

# Ispitivanje ultrazvukom aluminotermijskih zavara tračnica

---

Jagodić, Nika

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:536312>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Nika Jagodić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Student:

Nika Jagodić

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Markučiću na pomoći i strpljenju pri izradi rada te tehničkom suradniku Tomislavu Kezeleu na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima na bezuvjetnoj podršci tijekom školovanja.

Nika Jagodić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **NIKA JAGODIĆ**

Mat. br.: 0035211502

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje ultrazvukom aluminotermijskih zavara tračnica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Ultrasonic testing of aluminothermic rail welds**

Opis zadatka:

Kod izgradnje željezničkih pruga, između ostalih, koristi se i aluminotermijski (AT) postupak zavarivanja tračnica. S obzirom na specifične vrste pogrešaka AT zavara nisu primjenjivi zahtjevi norme za ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva taljenjem HRN EN ISO 17640, kao niti kriteriji prihvatljivosti utvrđeni normom HRN EN ISO 11666. Na raspolaganju su norme za certifikaciju AT postupka zavarivanja i/ili zavarivača koje predviđaju izradu uzoraka iz zavarenog spoja koji se ispituju ultrazvukom što nije primjenjivo za ispitivanje AT zavarenih spojeva kod izgradnje pruga.

Slijedom navedenoga u radu je potrebno:

- Dati pregled normi i specifikacija za ispitivanje ultrazvukom AT zavara tračnica.
- Temeljem zahtjeva, u laboratorijskim uvjetima istražiti mogućnosti dobivanja ultrazvučnih odziva karakterističnih referentnih reflektora za sonde različitih ultrazvučnih parametara.
- Obratiti pozornost na različite geometrijske postavke ispitivanja u odnosu na volumene AT zavara obuhvaćene ultrazvučnim snopom sonde u poprečnom i uzdužnom presjeku tračnice.
- U konačnici, za odabrane sonde usporediti ultrazvučne odzive realnih indikacija u uzorcima AT zavarenih spojeva s osvrtom na usporedbu rezultata dobivenih na referentnim reflektorima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predvideni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Damir Markučić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. ALUMINOTERMIJSKO ZAVARIVANJE.....	3
2.1. Postupak aluminotermijskog zavarivanja tračnica.....	3
2.1.1. Prednosti i nedostaci aluminotermijskog zavarivanja.....	6
2.2. Greške kod aluminotermijskih zavara.....	6
2.2.1. Uzroci grešaka kod aluminotermijskih zavara.....	6
2.2.2. Vrste grešaka kod aluminotermijskih zavara.....	7
2.3. Zahtjevi postupka zavarivanja tračnica.....	11
3. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE.....	12
3.1. Princip rada ultrazvuka .....	12
3.2. Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode ispitivanja .....	13
3.3. Postupak ultrazvučnog ispitivanja tračnica.....	13
3.3.1. Koraci u ispitivanju aluminotermijskih zavara tračnica .....	15
3.4. Oprema za ultrazvučno ispitivanje tračnica .....	17
3.4.1. Uređaji za ispitivanje jedne tračnice .....	17
3.4.2. Uređaji za ispitivanje obje tračnice.....	18
3.4.3. Vozila za ispitivanje.....	19
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	20
4.1. Oprema.....	21
4.2. Ultrazvučno ispitivanje referentnog bloka .....	26
4.2.1. Ispitivanje sondom MWB 45-2.....	28
4.2.1.1. Prikaz odjeka reflektora FBH sondom MWB 45-2 .....	28
4.2.1.2. Prikaz odjeka reflektora SDH sondom MWB 45-2 .....	32
4.2.2. Ispitivanje sondom SWB 45-2 .....	37
4.2.2.1. Prikaz odjeka reflektora FBH sondom SWB 45-2.....	37
4.2.2.2. Prikaz odjeka reflektora SDH sondom SWB 45-2 .....	41
4.2.3. Ispitivanje sondom WB 45-N2 .....	46
4.2.3.1. Prikaz odjeka reflektora FBH sondom WB 45-2.....	46
4.2.3.2. Prikaz odjeka reflektora SDH sondom WB 45-2.....	51
4.3. Usporedba signala odjeka s referentnih reflektora.....	56
4.4. Ultrazvučno ispitivanje uzorka zavara .....	59
4.4.1. Ispitivanje greške u glavi tračnice.....	59
4.4.2. Ispitivanje greške u vratu tračnice .....	63

---

5. ZAKLJUČAK.....	67
LITERATURA.....	69

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Skica osnovne opreme i postupka aluminotermijskog zavarivanja tračnica [3] .....	4
Slika 2.	Prikaz aluminotermijskog postupka zavarivanja tračnica [11] .....	5
Slika 3.	Prikaz tračnica zavarenih aluminotermijskim postupkom [12].....	5
Slika 4.	Ravnine tračnice [15] .....	7
Slika 5.	Poroznosti [12] .....	8
Slika 6.	Skupljanje [12] .....	8
Slika 7.	Naljepljivanje [15].....	9
Slika 8.	Primjer greške označene kodom 421 [13].....	10
Slika 9.	Primjer pukotine označene kodom 422 [13] .....	10
Slika 10.	Dijelovi tračnice [20].....	15
Slika 11.	UDS2-77 proizvođača OKOndt GROUP [22] .....	17
Slika 12.	UDS2-73 proizvođača OKOndt GROUP [23] .....	18
Slika 13.	Motorizirana verzija uređaja za ispitivanje proizvođača Pandrol [24].....	18
Slika 14.	Vozilo za ispitivanje tračnica proizvođača Tvema [25].....	19
Slika 15.	Referentni blok .....	20
Slika 16.	Bokocrt referentnog bloka s naznačenim dubinama na kojima se nalaze reflektori .....	21
Slika 17.	Sonde .....	22
Slika 18.	Ovisnost faktora korekcije o omjeru duljina kraće i duže stranice pravokutne sonde [26].....	24
Slika 19.	Krautkramer USM 36 .....	25
Slika 20.	Kabel MPKL 2 za spajanje sonde MWB 45-2 i SWB 45-2 s uređajem .....	25
Slika 21.	Kabel za spajanje sonde WB 45-2 s uređajem .....	26
Slika 22.	Skraćena projekcija, dubina i zvučni put.....	26
Slika 23.	Detektiranje reflektora FBH <sub>1</sub> sondom MWB 45-2.....	29
Slika 24.	Detektiranje reflektora FBH <sub>2</sub> sondom MWB 45-2.....	29
Slika 25.	Detektiranje reflektora FBH <sub>3</sub> sondom MWB 45-2.....	29
Slika 26.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>1</sub> sondom MWB 45-230	
Slika 27.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>2</sub> sondom MWB 45-230	
Slika 28.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>3</sub> sondom MWB 45-230	
Slika 29.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>1</sub> sondom MWB 45-2 .....	31
Slika 30.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>2</sub> sondom MWB 45-2 .....	31
Slika 31.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>3</sub> sondom MWB 45-2 .....	32
Slika 32.	Detektiranje reflektora SDH <sub>1</sub> sondom MWB 45-2 .....	33
Slika 33.	Detektiranje reflektora SDH <sub>2</sub> sondom MWB 45-2 .....	33
Slika 34.	Detektiranje reflektora SDH <sub>3</sub> sondom MWB 45-2 .....	33
Slika 35.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>1</sub> sondom MWB 45-234	
Slika 36.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>2</sub> sondom MWB 45-234	
Slika 37.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>3</sub> sondom MWB 45-234	
Slika 38.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>1</sub> sondom MWB 45-2 .....	35
Slika 39.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>2</sub> sondom MWB 45-2.....	35
Slika 40.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>3</sub> sondom MWB 45-2.....	36
Slika 41.	Detektiranje reflektora FBH <sub>1</sub> sondom SWB 45-2.....	38
Slika 42.	Detektiranje reflektora FBH <sub>2</sub> sondom SWB 45-2.....	38
Slika 43.	Detektiranje reflektora FBH <sub>3</sub> sondom SWB 45-2.....	38



Slika 44.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>1</sub> sondom SWB 45-2	39
Slika 45.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>2</sub> sondom SWB 45-2	39
Slika 46.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>3</sub> sondom SWB 45-2	39
Slika 47.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>1</sub> sondom SWB 45-2	40
Slika 48.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>2</sub> sondom SWB 45-2	40
Slika 49.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>3</sub> sondom SWB 45-2	41
Slika 50.	Detektiranje reflektora SDH <sub>1</sub> sondom SWB 45-2	42
Slika 51.	Detektiranje reflektora SDH <sub>2</sub> sondom SWB 45-2	42
Slika 52.	Detektiranje reflektora SDH <sub>3</sub> sondom SWB 45-2	42
Slika 53.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>1</sub> sondom SWB 45-2	43
Slika 54.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>2</sub> sondom SWB 45-2	43
Slika 55.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>3</sub> sondom SWB 45-2	43
Slika 56.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>1</sub> sondom SWB 45-2	44
Slika 57.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>2</sub> sondom SWB 45-2	44
Slika 58.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>3</sub> sondom SWB 45-2	45
Slika 59.	Detektiranje reflektora FBH <sub>1</sub> sondom WB 45-2	47
Slika 60.	Detektiranje reflektora FBH <sub>2</sub> sondom WB 45-2	47
Slika 61.	Detektiranje reflektora FBH <sub>3</sub> sondom WB 45-2	47
Slika 62.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>1</sub> sondom WB 45-2	48
Slika 63.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>2</sub> sondom WB 45-2	48
Slika 64.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH <sub>3</sub> sondom WB 45-2	48
Slika 65.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>1</sub> sondom WB 45-2	49
Slika 66.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>2</sub> sondom WB 45-2	49
Slika 67.	Ekran uređaja pri detektiranju FBH <sub>3</sub> sondom WB 45-2	50
Slika 68.	Detektiranje reflektora SDH <sub>1</sub> sondom WB 45-2	52
Slika 69.	Detektiranje reflektora SDH <sub>2</sub> sondom WB 45-2	52
Slika 70.	Detektiranje reflektora SDH <sub>3</sub> sondom WB 45-2	52
Slika 71.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>1</sub> sondom WB 45-2	53
Slika 72.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>2</sub> sondom WB 45-2	53
Slika 73.	Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH <sub>3</sub> sondom WB 45-2	53
Slika 74.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>1</sub> sondom WB 45-2	54
Slika 75.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>2</sub> sondom WB 45-2	54
Slika 76.	Ekran uređaja pri detektiranju SDH <sub>3</sub> sondom WB 45-2	55
Slika 77.	Prikaz tlocrta ultrazvučnih snopova s lijeva na desno SDH <sub>1</sub> , SDH <sub>2</sub> , SDH <sub>3</sub> , korištenjem sonde odozgora prema dolje MWB 45-2, SWB 45-2, WB 45-2	58
Slika 78.	Položaj u kojem sonda MWB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice	59
Slika 79.	Položaj u kojem sonda SWB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice	60
Slika 80.	Položaj u kojem sonda WB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice	60
Slika 81.	Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u glavi tračnice sondom MWB 45-2	61
Slika 82.	Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u glavi tračnice sondom SWB 45-2	61
Slika 83.	Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u glavi tračnice sondom WB 45-2	62
Slika 84.	Položaj u kojem sonda MWB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice	63
Slika 85.	Položaj u kojem sonda SWB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice	63
Slika 86.	Položaj u kojem sonda WB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice	64
Slika 87.	Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u vratu tračnice sondom MWB 45-2	64
Slika 88.	Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u vratu tračnice sondom SWB 45-2	65
Slika 89.	Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u vratu tračnice sondom WB 45-2	65

