika 54: Pozicija merilnih mest in območja udarca v metrih



Slika 55: Prikaz pozicije merilnih mest in območja udarca v modelu v Abaqus/CAE

### 5.7.1.3 Koordinatni sistem

Vsak sestavni del modela, ki je narejen v modulu »Part«, ima svoj koordinatni sistem in je neodvisen od ostalih v modelu. Če želimo, da so deli medsebojno odvisni, in da imamo en globalni koordinatni sistem, moramo vse dele modela združiti. To naredimo v modulu »Assembly«. V našem primeru to ne igra velike vloge, saj imamo samo en del in je lokalni koordinatni sistem enak globalnemu. Kljub temu pa moramo naš del združiti in mu tako določiti globalni koordinatni sistem.

### 5.7.1.4 Določitev analize

Ko imamo model postavljen v globalnem koordinatnem sistemu, lahko nadaljujemo z določevanjem korakov analize v modulu »Step«. Ker obravnavamo širjenje valov po preizkušancu zaradi začetnega udarca, je potek analize sestavljen iz enega koraka. Kljub temu pa definiramo dva, saj je prvi korak samodejno določen.

- Začetni korak, v katerem vstavimo robne pogoje v model
- Korak analize (udarec), v katerem nanese obtežbo, definiramo čas računa, tip analize, časovni korak, itd.

Uporabili smo eksplicitno dinamično analizo pojava, ki traja 0.0005 s. Uporaba daljšega časa ne bi bila smiselna, saj bi s tem samo podaljšali čas računa in dobili rezultate, ki so izven

območja zanimanja. Časovni inkrement je določen samodejno, saj ga bomo kontrolirali z določitvijo velikosti mreže končnih elementov.

### **Izhodna datoteka**

Ker pri analizi z metodo končnih elementov dobimo veliko število izhodnih podatkov, nam program Abaqus omogoča, da sami nadzorujemo in urejamo njihov izpis. Na voljo imamo dve kontrolni enoti, “**Field Output Requests Manager**” in “**History Output Requests Managers**”. S prvo kontrolno enoto nadzorujemo izpis podatkov za celoten model ali večji del modela in jih navadno zapisujemo z nižjimi frekvencami. Z drugo pa nadzorujemo izpis podatkov za manjše območje ali pa samo za določeno vozlišče in jih navadno zapisujemo z višjimi frekvencami.

Pri modeliranju obravnavanega problema smo uporabili obe kontrolni enoti. Prva je urejala vizualni prikaz širjenja valov, z drugo pa smo zajemali podatke v vozliščih merilnih mest.

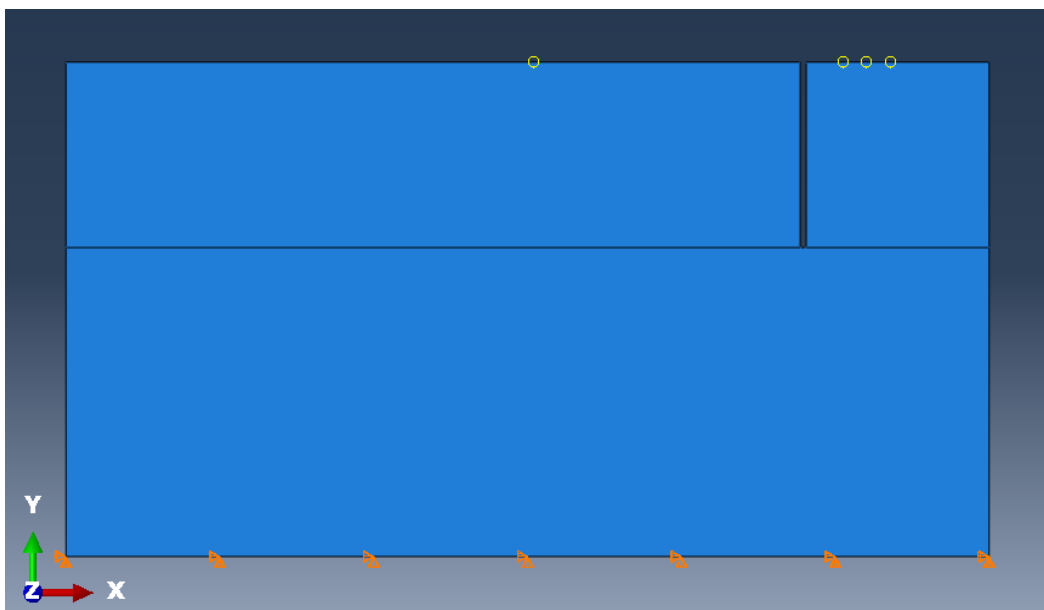
#### **5.7.1.5 Obtežba in robni pogoji**

Obtežba in robni pogoji so odvisni od korakov analize, saj bodo postali aktivni v koraku, ki ga izberemo. Naša analiza je sestavljena iz dveh korakov. V začetnem koraku bodo postali aktivni robni pogoji in bodo ostali aktivni tudi v drugem koraku, kateremu pa pripišemo tudi obtežbo.

### **Robni pogoji**

Robni pogoji so pripisani robnim območjem modela, kjer so pomiki znani. Lahko jih predpišemo tako, da preprečimo pomik v določeni smeri, ali pa da vsilimo predpisan pomik.

Na spodnji sliki so prikazani robni pogoji našega modela. Na celotnem spodnjem robu smo definirali podpore, ki so preprečile, da bi se model premikal v prostoru. Na tem robu smo preprečili pomika v smeri 1 in 2 oziroma  $x$  in  $y$ .