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Reakcije željeznih oksida i toplina koja se oslobađa [10].....	3
Tablica 2. Koraci u ispitivanju aluminotermijskih zavara tračnica prema normi EN 14730-1 iz 2010. [5] .....	16
Tablica 3. Podaci o korištenim sondama.....	22
Tablica 4. Ovisnost koeficijenta o smanjenju amplitude .....	23
Tablica 5. Rezultati procjenjivanja ekvivalentne veličine reflektora .....	27
Tablica 6. Rezultati ispitivanja FBH sondom MWB 45-2 .....	32
Tablica 7. Rezultati ispitivanja SDH sondom MWB 45-2 .....	36
Tablica 8. Rezultati ispitivanja FBH sondom SWB 45-2 .....	41
Tablica 9. Rezultati ispitivanja SDH sondom SWB 45-2 .....	45
Tablica 10. Rezultati ispitivanja FBH sondom WB 45-2.....	50
Tablica 11. Rezultati ispitivanja SDH sondom WB 45-2 .....	55
Tablica 12. Rezultati mjerenja udaljenosti detektiranog reflektora od izlazne točke $P$ .....	56
Tablica 13. Rezultati mjerenja dubine $DA$ .....	56
Tablica 14. Rezultati mjerenja zvučnog puta $SA$ .....	57
Tablica 15. Rezultati mjerenja ekvivalentne veličine $ERS$ .....	57
Tablica 16. Rezultati ispitivanja greške u glavi tračnice.....	62
Tablica 17. Rezultati ispitivanja greške u vratu tračnice.....	66
Tablica 18. Usporedba greške u vratu tračnice kod uzorka zavara i $SDH_1$ reflektora.....	66

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$a$	-	omjer duljine kraće i duže stranice pravokutne sonde
$D$	mm	promjer pretvornika
$DA$	mm	dubina
$D_{FBH}$	mm	promjer uvrta s ravnim dnom
$D_{SDH}$	mm	promjer bočnog uvrta
$D_{eff}$	mm	efektivna dimenzija pretvornika
$ERS$	mm	ekvivalentna veličina reflektora
$f$	Hz	frekvencija pretvornika
$FB_6$	mm	fokus
$k_{dB}$	-	koeficijent ovisan o amplitudi
$k_a$	-	faktor korekcije
$L$	mm	dimenzija duže stranice pravokutne sonde
$P$	mm	udaljenost izlazne točke od pogreške
$RA$	mm	skraćena projekcija
$N_D$	mm	bliska zona okrugle sonde
$N_L$	mm	bliska zona pravokutne sonde
$s$	mm	zvučni put
$SA$	mm	zvučni put
$v$	m/s	brzina
$\gamma_{dB}$	°	kut divergencije
$\lambda$	mm	valna duljina

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
DGS	<i>Distance Gain Size</i> – Amplituda Daljina Reflektor
FBH	<i>Flat Bottom Hole</i> – uvert s ravnim dnom
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
SDH	<i>Side Drilled Hole</i> – bočni uvert
UIC	<i>Union Internationale des Chemins de fer</i> – Međunarodna željeznička unija

## **SAŽETAK**

Obzirom da željeznički promet služi prijevozu putnika i roba važno je osigurati kvalitetu i sigurnost tračnica. Jedna od metoda zavarivanja tračnica je aluminotermijsko zavarivanje. U ovom diplomskom radu predstavljen je postupak aluminotermijskog zavarivanja tračnica, greške koje mogu pritom nastati te ultrazvučno ispitivanje zavarenog spoja dobivenog tim postupkom. U eksperimentalnom dijelu rada pomoću tri različite sonde ispituje se referentni blok, a potom se tim sondama ispituje stvarni zavareni spoj.

Ključne riječi: aluminotermijsko zavarivanje, ultrazvučno ispitivanje, tračnice

## **SUMMARY**

Rail traffic is used to transport passengers and goods, therefore it's important to ensure quality and safety of rails. One of the methods of rail welding is aluminothermic welding. In this master's thesis aluminothermic rail welding, occurring defects and ultrasonic testing of rail welds are presented. In the experimental part of the thesis, reference block is tested using three different probes, followed by the tests of real weld using the mentioned probes.

Key words: aluminothermic welding, ultrasonic testing, rails

## 1. UVOD

Željeznica kao oblik kopnenog prometnog sustava služi prijevozu putnika i tereta po unaprijed pripremljenom putu, a koristi se u javnom prometu i kao posebni kolosijeci za industrijsku ili drugu gospodarsku namjenu. Kroz povijest željeznički promet se razvija i unapređuje. Prve tračnice bile su drvene, a zbog njihovog brzog trošenja pojavila se potreba za korištenjem drugog materijala. Isprva su vagone, slične današnjima, vukli radnici, a potom konjske zaprege. Prve željeznice koje nalikuju današnjima pojavljuju se krajem 18. stoljeća, a razvojem tehnike mijenja se i način pokretanja vagona na njima. Tako se tokom povijesti koriste parni stroj, dizelsko-električni pogon, plinska turbina. Procjenjuje se da je danas u svijetu izgrađeno oko 1 400 000 km željezničke mreže, a željeznica se smatra ekološki prihvatljivim i sigurnim oblikom prometa jer proizvodi najmanje ugljikovog dioksida po kilometru prevezenih putnika u usporedbi sa zrakoplovom, autobusom i automobilom. Također, dvokolosiječna pruga zauzima manje prostora od autocesta te ima veću prijevoznu vrijednost [1], [2].

Da bi prometovanje željeznicom bilo sigurno zahtijeva se tehnička pouzdanost i sigurnost tračnica. One su tijekom korištenja izložene velikim unutarnjim i vanjskim naprezanjima, a pritom su zavareni spojevi tračnica kritične točke. Tračnice se mogu spajati zavarivanjem pod pritiskom, elektrolučnim zavarivanjem te aluminotermijskim zavarivanjem. Ovaj rad bavi se aluminotermijskim zavarima, a takvi spojevi mogu se ispitivati ultrazvučnom metodom koja se pokazuje kao pogodna za otkrivanje i lociranje grešaka te prepoznavanje njihove vrste. Greške u zavarenim spojevima mogu nastati kao posljedica ljudskog rada ili metalurške greške [3], [4].

Kao neke od prednosti koje se ostvaruju postojanjem kontinuiranog željezničkog kolosijeka mogu se izdvojiti smanjeni troškovi održavanja, veća sigurnost prometa, duži vijek trajanja konstrukcije vagona, smanjeni obujam radova na kolosijeku te veća udobnost za putnike [4].

Ispitivanje aluminotermijskih zavara na tračnicama uređeno je normama. Među njima se ističu norme EN 14730-1 izdanja iz 2010. i 2017. godine [5, 6] te norma EN 16771 [7] kojima su uređena laboratorijska ispitivanja i zahtjevi za atestiranje aluminotermijskih zavara. Norma EN 14587-1 [8] propisuje atestiranje zavarivačkog postupka. Niti jedna od navedenih

normi ne odnosi se na ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva tračnica kod izgradnje pruga, odnosno zavarivanje tračnica na terenu [5], [6], [7], [8].

U teorijskom dijelu rada opisuje se aluminotermijsko zavarivanje te ultrazvučna ispitivanja, a u eksperimentalnom dijelu ispituju se referentni blok te uzorak zavarenog spoja na tračnici dobiven aluminotermijskim zavarivanjem.



## 2. ALUMINOTERMIJSKO ZAVARIVANJE

Dužina zavora u ukupnoj dužini tračnica iznosi manje od 2 %, a čak do 30 % povlačenja tračnica iz rada događa se zbog pogrešaka u zavarenom spoju. Od zavarenih spojeva zahtijeva se ravnost u horizontalnom i vertikalnom smjeru, da imaju ista svojstva kao i tračnice, moraju biti čvrsti, dugotrajni, otporni na zamor te bez pogrešaka i uključaka [4].

### 2.1. Postupak aluminotermijskog zavarivanja tračnica

Proces aluminotermijskog zavarivanja odvija se ulijevanjem željezne taline u kalup koji okružuje otvor između krajeva tračnica koje treba spojiti. Aluminotermijsko zavarivanje temelji se na kemijskoj reakciji kojom se željezni oksid pretvara u željezo. Za tu reakciju koristi se mješavina željeznih otpadaka i aluminija, takozvani termit. Potrebno je da aluminij sadrži 98 do 99 % čistog aluminija, a željezni otpadci moraju biti spaljeni kako ne bi sadržavali vlagu ili ulje. Smjesa, koja zadovoljava te uvjete, se usitnjava na veličinu zrna od 0,1 do 2,5 mm. Udio kisika u smjesi mora biti najmanje 25 %. Naime, željezo i kisik formiraju tri oksida. To su FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Ova reakcija se ne događa pri sobnoj temperaturi, već kada dođe do zagrijavanja smjese na temperaturu od 1300 °C, koja se postiže izgaranjem posebnog praška za paljenje, a pregrijana talina dostiže temperaturu od oko 2500 °C [3], [4], [9], [10].

Reakcije željeznih oksida te toplina koja se pritom oslobađa prikazane su u *Tablici 1* [10].