Slika 56: Prikaz podpor na spodnjem robu modela

### **Obtežba**

V modulu »Load« v Abaqus/CAE lahko pripišemo obtežbo modelu. Pojem obtežba se nanaša na vse kar sproži nek odziv konstrukcije glede na prvotno stanje. To je lahko

- koncentrirana sila,
- tlak,
- vsiljeni nenični robni pogoji,
- temperatura, itd.

V našem modelu smo obtežbo vnesli na majhen del zgornjega roba, ki ga prikazuje slika 57. Obtežbo smo definirali kot tlak

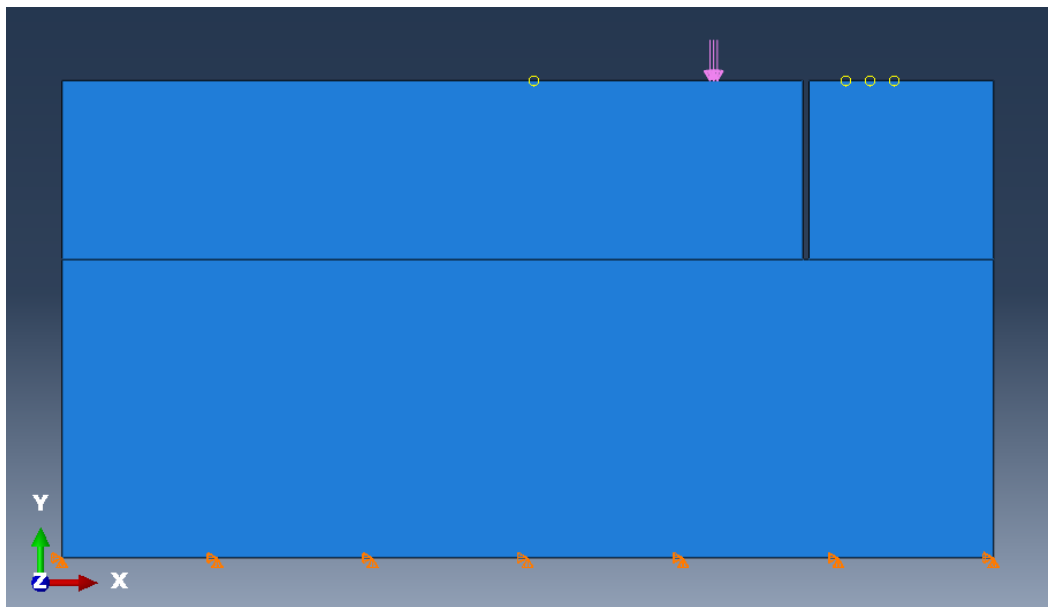
$$p = \frac{F}{d}, \quad (5.2)$$

kjer je

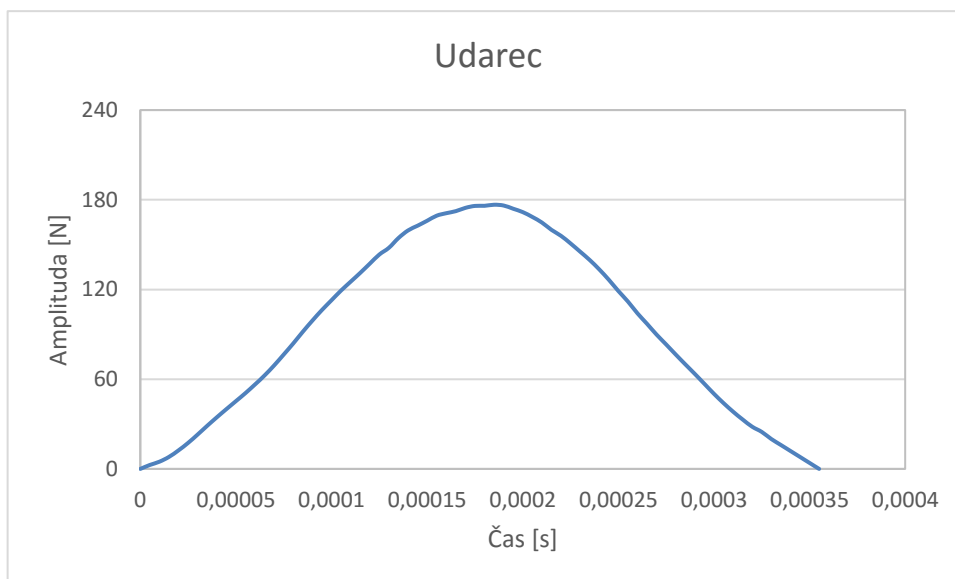
- $p$ , tlak,
- $F$ , sila, ki smo jo dobili pri preizkusu (slika 58),

- $d$ , širina pasu, na katerem deluje tlak ( $d = 6 \text{ mm}$ ) (debelina modela je 1 m)

Obtežbo pripišemo drugemu koraku analize.



Slika 57: Pozicija udarca oziroma obtežbe na zgornjem robu modela



Slika 58: Primer udarca izmerjenega pri preizkusu s pomočjo impulznim kladivom

### 5.7.1.6 Mreža končnih elementov

V modulu »Mesh« uporabnik tvori mrežo končnih elementov. Izbira lahko med različnimi tehnikami, s pomočjo katerih bo ustvaril mrežo ter izbral obliko in tip elementa. Na voljo imamo štiri različne tehnike

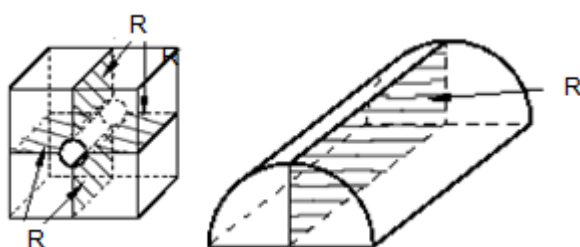
- free meshing,
- swept meshing,
- structured meshing,
- mapped meshing.

Pri numerični simulaciji s programom Abaqus je bila uporabljena strukturirana tehnika. Pri tej tehniki uporabimo že definirane enostavne mreže. Abaqus/CAE ustvari mrežo iz pravilnih oblik, kot sta kvadrat in pravokotnik.

2D območja lahko razdelimo s to tehniko, če imajo naslednje karakteristike:

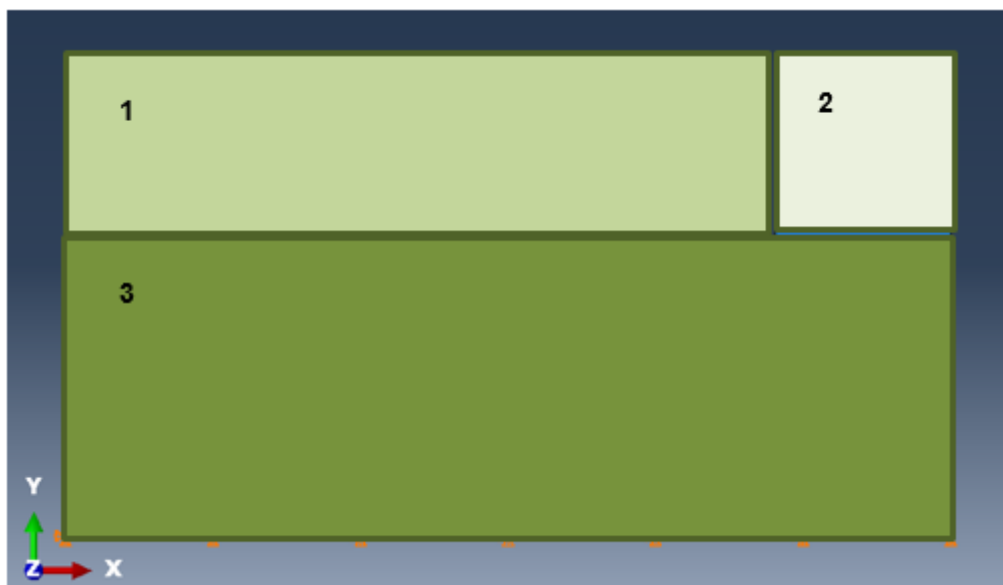
- območje nima lukenj, ločenih robov ali pa osamljenega vozlišča
- območje ima od tri do pet logično postavljenih strani, ki so sestavljene iz skupine povezanih robov.

V splošnem imamo s strukturo tehniko največ kontrole nad generiranjem mreže končnih elementov, saj vedno, ko je to mogoče, upošteva zahtevano velikost končnega elementa. Pri bolj kompleksnih območjih v 2D in 3D je potrebno območja predhodno razdeliti na takšne oblike, da so primerne za uporabo (slika 59).

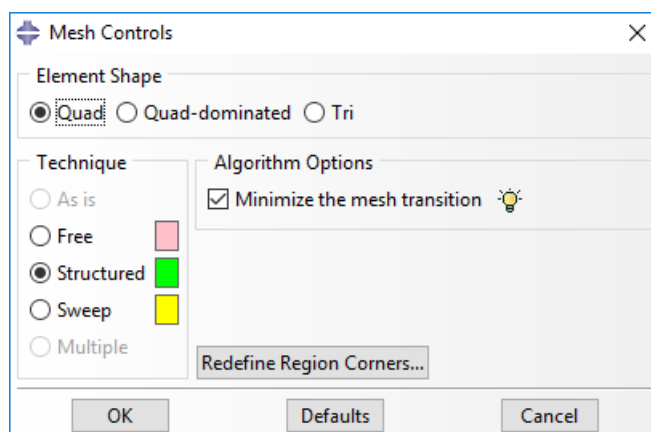


**Slika 59: Razdelitev območja na primerne odseke za uporabo »structured meshing« tehnike. (Z R so označene ravnine, s katerimi razdelimo območje)**

Pri generiranju mreže končnih elementov za obravnavani model smo uporabili »structured meshing« oziroma strukturo tehniko (slika 61). Da smo to tehniko lahko uporabili, smo območje razdelili na tri pravokotne oblike (slika 60).