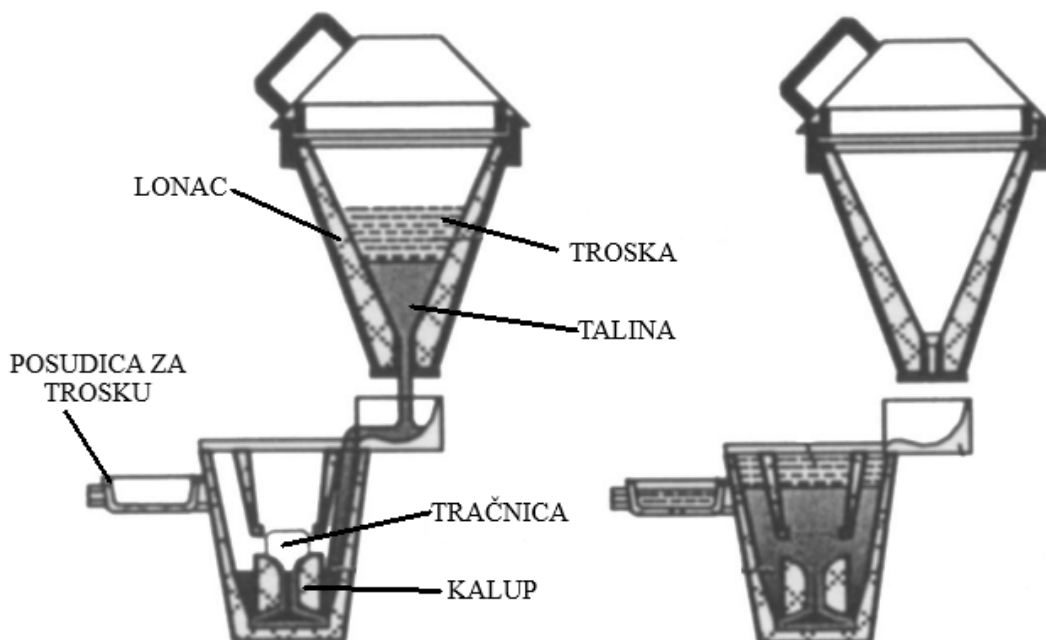
**Tablica 1. Reakcije željeznih oksida i toplina koja se oslobađa [10]**

Reakcija	Oslobodena toplina
$3 \text{ FeO} + 2 \text{ Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{ Fe}$	783 kJ
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{ Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{ Fe}$	758 kJ
$3 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + 8 \text{ Al} \rightarrow 4 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 9 \text{ Fe}$	3012 kJ

Prije pokretanja kemijske reakcije krajeve tračnica potrebno je odrezati, poravnati i postaviti na određeni razmak te ih predgrijati na temperaturu od 950 °C odnosno 1050 °C ovisno o kvaliteti tračnice. Vrijeme predgrijavanja ovisi o vrsti tračnica, razmaku, plamenu i

vremenskim uvjetima. Kemijska reakcija se odvija u loncu otpornom na visoke temperature koji se nalazi iznad kalupa. Talina teče u kalup, a kako je zagrijana na temperaturu gotovo dvostruku temperaturi taljenja, tale se i rubovi osnovnog metala tračnica. Željezna talina nastala u reakciji puni kalup, a troska izlazi na površinu i odlazi u posudicu za trosku. Na dnu lonca se nalazi čep kojim se kontrolira tečenje taline. Nakon zavarivanja zavar se grubo obrađuje u vrućem stanju i fino brusi. Potrebno je očistiti zavar od pijeska i viška materijala. Važno je omogućiti sporo hlađenje kako bi se zadržala mikrostruktura [3], [9], [10].

Na *Slici 1* nalazi se skica osnovne opreme i postupka aluminotermijskog zavarivanja tračnica, a na *Slici 2* nalazi se prikaz aluminotermijskog zavarivanja tračnica [3], [11].



Slika 1. Skica osnovne opreme i postupka aluminotermijskog zavarivanja tračnica [3]



**Slika 2. Prikaz aluminotermijskog postupka zavarivanja tračnica [11]**

Na *Slici 3* nalazi se prikaz gotovog aluminotermijskog zavora na tračnicama [12].



**Slika 3. Prikaz tračnica zavarenih aluminotermijskim postupkom [12]**

### **2.1.1. Prednosti i nedostaci aluminotermijskog zavarivanja**

Kao prednosti aluminotermijskog zavarivanja mogu se izdvojiti [4]:

- pokretljivost
- kratko vrijeme rukovanja
- zavarivanje se odvija bez električne energije.

Kao nedostaci aluminotermijskog zavarivanja mogu se izdvojiti [4]:

- nije moguće nadzirati i izravno upravljati procesom zavarivanja
- široka i nekontrolirana zona utjecaja topline
- kvaliteta smjese utječe na kvalitetu zavara
- kvaliteta zavara ovisi o iskustvu i postupanju zavarivača.

## **2.2. Greške kod aluminotermijskih zavara**

Prema UIC kodu 712 [13] koji obrađuje pogreške na tračnicama, zona zavarivanja se prostire 100 mm sa svake strane središnje linije zavara, odnosno u ukupnoj dužini od 200 mm. Svaka greška koja se utvrdi u volumenu tog područja klasificira se kao greška zavarivanja [13].

### **2.2.1. Uzroci grešaka kod aluminotermijskih zavara**

Ukoliko se aluminotermijsko zavarivanje ne izvodi ispravno, u zavaru se mogu pojaviti pogreške. One mogu nastati iz više razloga, a to su [3]:

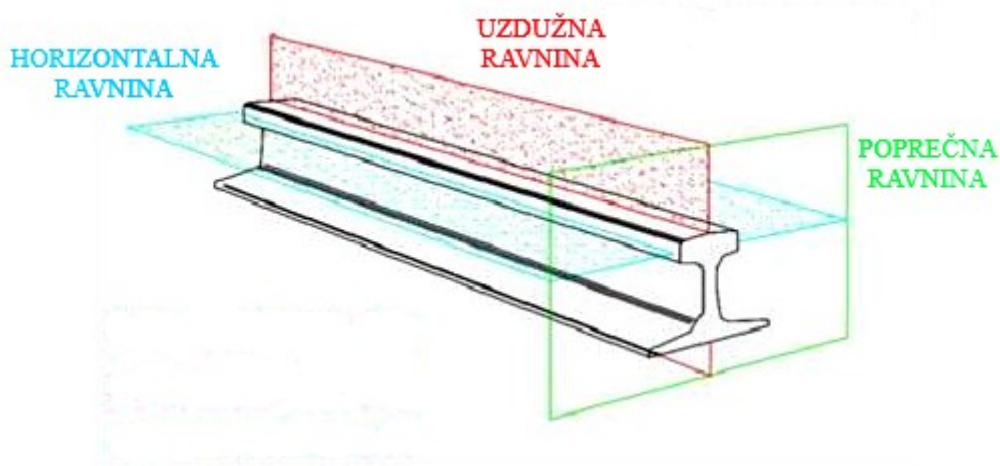
- preveliki komadi željeza u termitnoj smjesi
- loša priprema lonca
- neodgovarajući razmak između tračnica
- loše predgrijavanje
- prerani početak lijevanja
- prerano skidanje kalupa
- neprikladne operacije nakon zavarivanja.

### 2.2.2. Vrste grešaka kod aluminotermijskih zavara

Neke vrste grešaka u aluminotermijskom zavaru koje se pojavljuju zbog nepravilnog izvođenja zavarivanja su [12], [14]:

- pukotine uzduž vrata tračnice
- naljepljivanje
- uključci pijeska
- uključci troske
- lom kroz središte zavara
- pucanje zavara na rubovima tračnica nakon hlađenja
- skupljanje zavara
- poroznost.

Na *Slici 4*, radi lakšeg snalaženja u pogledu orijentacije pojedinih vrsta pogrešaka, prikazane su ravnine tračnice [15].



Slika 4. Ravnine tračnice [15]

Od navedenih, najčešći uzroci nezadovoljavajuće kvalitete zavara su poroznosti, naljepljivanje i skupljanje zavara. Prikaz poroznosti nalazi se na *Slici 5*, pogreška skupljanja zavara u vratu tračnice prikazana je na *Slici 6*, a naljepljivanje je prikazano na *Slici 7*. Dok se

pore mogu pojaviti u bilo kojem dijelu volumena zavarenog spoja, skupljanje se češće pojavljuje u vratu tračnice, a naljepljivanje u stopi [12].



**Slika 5. Poroznosti [12]**



**Slika 6. Skupljanje [12]**



**Slika 7. Naljepljivanje [15]**

Prema već spomenutom UIC kodu 712 [13], oznake pogreške na tračnicama sastoje se od četiri znamenke. Ukoliko kao prva znamenka stoji broj 4 tada to ukazuje na grešku zavora. Druga znamenka pokazuje o kojoj metodi zavarivanja se radi, a u slučaju aluminotermijskog zavarivanja stavlja se broj 2. Znamenka na trećem mjestu označava podrijetlo ili strukturu greške. Ovisno o tome jesu li pogreške poprečne ili horizontalne označavaju se brojem 1, odnosno brojem 2. Četvrta znamenka pobliže klasificira pogrešku [13].

Tako se poprečne pukotine profila označavaju kodom 421. Te pukotine nastaju u ravnini poprečnog presjeka te dovode do pucanja profila. Primjer takve pukotine se nalazi na *Slici 8* [13].





**Slika 8. Primjer greške označene kodom 421 [13]**

Kodom 422 se označavaju horizontale pukotine na vratu tračnice, a one se uglavnom pojavljuju kod zavara tračnica kojima prethodno krajevi nisu odrezani. Primjer takve pukotine nalazi se na *Slici 9* [13].



**Slika 9. Primjer pukotine označene kodom 422 [13]**



### 2.3. Zahtjevi postupka zavarivanja tračnica

Aluminotermijsko zavarivanje, koje se koristi već desecima godina za zavarivanje tračnica širom svijeta, doživjelo je mnoga unapređenja te se danas koristi za sve oblike tračnica. Europskim standardom EN 14730-1, koji je prvi put izdan 2006. godine, standardizira se odobravanje aluminotermijskog postupka zavarivanja tračnica [11].

Prema normi EN 14730-1:2017 zavari moraju ispunjavati sljedeće zahtjeve [6]:

- postupak se mora moći izvesti na nagnutim kolosijecima gdje je maksimalna razlika u visini između dvije tračnice 180 mm
- postupak se mora moći izvoditi na pruži, u blizini pruge ili u radioni
- smjesa za zavarivanje mora biti pakirana u propisanim uvjetima tako da se izbjegne rizik kontaminacije vlagom
- smjesa mora imati oznake na pakiranju
- kalup za tračnicu mora biti unaprijed izrađen
- kalup mora imati oznake na pakiranju
- lonac treba biti punjen automatski
- lonac mora imati uređaj koji ograničava prskanje.

Uz navedene zahtjeve u normi EN 14730-1, koja je iz 2010. godine [5], stoji i kako proces zavarivanja ne smije oštetiti tračnicu, a u normi EN 16771, koja je iz 2016. godine [7], navodi se i da predgrijavanje treba biti u skladu s ograničenjima tijela nadležnog za željeznice [5], [7].

### 3. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE

Ultrazvučna metoda ispitivanja, kao jedna od nerazornih metoda ispitivanja, ima široku primjenu. Primjenjuje se u otkrivanju pogrešaka, procjeni stanja strukture, mjerenju fizikalnih svojstava materijala i mjerenju dimenzija, a oprema može biti za ručnu kontrolu sa ili bez računalne podrške, poluautomatski i automatski sustavi [16].

#### 3.1. Princip rada ultrazvuka

Za otkrivanje pogrešaka u objektu zaslužno je svojstvo ultrazvuka da se valovi šire u sredstvu. Na stijenci objekta ili na granici između materijala i nepravilnosti, odnosno jednostavno rečeno na granici sredstva, dolazi do loma i odbijanja ultrazvučnih valova, difrakcije ili druge vrste međudjelovanja sredstva i ultrazvučne energije [16].

Najvažniji dio ultrazvučnog sustava su sonde u kojima se nalazi pretvarač. Njegova je funkcija titranje kojim zbog različitih vanjskih poticaja stvara ultrazvučne valove. Od više vrsta pretvarača najčešće se koriste oni od piezoelektričkih materijala. Njima se može registrirati prijem i proizvoditi ultrazvuk. Kako bi se mogle otkrivati pogreške, mjeriti dimenzije i analizirati struktura ispitivanog materijala potrebno je osigurati kratkotrajni impuls i amplitudu odašiljačkog signala veličine par stotina volti [16].