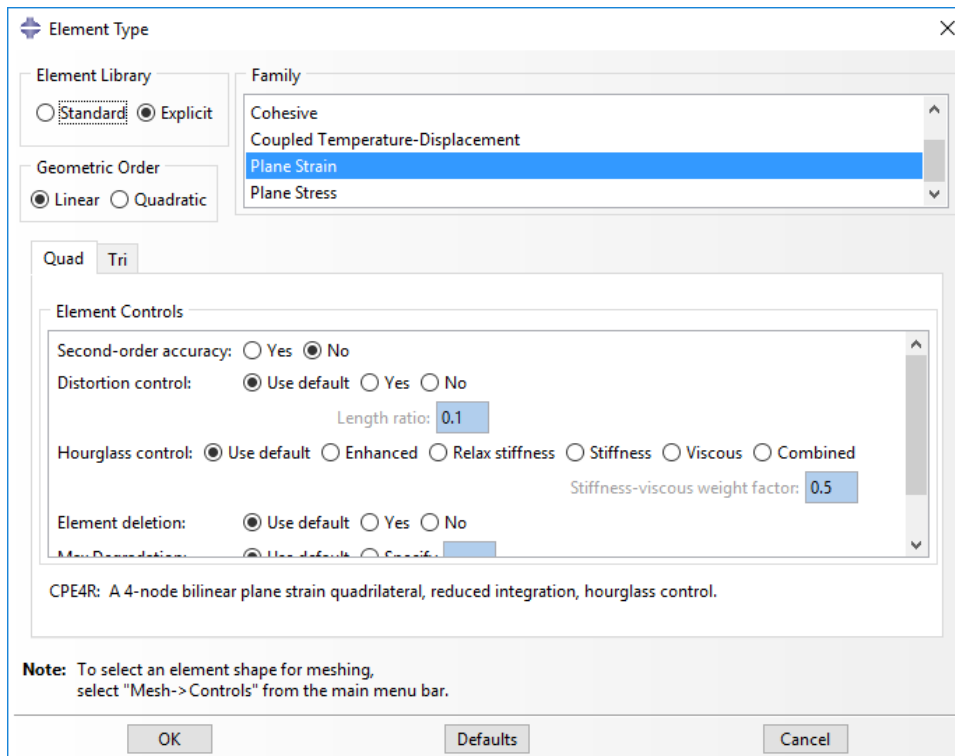


**Slika 60: Razdelitev modela na tri dele zaradi uporabe strukturne tehnike generiranja mreže končnih elementov**

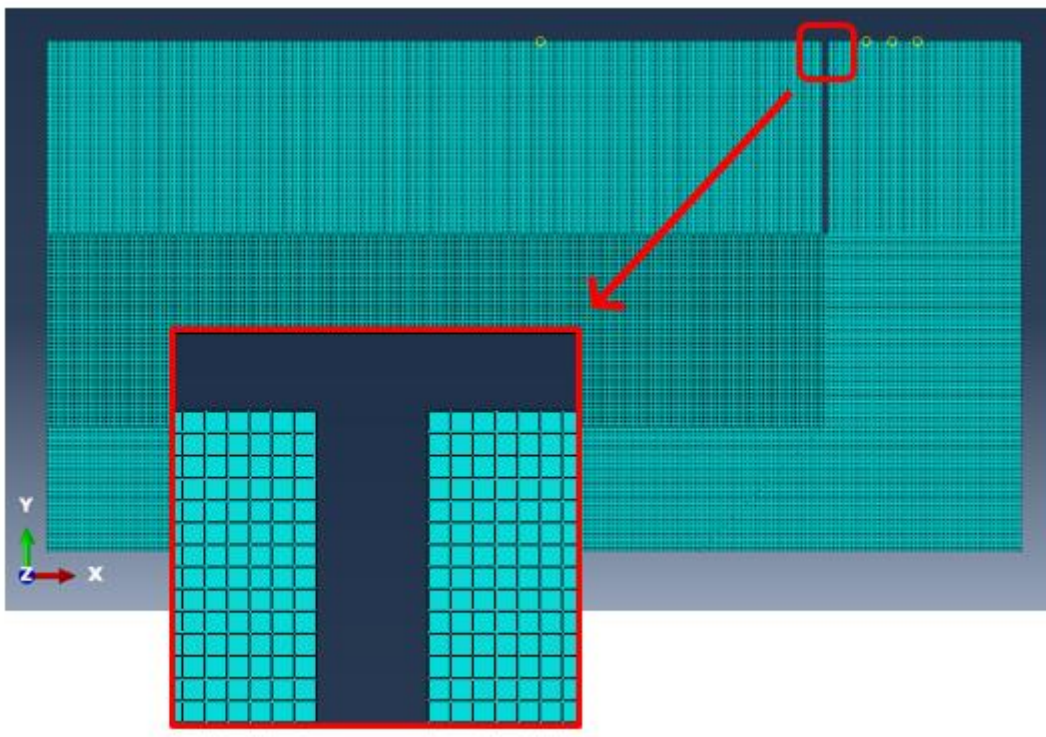


**Slika 61: Izbira tehnike in oblike elementov**

Uporabili smo 4-voziščne končne elemente za ravninsko deformacijsko stanje, velikosti  $0.001\text{m} \times 0.001\text{m}$  z reducirano integracijo (CPE4R elementi). Območje je obsegalo 304050 končnih elementov



Slika 62: Tip elementa

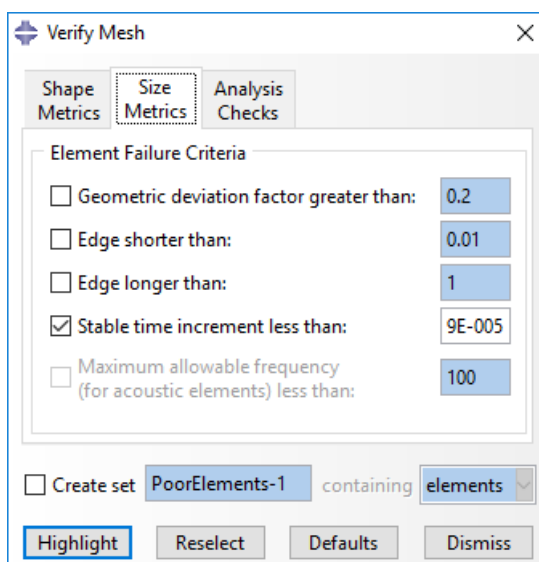


Slika 63: Mreža končnih elementov (velikost elementa: 0.001m × 0.001m)



Ker smo uporabili eksplicitno dinamično analizo, ki je pogojno stabilna, je bilo potrebno preveriti spodnji pogoj

$$\Delta t \leq \frac{0.30 \text{ m}}{3250 \text{ m/s}} = 9.2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$



Slika 64: Definiranje pogoja največjega še stabilnega časovnega koraka

The model database "C:\Temp\Razpoka160.cae" has been opened.

Part: Beton160

Quad elements: 304050

Stable time increment < 9e-05: 304050 (100%)

Average stable time increment: 1.79e-007, Smallest stable time increment: 1.79e-007

Number of elements : 304050, Analysis errors: 0 (0%), Analysis warnings: 0 (0%)

Slika 65: Preverjanje pogoja največjega še stabilnega časovnega koraka

Po končanem modeliranju sledi analiza.