Ultrazvučni titraji se prenose na sredstvo s kojim je sonda u kontaktu, a energiju titranja kroz materijal prenose ultrazvučni valovi, koji mogu biti longitudinalni i transverzalni [16].

Ultrazvučni valovi koji se odašilju u osnovni materijal i volumen zavarenog spoja tračnice odbijaju se od njenih površina, a pukotine i diskontinuiteti koji se nalaze u materijalu zavara te bridovi tračnica ponašaju se kao reflektirajuće površine. Znajući to, primanjem, prikazom i tumačenjem povratnih ultrazvučnih signala moguće je otkriti pogreške u tračnici [17].

### 3.2. Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode ispitivanja

Kao prednosti ultrazvuka prema drugim nerazornim metodama navode se [18], [19]:

- siguran je za ispitivača
- odmah daje rezultate
- pogodan za velike debljine
- ekonomičnost
- može otkriti gotovo sve vrste grešaka
- može otkriti veličinu, oblik i vrstu greške
- visoka osjetljivost koja omogućuje otkrivanje manjih grešaka
- može se koristiti za ispitivanje objekata kojima je omogućen pristup samo jednoj strani
- bolje određuje dubinu na kojoj se nalazi greška
- bolje određuje debljinu dijelova s paralelnim stijenkama
- prenosivost
- lako se automatizira.

Kao nedostaci ultrazvučne metode izdvajaju se [19]:

- zahtijeva iskustvo ispitivača
- moguće su lažne indikacije
- nije pogodan za objekte koji su hrapavi, tanki i nepravilnog oblika
- nije pogodan za nehomogene objekte
- prije ispitivanja potrebno je ukloniti nečistoće na površini.

### 3.3. Postupak ultrazvučnog ispitivanja tračnica

Norma EN 14730-1:2017 [6] propisuje odobravanje postupka zavarivanja te propisuje postupak ispitivanja zavara ultrazvukom kod izrezanih uzoraka tračnica. Tom metodom mogu se otkriti nedostaci stapanja, plinski uključci te tople pukotine uzrokovane pomicanjem tračnice. Ona propisuje da se dio tračnice koji sadržava zavar reže sa dva poprečna reza, međusobno paralelna i okomita na uzdužnu os zavara, svaki s jedne strane zavara na jednakoj

udaljenosti od ruba zavora. Razmak između rezova mora biti između 180 mm i 200 mm u slučaju standardne širine zavora, odnosno između 210 mm i 230 mm u slučaju zavora sa širokim razmakom tj. širine veće od 30 mm [6].

Da bi se ispitivanje moglo provoditi potrebno je imati uređaj koji je odobrilo nadležno tijelo za željeznice, dvostruku ravnu sondu promjera 20 mm i frekvencije između 4 i 5 MHz te referentni uzorak [6].

Osnovni preduvjet za određivanje lokacije greške u ispitivanom objektu je podešavanje mjernog područja. Njime se na ultrazvučnoj sondi postiže linearno pridruživanje dimenzija objekta horizontalnoj skali zaslona, a pridruženo područje naziva se mjerno područje [16].

Norma EN 14730-1:2017 [6] nalaže da se mjerno područje ultrazvučnog uređaja podešava korištenjem stepeničastog kalibracijskog bloka. Za zavarne sa širinom razmaka do 30 mm vremenska baza namješta na 10 mm po podjeli ljestvice, dok se za zavarne sa širinom razmaka većom od 30 mm namješta na 20 mm po podjeli ljestvice [6].

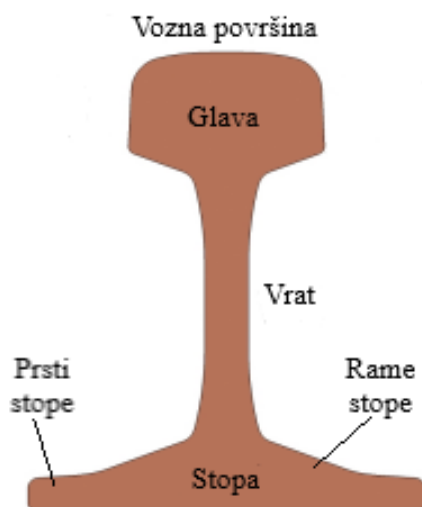
Osjetljivost se podešava, svaki put iznova za svaku površinu, na način da se sonda postavlja na površinu uzorka i dobiva se odziv od suprotne površine. Razina dobivenog signala se podešava dok ne dosegne punu visinu zaslona [6].

Prema normi EN 14730-1:2017 [6] ispitivanje se izvodi na način da se sonda postavi na odrezanu površinu uzorka i da se od suprotne paralelne površine dobije signal visine ekrana. Potrebno je ispitati cijeli presjek i bilježiti signale i područja gdje signal padne ispod polovice visine zaslona. Ako se otkrije signal ili pad signala suprotne površine potrebno je odrediti granice područja s pogreškom pomicanjem sonde te označiti to područje, a pomoću vremenske baze potrebno je odrediti dubinu na kojoj se nalazi pogreška te uz nju zabilježiti i amplitudu. Ispitivanje je potrebno ponoviti s druge odrezane površine [6].

### 3.3.1. Koraci u ispitivanju aluminotermijskih zavara tračnica

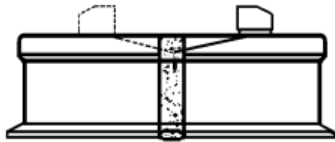
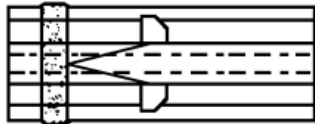
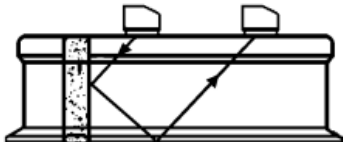
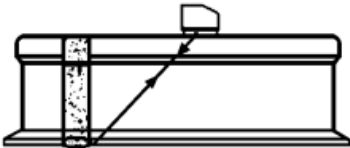
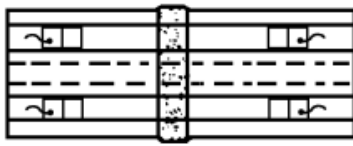

Norma EN 14730-1 iz 2010. godine [5] također propisuje odobravanje postupka zavarivanja te govori o toku ispitivanja aluminotermijskih zavara na tračnicama. Prema njoj ono se provodi u 6 koraka. Ti koraci su prikazani u *Tablici 2*, a u svima se traže signali čija je visina veća od polovice ekrana [5].

Radi lakšeg snalaženja na *Slici 10* označeni su dijelovi tračnice [20].



Slika 10. Dijelovi tračnice [20]

**Tablica 2. Koraci u ispitivanju aluminotermijskih zavara tračnica prema normi EN 14730-1 iz 2010. [5]**

	Područje	Greška	Položaj sonde	Sonda
1	glava tračnice	plošne greške		jedna dvostruka sonda s izlaznim kutom 70°, transverzalni valovi, $f = 2$ MHz
2	glava tračnice	volumne greške		dvije jednostruke sonde s izlaznim kutom 70°, transverzalni valovi, $f = 2$ MHz
3	glava i vrat tračnice	plošne greške		dvije jednostruke sonde s izlaznim kutom 45°, transverzalni valovi, $f = 2$ MHz
4	središnji dio stope			jedna jednostruka sonda s izlaznim kutom 45°, transverzalni valovi, $f = 2$ ili 4 MHz
5	rame stope			jedna jednostruka sonda s izlaznim kutom 70°, transverzalni valovi, $f = 2$ ili 4 MHz
6	prsti stope			jedna jednostruka sonda s izlaznim kutom 70°, transverzalni valovi, $f = 2$ ili 4 MHz

### 3.4. Oprema za ultrazvučno ispitivanje tračnica

Željeznički promet zahtjeva sigurnost i pouzdanost kako vozila tako i tračnica pa se stoga provode pregledi koji mogu biti redovni ili izvanredni. Pregledi i popravci određuju se prema životnom vijeku tračnica ili prema intenzitetu korištenja. Oštećenjem ili kvarom tračnica može doći do velikih troškova te stradanja [21].

Na tržištu se nalazi nekoliko vrsta uređaja za ispitivanje tračnica, a predstavljeni su u narednim poglavljima. Radi se o uređajima za ispitivanje jedne tračnice, uređajima za ispitivanje obje tračnice te vozilima za ispitivanje. Ti uređaji se koriste u svrhu ispitivanja tračnica cijelom njihovom duljinom tijekom eksploatacije [22], [23], [24].

#### 3.4.1. Uređaji za ispitivanje jedne tračnice

Na *Slici 11* prikazan je UDS2-77 proizvođača OKOndt GROUP. Radi se o uređaju koji može ispitivati samo jednu tračnicu [22].



Slika 11. UDS2-77 proizvođača OKOndt GROUP [22]

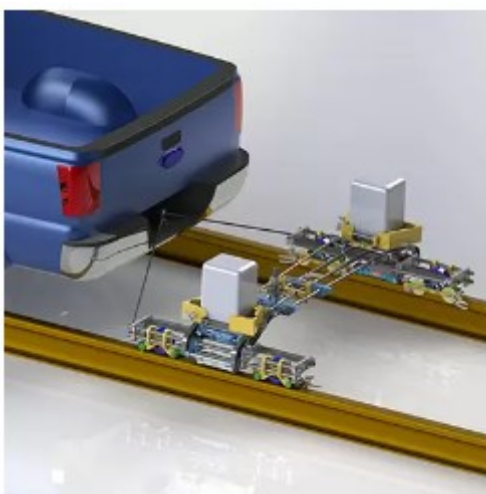
### 3.4.2. Uređaji za ispitivanje obje tračnice

Na *Slici 12* prikazan je UDS2-73 proizvođača OKOndt GROUP. Radi se o uređaju koji ispituje postojanje grešaka u obje tračnice [23].



Slika 12. UDS2-73 proizvođača OKOndt GROUP [23]

Na *Slici 13* je prikazana motorizirana verzija uređaja za ispitivanje dvije tračnice proizvođača Pandrol, a ispitivanje može vršiti brzinom 20 km/h [24].



Slika 13. Motorizirana verzija uređaja za ispitivanje proizvođača Pandrol [24]



### 3.4.3. Vozila za ispitivanje

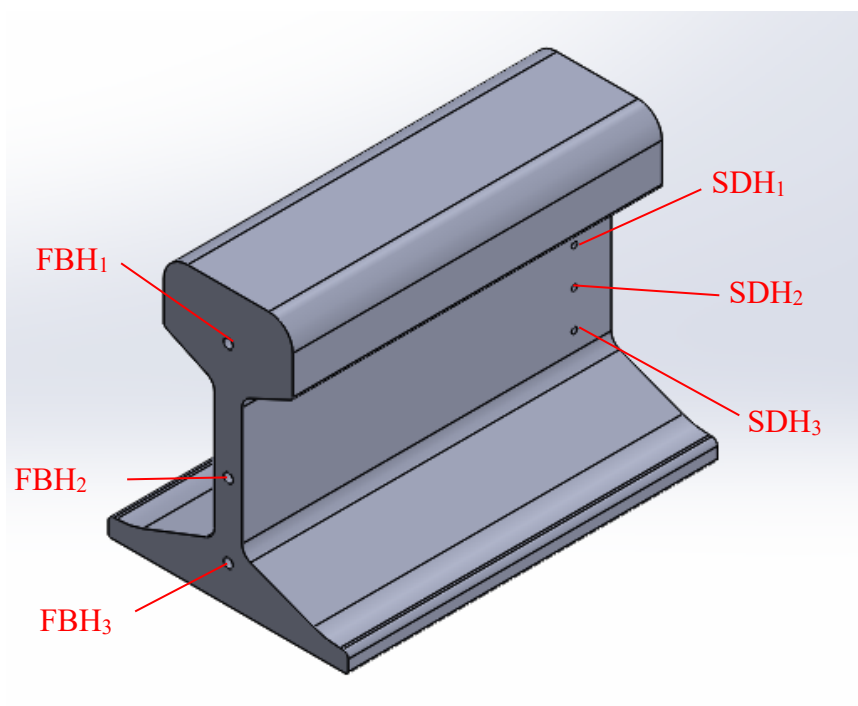
Na *Slici 14* prikazano je tračničko vozilo za ispitivanje tračnica, a radi se o proizvodu proizvođača Tvema. Ultrazvučno ispitivanje samo je jedna od funkcija ovog vozila, a njegova brzina premašuje 100 km/h [25].



Slika 14. Vozilo za ispitivanje tračnica proizvođača Tvema [25]

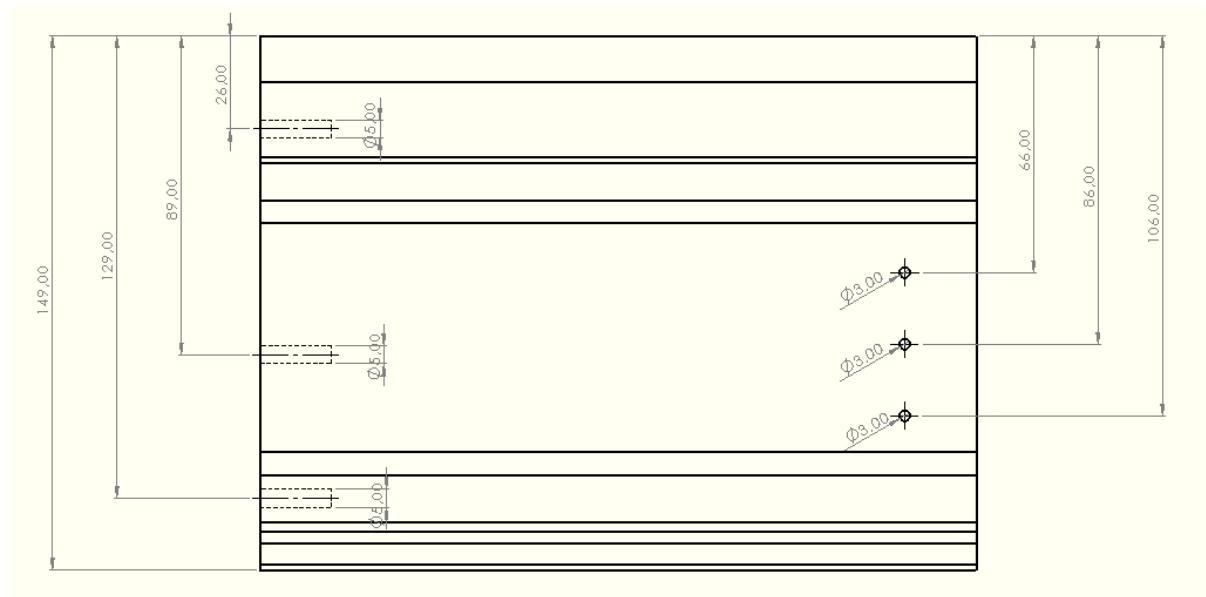
#### 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U prvom dijelu eksperimentalnog dijela provedeno je ispitivanje na referentnom bloku s ciljem dobivanja signala odjeka od referentnih reflektora. Referentni reflektori bazirani su na zahtjevima norme EN 14730 iz 2010. godine [5]. Prikaz bloka s označenim reflektorima nalazi se na *Slici 15*. Može se uočiti kako se radi o tri uvrta s ravnim dnom (FBH<sub>1</sub>, FBH<sub>2</sub>, FBH<sub>3</sub>) te tri bočna uvrta (SDH<sub>1</sub>, SDH<sub>2</sub>, SDH<sub>3</sub>). U drugom dijelu ispitivan je uzorak aluminotermijskog zavara. Kao što je spomenuto u drugom poglavlju rada, iz raznih razloga, u volumenu zavarenog spoja mogu se pojaviti greške poput pukotina, naljepljivanja, uključaka, lomova i poroznosti koje se nastoje otkriti ispitivanjem, kao i utvrditi koja je od ponuđenih sondi najpogodnija za ispitivanje.



Slika 15. Referentni blok

Na *Slici 16* nalazi se bokocrt referentnog bloka s naznačenim dubinama na kojima se nalaze referentni reflektori. Prikazane dimenzije dobivene su mjerenjem prije provođenja ispitivanja.



**Slika 16. Bokocrt referentnog bloka s naznačenim dubinama na kojima se nalaze reflektori**

#### 4.1. Oprema

Za ispitivanje su korištene tri sonde. Radi se o kutnim sondama od  $45^\circ$  i 2 MHz. Od najmanje prema najvećoj to su MWB 45-2, SWB 45-2 I WB 45-N2. Prikazane su na *Slici 17*, a podaci o njima su prikazani u *Tablici 3*.

Na svakoj od sondi, prije detektiranja referentnih reflektora na referentnom bloku, pomoću etalona V1 određenog međunarodnim standardom ISO 2400, provjereni su izlazni kut te izlazna točka. Blisko polje, fokus, kut divergencije i dimenzije pretvornika pronađeni su u podacima proizvođača.



Slika 17. Sonde

Tablica 3. Podaci o korištenim sondama

	MWB 45-2	SWB 45-2	WB 45-N2
Izlazni kut [°]	45	45	45
Izlazna točka [mm]	13	12	32
Frekvencija, $f$ [MHz]	2	2	2
Brzina, $v$ [m/s]	3239	3239	3239
Blisko polje, $N$ [mm]	15	39	90
Fokus, $FB_6$ [mm]	2	2,5	3,8
Kut divergencije, $\gamma_{dB}$ [°]	4,14	2,7	1,71
Efektivna dimenzija pretvornika, $D_{eff}$ [mm]	$7,7 \times 8,6$	$13,6 \times 13,6$	$19,2 \times 21,1$

Blisko polje i kut divergencije koji ovise o veličini i frekvenciji pretvornika. Oni su definirani sljedećim izrazima:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (1)$$

$$N = \frac{D^2 f}{4v} \quad (2)$$

$$\sin \gamma_{dB} = k_{dB} \left( \frac{\lambda}{D} \right) \quad (3)$$

Gdje je:

$N_D$	mm	blisko polje
$D$	mm	promjer pretvornika
$\lambda$	mm	valna duljina
$f$	Hz	frekvencija pretvornika
$v$	m/s	brzina
$\gamma_{dB}$	°	kut divergencije
$k_{dB}$	-	koeficijent ovisan o smanjenju amplitude u decibelima.

U Tablici 4 su prikazani iznosi  $k_{dB}$  ovisno o smanjenju amplitude.

**Tablica 4. Ovisnost koeficijenta o smanjenju amplitude**

Amplituda [dB]	$k_{dB}$
6	0,56
20	1,08
rub	1,22

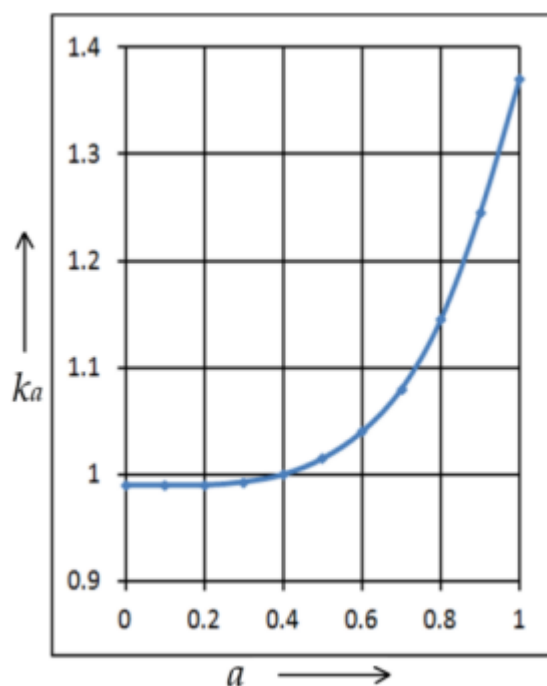
U slučaju pravokutne sonde izraz je nešto drugačiji. Potrebno je uvesti faktor korekcije koji je omjer kraće i duže dimenzije pravokutne sonde [26]:

$$N_{pravokutna} = \frac{k_a(L^2)f}{4v} \quad (4)$$

Gdje je:

$N_L$	mm	blisko polje pravokutne sonde
$k_a$	-	faktor korekcije
$L$	mm	duža dimenzija pravokutne sonde
$f$	Hz	frekvencija pretvornika
$v$	m/s	brzina

Na *Slici 18* se nalazi graf koji prikazuje ovisnost faktora korekcije  $k_a$  o omjeru duljina kraće i duže stranice pravokutne sonde  $a$  [26].



**Slika 18. Ovisnost faktora korekcije o omjeru duljina kraće i duže stranice pravokutne sonde [26]**

Ultrazvučni uređaj s kojeg se očitavaju rezultati ispitivanja je Krautkramer USM 36, a prikazan je na *Slici 19*.



**Slika 19. Krautkramer USM 36**

Od ostale opreme za spajanje sonde MWB 45-2 i SWB 45-2 s uređajem koristi se kabel MPKL 2 (prikazan na *Slici 20*), a za spajanje sonde WB 45-2 kabel prikazan na *Slici 21*.



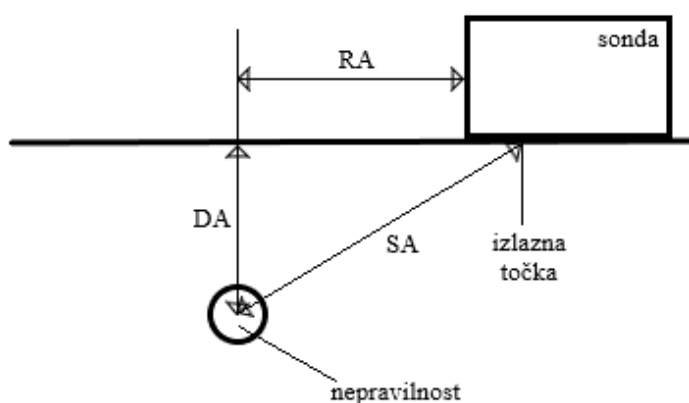
**Slika 20. Kabel MPKL 2 za spajanje sonde MWB 45-2 i SWB 45-2 s uređajem**



Slika 21. Kabel za spajanje sonde WB 45-2 s uređajem

#### 4.2. Ultrazvučno ispitivanje referentnog bloka

Informacijama koje se mogu očitati s uređaja, a relevantne su za ovo ispitivanje, pojavljuju se skraćena projekcija  $RA$ , dubina  $DA$ , zvučni put  $SA$  te ekvivalentna veličina reflektora  $ERS$ . Na Slici 22 prikaza je skica koja prikazuje skraćenu projekciju, dubinu i zvučni put.