## 5.7.2 Rezultati analize

V tem poglavju so predstavljeni rezultati, ki smo jih dobili s simulacijo v programu Abaqus.

Obravnavali smo razpoko globine 149 mm in upoštevali vse tri primere:

- Udarec na razdalji 70 mm od razpoke
- Udarec na razdalji 50 mm od razpoke
- Udarec na razdalji 30 mm od razpoke

V tabelah so prikazani potrebni časi ( $t_{izračunan}$ ), odčitani časi iz računalniške simulacije ( $t_{simulacija}$ ) in pripadajoče globine ter relativne napake. Iz rezultatov vidimo, da so relativne napake skoraj v vseh primerih manjše od 1%. Napake so tako majhne, ker začetka meritve in prihoda udarnega vala ni težko določiti. Prihod signalov, ki jih lahko vidimo na sliki 66, smo odčitali na mestu, kjer se je pojavila prva nenična vrednost pomika. Čas na tem mestu je kar enak času potovanja udarnih valov. Dodaten razlog za takšne rezultate je tudi način podajanja materialnih karakteristik. V simulaciji smo beton definirali kot homogen material, kar pomeni, da so v vsaki točki veljale lastnosti, ki smo jih podali. V naravi pa to ne drži.

**Tabela 11: Rezultati simulacije za udarec na razdalji 70 mm.**

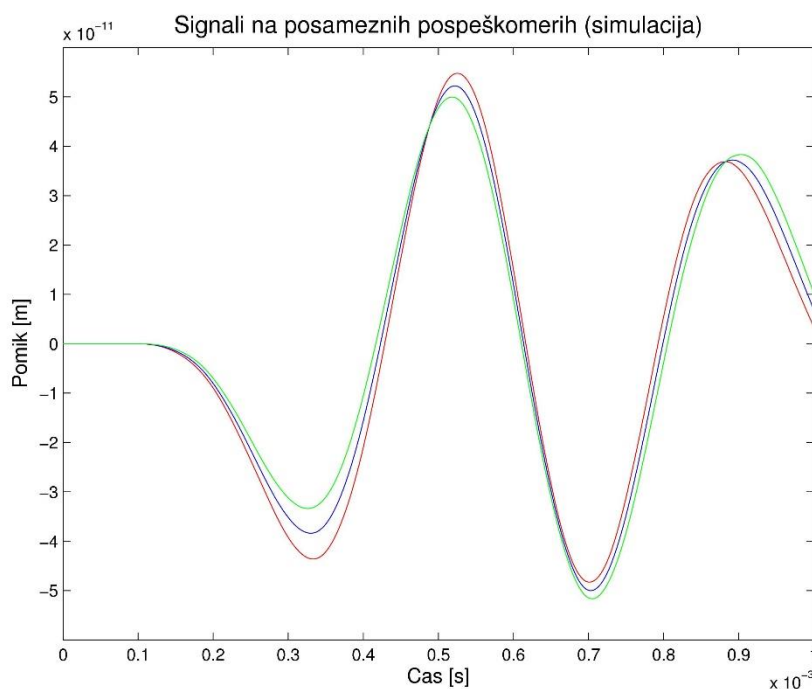
Razpoka globine 14,9 cm (udarec na razdalji 70 mm)				
Pospeškomer	$t_{izračunan}$ [s]	$t_{simulacija}$ [s]	$D_{simulacija}$ [cm]	Relativna napaka [%]
P30	0,00009727	0,00009763	14,88	0,14
P50	0,00009881	0,00009906	14,83	0,45
P70	0,00010115	0,00010077	14,71	1,27

**Tabela 12: Rezultati simulacije za udarec na razdalji 50 mm.**

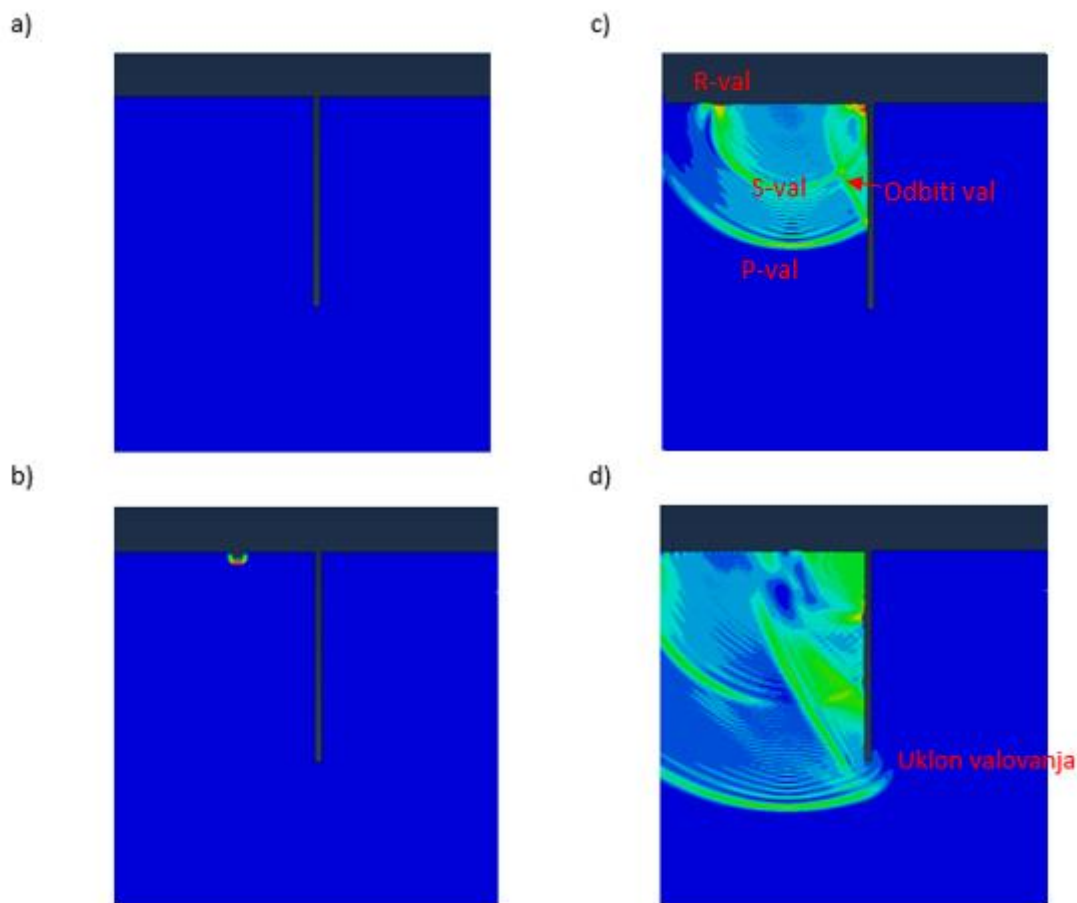
Razpoka globine 14,9 cm (udarec na razdalji 50 mm)				
Pospeškomer	$t_{izračunan}$ [s]	$t_{simulacija}$ [s]	$D_{simulacija}$ [cm]	Relativna napaka [%]
P30	0,00009557	0,00009565	14,94	0,30
P50	0,00009715	0,00009701	14,90	0,003
P70	0,00009942	0,00009906	14,83	0,45