Slika 22. Skraćena projekcija, dubina i zvučni put



U svrhu procjenjivanja veličine ekvivalentne veličine reflektora (*ERS*) u ultrazvučnom ispitivanju koristi se DGS dijagram. On prikazuje odnos amplitudnih odziva između različitih veličina FBH na različiti udaljenostima. Obzirom da se on odnosi samo na FBH, u slučaju SDH potrebno je preračunati amplitudni odziv. To se radi prema sljedećem izrazu:

$$D_{FBH} = \sqrt{\frac{v}{\pi \cdot f} \sqrt{2 \cdot s \cdot D_{SDH}}} \quad (5)$$

Gdje je:

$D_{FBH}$	mm	promjer uvrta s ravnim dnom
$v$	m/s	brzina
$f$	Hz	frekvencija pretvornika
$s$	mm	zvučni put
$D_{SDH}$	mm	promjer bočnog uvrta.

Korištenjem izraza (5), prema geometrijskim prikazima sa *Slike 16* i *Slike 22* te uvrštavanjem poznatih vrijednosti iz *Tablice 3* dobiveni su rezultati procjenjivanja ekvivalentne veličine reflektora prikazani u *Tablici 5*.

**Tablica 5. Rezultati procjenjivanja ekvivalentne veličine reflektora**

	MWB 45-2			SWB 45-2			WB 45-2		
	D <sub>SDH1</sub>	D <sub>SDH2</sub>	D <sub>SDH3</sub>	D <sub>SDH1</sub>	D <sub>SDH2</sub>	D <sub>SDH3</sub>	D <sub>SDH1</sub>	D <sub>SDH2</sub>	D <sub>SDH3</sub>
<b>s [mm]</b>	90,84	119,46	150,15	94,34	120,34	144,69	93,43	120,69	149,17
<b>f [MHz]</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>v [m/s]</b>	3239	3239	3239	3239	3239	3239	3239	3239	3239
<b>D<sub>FBH</sub> [mm]</b>	3,5	3,7	3,9	3,5	3,7	3,9	3,5	3,7	3,9

#### **4.2.1. Ispitivanje sondom MWB 45-2**

Prvo ispitivanje provedeno je sondom MWB 45-2. Radi se o kutnoj sondi s izlaznim kutom  $45^\circ$  i frekvencije 2 MHz.

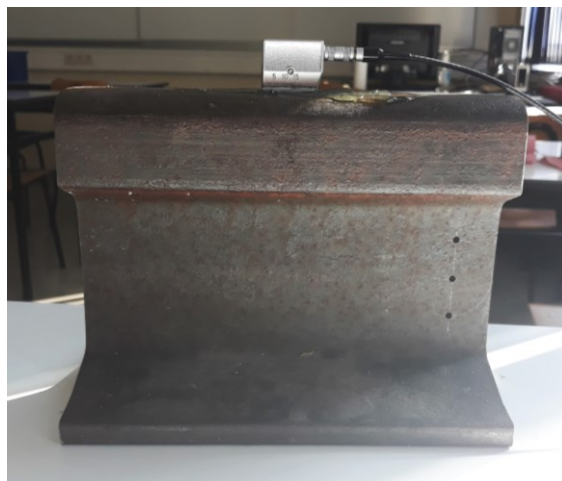
##### *4.2.1.1. Prikaz odjeka reflektora FBH sondom MWB 45-2*

Na narednim slikama prikazani su položaji u kojima sonda MWB 45-2 detektira postojanje referentnih reflektora FBH na referentnom bloku. Na *Slici 23* prikazana je sonda u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>1</sub>, na *Slici 24* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 25* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>3</sub>.

Da bi usporedba položaja ultrazvučnih sondi na bloku bila lakša navede slike su prikazane zajedno na stranici.



**Slika 23. Detektiranje reflektora FBH<sub>1</sub> sondom MWB 45-2**

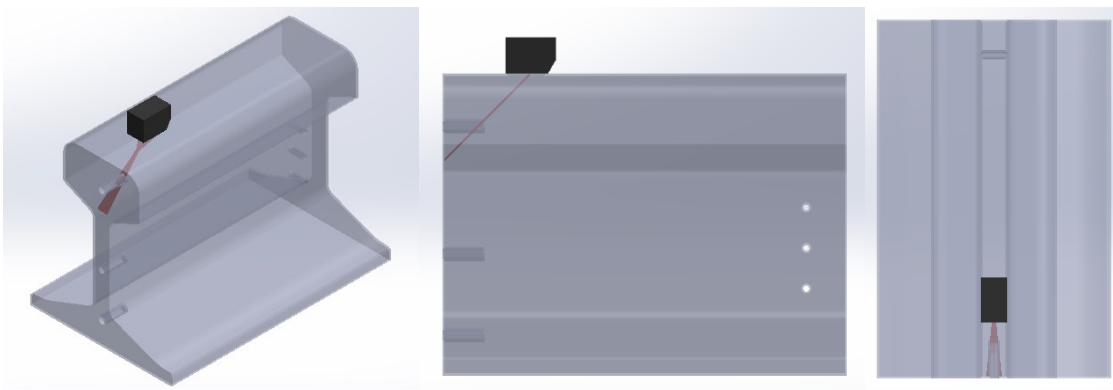


**Slika 24. Detektiranje reflektora FBH<sub>2</sub> sondom MWB 45-2**



**Slika 25. Detektiranje reflektora FBH<sub>3</sub> sondom MWB 45-2**

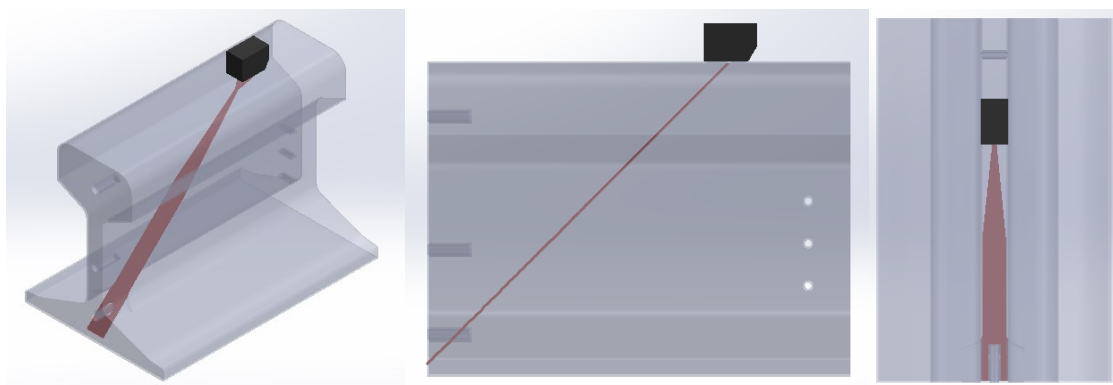
Na narednim slikama prikazane su geometrije ultrazvučnih snopova pri detektiranju FBH sondom MWB 45-2. S lijeva na desno je prikazana izometrija, bokocrt i tlocrt. Na *Slici 26* prikazana je geometrija snopa prilikom ispitivanja FBH<sub>1</sub>, na *Slici 27* prilikom ispitivanja FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 28* prilikom ispitivanja FBH<sub>3</sub>.



**Slika 26. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>1</sub> sondom MWB 45-2**



**Slika 27. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub> sondom MWB 45-2**



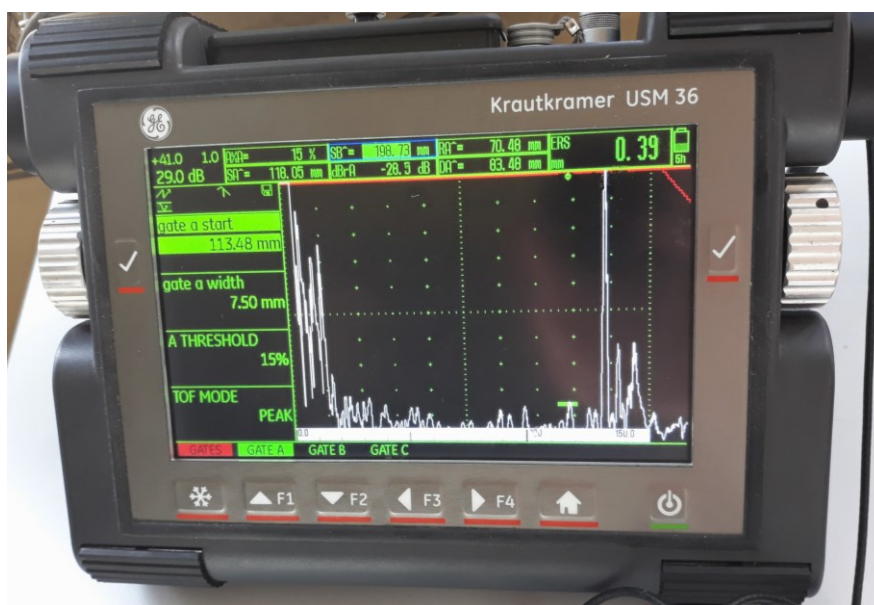
**Slika 28. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub> sondom MWB 45-2**

Na prethodnim slikama se može uočiti kako u vratu tračnice prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub> i FBH<sub>3</sub> dolazi do odbijanja ultrazvučnog snopa od bočnih površina vrata tračnice.

Na narednim slikama prikazani su ekrani uređaja u trenucima kada sonda detektira reflektor na referentnom bloku. Signal za koji se daju rezultati presječen je kontrolnim vratima. Na *Slici 29* prikazan je ekran prilikom detektiranja FBH<sub>1</sub>, na *Slici 30* prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 31* prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub>.



Slika 29. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>1</sub> sondom MWB 45-2



Slika 30. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>2</sub> sondom MWB 45-2



Slika 31. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>3</sub> sondom MWB 45-2

Iz prikaza ekrana na prethodnim slikama može se uočiti kako se prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub> i FBH<sub>3</sub> javlja mnogo šumova. Pri njihovom detektiranju pojačanje je veliko, a povećanjem iznosa pojačanja raste i šum. Povećanju šumova pridonosi i utjecaj širine vrata tračnice na širinu ultrazvučnog snopa.

Rezultati koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja su prikazani u *Tablici 6*.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja FBH sondom MWB 45-2

	<i>SA</i>	<i>RA</i>	<i>DA</i>	<i>ERS</i>
<b>FBH<sub>1</sub></b>	34,29 mm	11,24 mm	24,24 mm	0,27 mm
<b>FBH<sub>2</sub></b>	118 mm	70,48 mm	83,48 mm	0,39 mm
<b>FBH<sub>3</sub></b>	175,03 mm	110,77 mm	123,77 mm	0,34 mm

#### 4.2.1.2. Prikaz odjeka reflektora SDH sondom MWB 45-2

Na narednim slikama prikazani su položaji u kojima sonda MWB 45-2 detektira postojanje referentnih reflektora SDH na referentnom bloku. Na *Slici 32* detektira SDH<sub>1</sub>, na *Slici 33* detektira SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 34* detektira SDH<sub>3</sub>.





**Slika 32. Detektiranje reflektora SDH<sub>1</sub> sondom MWB 45-2**

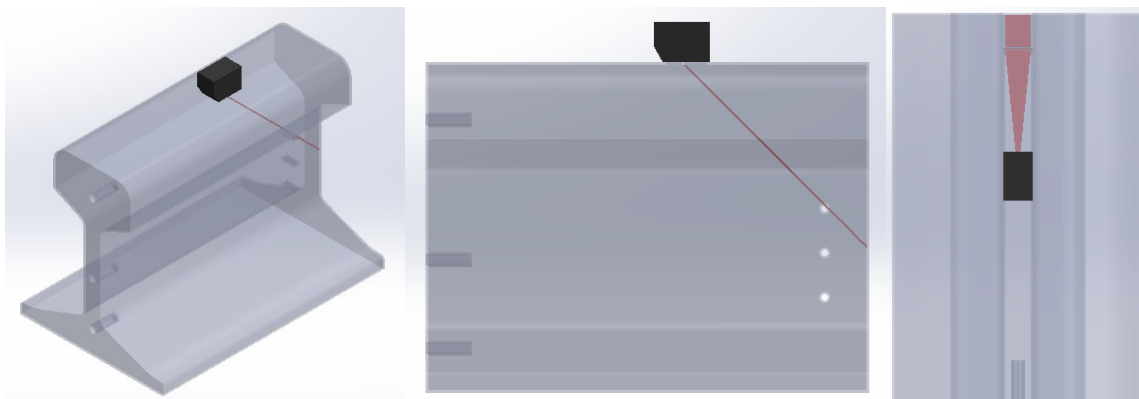


**Slika 33. Detektiranje reflektora SDH<sub>2</sub> sondom MWB 45-2**

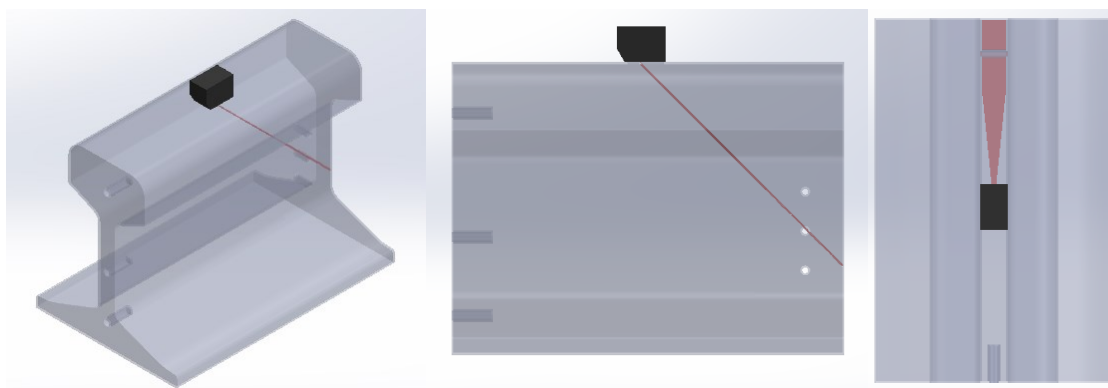


**Slika 34. Detektiranje reflektora SDH<sub>3</sub> sondom MWB 45-2**

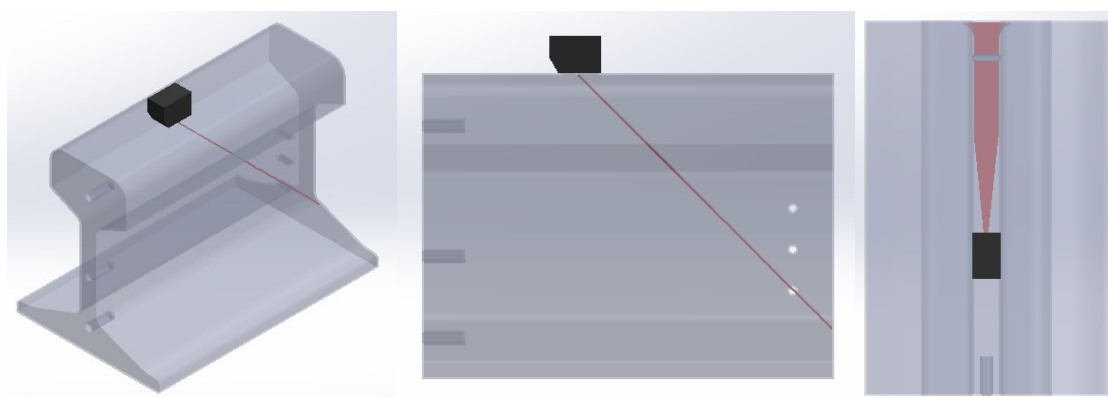
Na narednim slikama prikazane su geometrije ultrazvučnih snopova pri detektiranju SDH sondom MWB 45-2. S lijeva na desno je prikazana izometrija, bokocrt i flocrt. Na *Slici 35* prikazana je geometrija snopa prilikom ispitivanja SDH<sub>1</sub>, na *Slici 36* prilikom ispitivanja SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 37* prilikom ispitivanja SDH<sub>3</sub>.



**Slika 35.** Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>1</sub> sondom MWB 45-2



**Slika 36.** Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>2</sub> sondom MWB 45-2

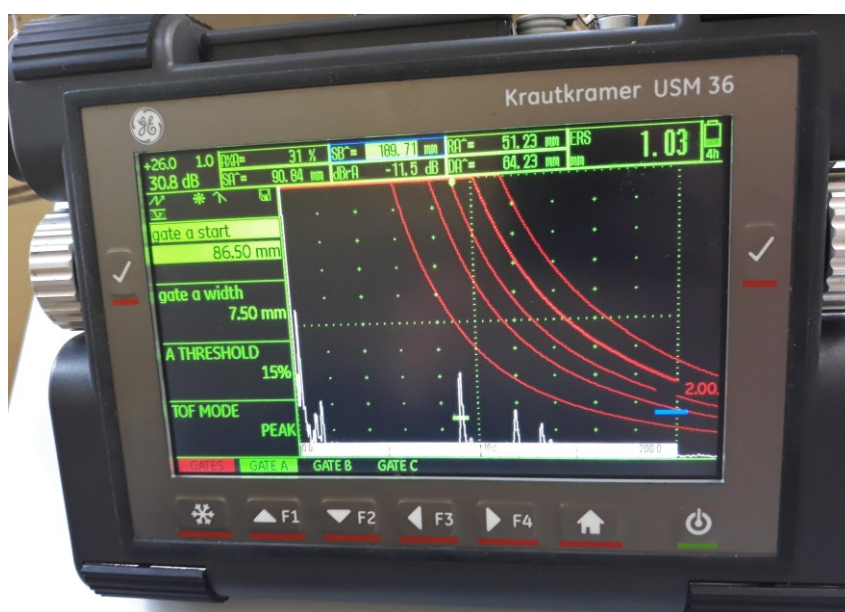


**Slika 37.** Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>3</sub> sondom MWB 45-2



Na prethodnim slikama se može uočiti kako u vratu tračnice prilikom detektiranja SDH<sub>1</sub>, SDH<sub>2</sub> i SDH<sub>3</sub> dolazi do odbijanja ultrazvučnog snopa od bočnih površina vrata tračnice.

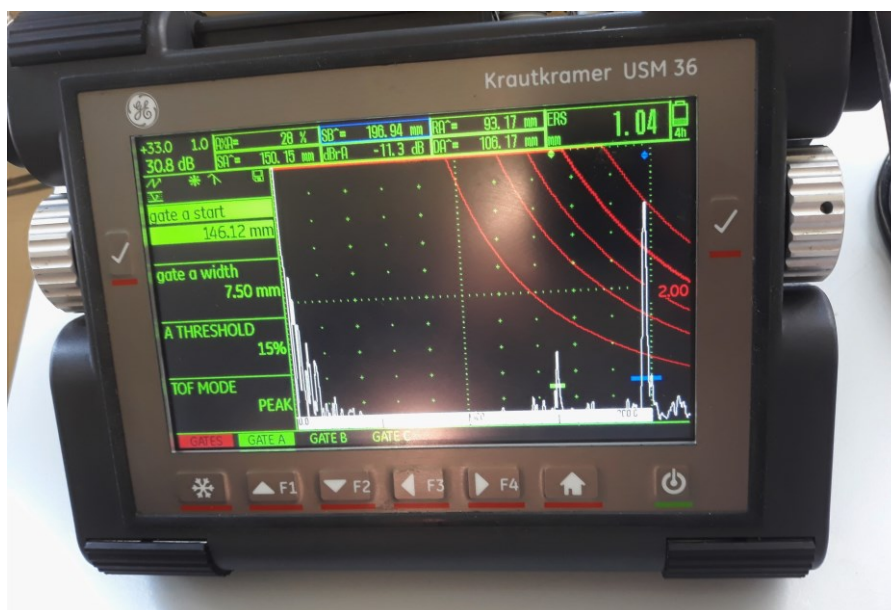
Na narednim slikama prikazani su ekrani uređaja u trenucima kada sonda detektira reflektor na referentnom bloku. Signal za koji se daju rezultati presječen je kontrolnim vratima. Na *Slici 38* prikazan je ekran prilikom detektiranja SDH<sub>1</sub>, na *Slici 39* prilikom detektiranja SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 40* prilikom detektiranja SDH<sub>3</sub>.



Slika 38. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>1</sub> sondom MWB 45-2



Slika 39. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>2</sub> sondom MWB 45-2



Slika 40. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>3</sub> sondom MWB 45-2

Iako je pri ispitivanju širina vrata tračnice imala utjecaj na širinu ultrazvučnog snopa nema šumova kao pri korištenju prethodne sonde, a i pojačanje je manje nego u tom primjeru.

Rezultati ispitivanja koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja su prikazani u *Tablici 7*. Podaci za izračun  $D_{FBH}$  dani su u *Tablici 5*.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja SDH sondom MWB 45-2

	<i>SA</i>	<i>RA</i>	<i>DA</i>	<i>ERS</i>	$D_{FBH}$
<b>SDH<sub>1</sub></b>	90,84 mm	51,23 mm	64,23 mm	1,03 mm	3,5 mm
<b>SDH<sub>2</sub></b>	119,46 mm	71,47 mm	84,47 mm	0,86 mm	3,7 mm
<b>SDH<sub>3</sub></b>	150,15 mm	93,17 mm	106,17 mm	1,04 mm	3,9 mm

#### 4.2.2. Ispitivanje sondom SWB 45-2

Drugo ispitivanje provodi se sondom SWB 45-2 radi se o kutnoj sondi s izlaznim kutom  $45^\circ$  i frekvencije 2 MHz.