**Tabela 13: Rezultati simulacije za udarec na razdalji 30 mm.**

Razpoka globine 14,9 cm (udarec na razdalji 30 mm)				
Pospeškometer	$t_{izračunan}$ [s]	$t_{simulacija}$ [s]	$D_{simulacija}$ [cm]	Relativna napaka [%]
P30	0.00009399	0,00009422	14,99	0,58
P50	0.00009557	0,00009565	14,94	0,30
P70	0.00009784	0,00009763	14,88	0,14

**Slika 66: Primer signalov na mestu pospeškometerov P30, P50 in P70**

Na sliki 67 je prikazana simulacija širjenja valovanja za čase 0 s,  $1.30 \times 10^{-6}$  s,  $3.27 \times 10^{-5}$  s in  $5.75 \times 10^{-5}$  s. Formiranje vseh tipov valov se lepo vidi na sliki 67c, tj. P-val, S-val in R-val. Poleg tega vidimo tudi odbojni val od stene razpoke. Na sliki 67d valovanje doseže konico razpoke okoli katere se ukloni.



Slika 67: Širjenje valovanja a)  $t = 0 \text{ s}$ , b)  $t = 1,30 \text{ E} - 06 \text{ s}$ , c)  $t = 3,27 \text{ E} - 05 \text{ s}$   
in d)  $t = 5,75 \text{ E} - 06 \text{ s}$

## 5.8 Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov

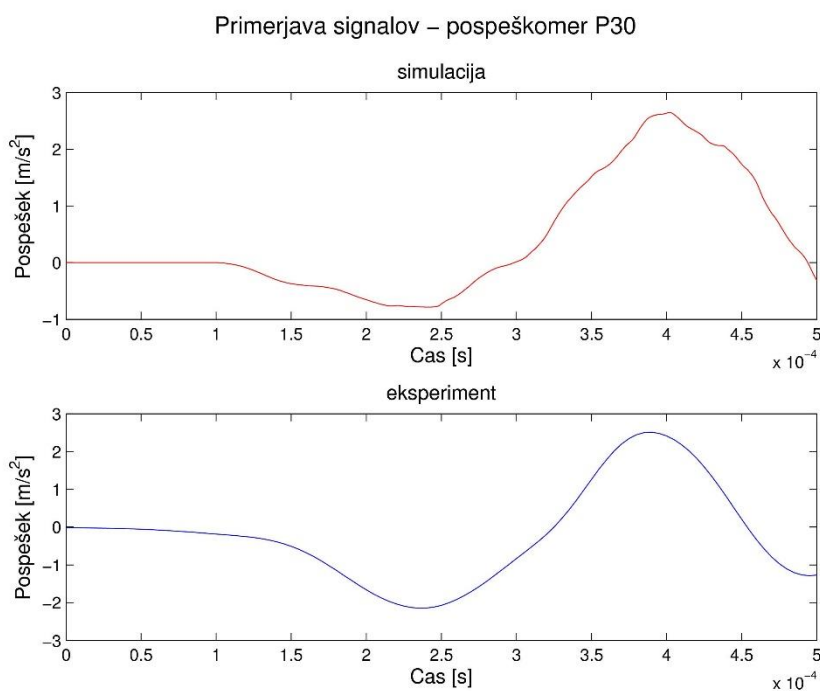
Primerjave rezultatov so podane v tabeli 14 in v obliki grafov. Globino, izračunano z numerično simulacijo, primerjamo z globino izmerjeno v testih. V tabeli 14 sta prikazani globini in pripadajoči relativni napaki. Pri preizkusu sem za globino vzel najpogostejšo vrednost za vse meritve, pri simulaciji pa povprečje globin za vse primere. Poleg tega je v grafih podana primerjava signalov v območju prihoda.

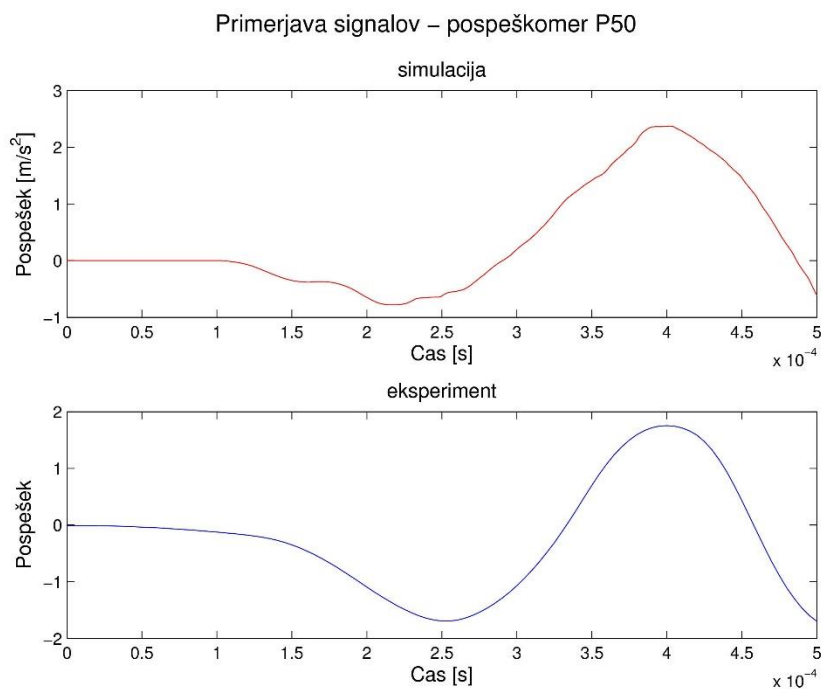
V tabeli 14 vidimo, da je relativna napaka manjša pri simulaciji s programom Abaqus. Eden od glavnih razlogov je upoštevanje homogenosti materiala v simulaciji, saj je v naravi beton heterogen material in ima veliko območji na katerih se valovanje sipa. Poleg tega je iz signalov dobljenih z numerično simulacijo lažje določiti prihod le teh.

**Tabela 14: Primerjava globine razpoke.**

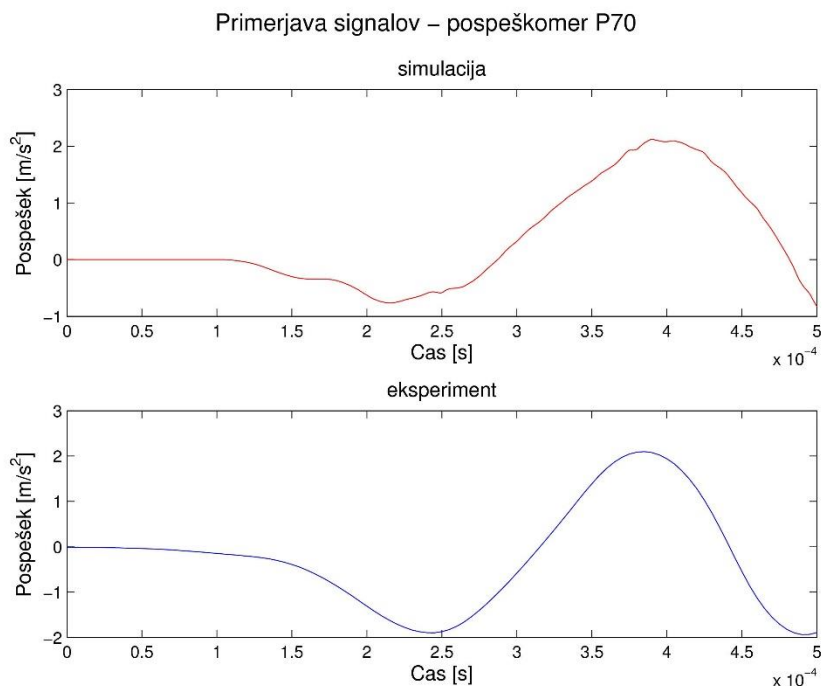
Razpoka globine 14,9 cm				
Meritve	$D_{simulacija}$ [cm]	Relativna napaka [%]	$D_{preizkus}$ [cm]	Relativna napaka [%]
Vse	14,88	0,14	15,10	1,3

Za konec je na slikah 68, 69 in 70 prikazana grafična primerjava signalov dobljenih pri numerični simulaciji in testu v območju prihoda. Daljšega območja ne bi bilo smiselno prikazovati, saj računski model ni popoln prikaz dejanskega stanja.

**Slika 68: Primerjava dobljenih signalov pri simulaciji in testu v območju prihoda (P30)**



Slika 69: Primerjava dobljenih signalov pri simulaciji in testu v območju prihoda (P50)



Slika 70: Primerjava dobljenih signalov pri simulaciji in testu v območju prihoda (P70)

## 6 ZAKLJUČEK

V magistrski nalogi sem na podlagi laboratorijskih testov in numeričnih simulacij ocenil globine različnih razpok. Pri tem sem podrobno spoznal neporušitveno eksperimentalno metodo Impact Echo in se seznanil s programom za analizo konstrukcij Abaqus. Vsi eksperimentalni testi so potekali v Laboratoriju za konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo Slovenije.

Razpoke so bile razdeljene v dva sklopa. Prvi sklop je zajemal navpične razpoke različnih globin, ki so bile tudi glavna tema te magistrske naloge. V drugem sklopu pa smo zajeli nekaj primerov razpok s posebnostmi, vendar jih nismo podrobneje analizirali.

Pri navpičnih razpokah različnih globin se je izkazalo, da je napaka izračuna globine pri uporabi Impact Echo najmanjša pri najgloblji razpoki. Ta je znašala 1,3%. Največjo napako 20,7% smo dobili pri razpoki z najmanjšo globino. Po priporočilih iz literature [1] o območju zajemanja meritev smo dodatno izračunali globine in jih primerjali z globinami, kjer upoštevamo vse opravljene meritve. Pri razpokah V1-130 in V1-70 se je napaka zmanjšala, pri razpoki V1-100 je ostala enaka, pri razpoki V-160 pa se je napaka povečala. Rezultati nakazujejo na to, da je območje med 30 mm in 50 mm najbolj optimalno, vendar je vzorec premajhen za bolj jasne zaključke. Vseeno smo mnenja, da je za dober rezultat potrebnih veliko meritev vzdolž razpoke, kar se je pokazalo tudi pri testih.

Simulacijo s programom Abaqus sem naredil za razpoko z globino 149 mm. Primerjava rezultatov dobljenih z računalniško simulacijo in s testi je pokazala, da je napaka večja pri izračunani globini iz laboratorijskih testov in je ta znašala 1,3%. Napaka pri simulaciji je bila 0,14%. Razlika ni velika, vendar sem mnenja, da bi pri razpokah z manjšimi globina bilo to odstopanje večje. Menim, da je glavni razlog za razliko upoštevanje homogenosti v materialu modela in težko določljiv začetek meritve in prihod signala pri testih.

Napake pri razpokah s posebnostmi so bil večje kot pri navpičnih razpokah različnih globin. Te so tudi bolj odstopale pri primerjavi obeh merskih mest, saj smo na enem merskem mestu dobili majhno napako, na drugem pa dosti večjo. Pri upoštevanju vseh meritev se je napaka gibala med 8,8% in 19%. Pri poševni razpoki smo dobili napako 0%, vendar to ni realno pričakovati, saj je raztros podatkov velik in visoko frekvenco rezultatov dobimo tudi pri globini 11 cm in 12 cm. Za bolj realne rezultate bi morali narediti dodatne meritve.

## Smernice za nadaljnje raziskovalno delo

Raziskavo se lahko nadgradi v več smereh in sicer:

- s povezovanjem vpliva širine razpoke na določanje globine,
- s povezovanjem vpliva časa trajanja udarca na določanje globine,
- z nadgrajeno obdelave podatkov in
- z natančnejšo analizo razpok s posebnostmi.

Magistrsko delo skupaj z laboratorijskimi testi obdeluje zgolj oceno globine razpok širine 5 mm, saj nam je bil osnovni cilj spoznati nedestruktivno metodo in povezati realen problem z računalniško simulacijo. V nadaljnjih raziskavah se lahko preuči vpliv širine razpoke na rezultate. Poleg tega se lahko vključi tudi vpliv časa udarca, saj vemo, da je od kontaktnega časa odvisno frekvenčno območje oziroma valovna dolžina valovanja, ki vpliva na prostorsko ločljivost metode.

Meritve so se izvajale za različne razdalje udarcev od razpoke. Poleg tega smo imeli tri pospeškomere na enakih razdaljah kot so bili izvedeni udarci. Zaradi človeške napake in drobljenja materiala pod težo udarca, vsak udarec ni bil enak. V magistrski nalogi je obdelava podatkov potekala v programu Matlab, parametri za določitev začetka meritve in prihoda signala pa so bili enaki za vse dobljene meritve. Obdelavo bi tako lahko nadgradili v več smereh, kjer bi upoštevali podobnost udarca, čas trajanja udarca, razdaljo udarca od razpoke in mesto zajemanja signalov.

Za konec bi z nadaljnjimi raziskavami in simulacijo lahko natančneje preučili razpoke s posebnostmi in ugotovili vpliv le teh. Konec koncev so te razpoke najbolj zanimive z vidika gradbeništva in tudi najbolj pogoste.



## 7 VIRI

- [1] Sansalone, Mary J., Streett, William B., 1997. Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry.
- [2] Gerbec, B., Pelan, M. Obnavljanje betonskih in zidanih gradbenih elementov. [http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/47-5\\_clanek\\_sl.pdf](http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/47-5_clanek_sl.pdf) (15.3.2016)
- [3] <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT> (16.3.2016)
- [4] Impact Echo method – GeoVision <http://www.geovision.com/PDF/App%20Note%20-%20Method%20-%20Impact%20Echo.pdf> (17.3.2016)
- [5] Szilard, J. Ultrasonic testing: non-conventional testing techniques. Chichester: Wiley, 1982.
- [6] <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>
- [7] Wikipedija – prosta enciklopedija [https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_wave) (20.3.2016)
- [8] <http://www.fmf.uni-lj.si/~seliger/valovanje1.pdf> (15.3.2016)
- [9] Wikipedija – prosta enciklopedija <https://sl.wikipedia.org/wiki/Uklon> (16.3.2016)
- [10] Achenbach, J.D. Wave propagation in elastic solids. 1973.
- [11] <http://preserve.lehigh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2597&context=etd> (10.4.2016)
- [12] Bedford, A., Drumheller, D. S. Introduction to Elastic Wave Propagation. <http://imechanica.org/files/awave.pdf> (20.4.2016)
- [13] Hughes, Thomas J. R. The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. 2000.
- [14] [http://les.fe.uni-lj.si/nen/predavanja/07\\_Metoda\\_koncnih\\_elementov.pdf](http://les.fe.uni-lj.si/nen/predavanja/07_Metoda_koncnih_elementov.pdf) (11.4.2016)
- [15] Abaqus User's Manual (6.14)
- [16] <http://geo.cv.nctu.edu.tw/EngGeo/download/RayleighWave.pdf> (15.5.2016)

- [17] Srpčič, S. Mehanika trdnih teles, FGG. Ljubljana 2004