##### 4.2.2.1. Prikaz odjeka reflektora FBH sondom SWB 45-2

Na narednim slikama prikazani su položaji u kojima sonda SWB 45-2 detektira postojanje referentnih reflektora FBH na referentnom bloku. Na *Slici 41* prikazana je sonda u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>1</sub>, na *Slici 42* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 43* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>3</sub>.

Da bi usporedba položaja ultrazvučnih sondi na bloku bila lakša navede slike su prikazane zajedno na stranici.



**Slika 41. Detektiranje reflektora FBH<sub>1</sub> sondom SWB 45-2**

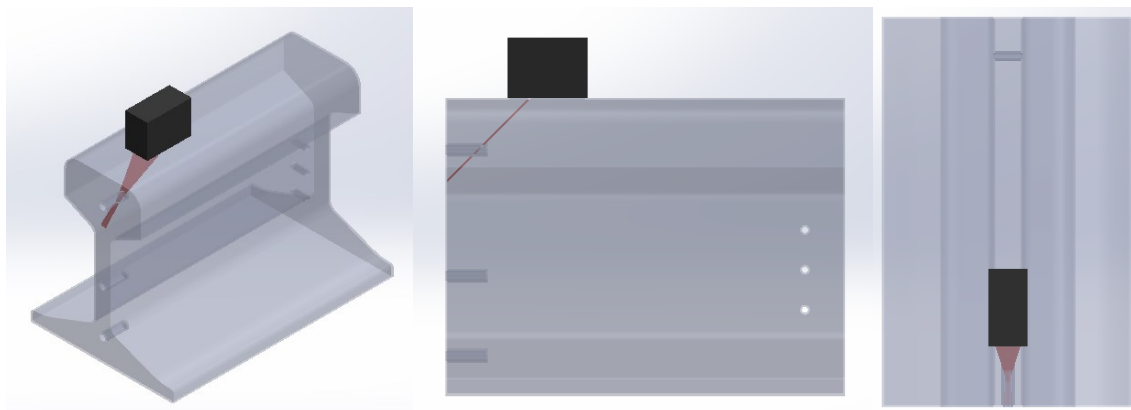


**Slika 42. Detektiranje reflektora FBH<sub>2</sub> sondom SWB 45-2**

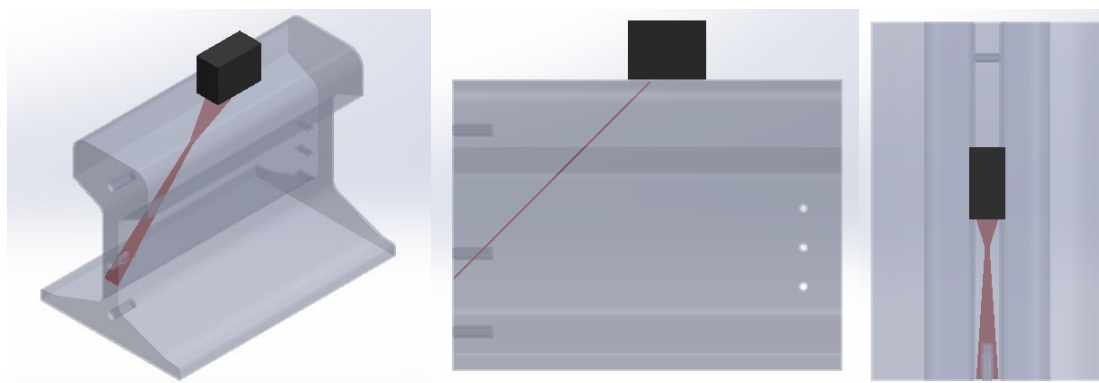


**Slika 43. Detektiranje reflektora FBH<sub>3</sub> sondom SWB 45-2**

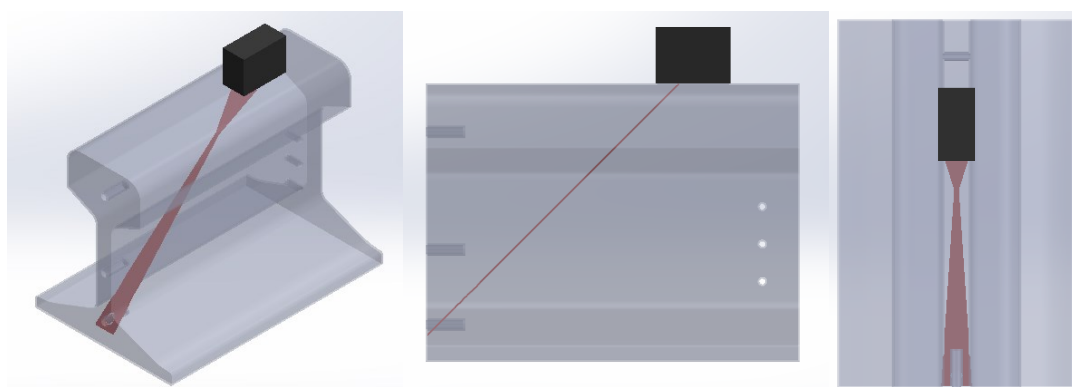
Na narednim slikama prikazane su geometrije ultrazvučnih snopova pri detektiranju FBH sondom SWB 45-2. S lijeva na desno je prikazana izometrija, bokocrt i tlocrt. Na *Slici 44* prikazana je geometrija snopa prilikom ispitivanja FBH<sub>1</sub>, na *Slici 45* prilikom ispitivanja FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 46* prilikom ispitivanja FBH<sub>3</sub>.



**Slika 44. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>1</sub> sondom SWB 45-2**



**Slika 45. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub> sondom SWB 45-2**



**Slika 46. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub> sondom SWB 45-2**



Na prethodnim slikama se može uočiti kako u vratu tračnice prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub> dolazi do odbijanja ultrazvučnog snopa od bočnih površina vrata tračnice.

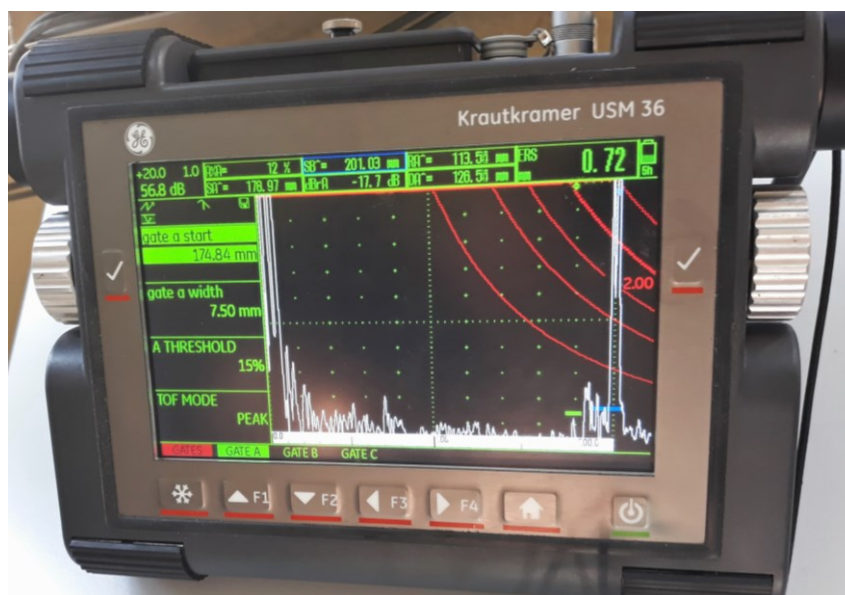
Na narednim slikama prikazani su ekrani uređaja u trenucima kada sonda detektira reflektor na referentnom bloku. Signal za koji se daju rezultati presječen je kontrolnim vratima. Na *Slici 47* prikazan je ekran prilikom detektiranja FBH<sub>1</sub>, na *Slici 48* prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 49* prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub>.



Slika 47. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>1</sub> sondom SWB 45-2



Slika 48. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>2</sub> sondom SWB 45-2



Slika 49. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>3</sub> sondom SWB 45-2

Iz prikaza ekrana na prethodnim slikama može se uočiti kako se prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub> javlja mnogo šumova. U tom slučaju je pojačanje veće nego kod detektiranja ostalih FBH, a tada i bočne površine vrata tračnice imaju utjecaj na širinu ultrazvučnog snopa.

Rezultati ispitivanja koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja su prikazani u Tablici 8. Podaci za izračun  $D_{FBH}$  dani su u Tablici 5.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja FBH sondom SWB 45-2

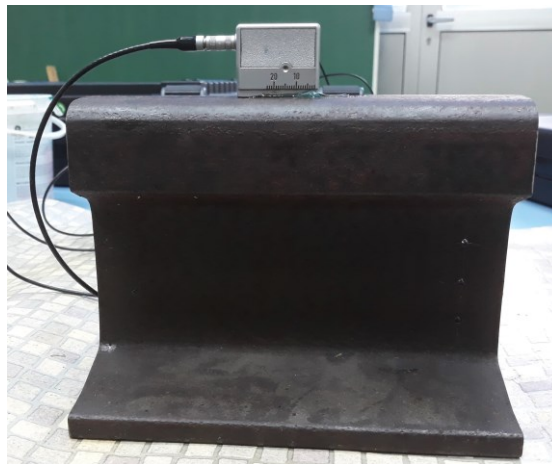
	<i>SA</i>	<i>RA</i>	<i>DA</i>	<i>ERS</i>
<b>FBH<sub>1</sub></b>	34,05 mm	11,07 mm	24,07 mm	0,63 mm
<b>FBH<sub>2</sub></b>	118,32 mm	70,67 mm	83,67 mm	0,82 mm
<b>FBH<sub>3</sub></b>	178,97 mm	113,54 mm	126,54 mm	0,72 mm

#### 4.2.2.2. Prikaz odjeka reflektora SDH sondom SWB 45-2

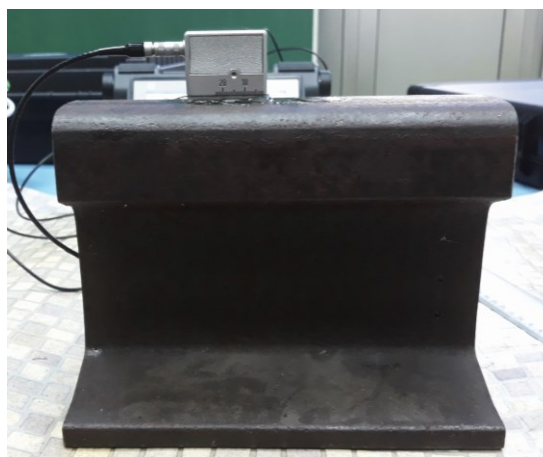
Na narednim slikama prikazani su položaji u kojima sonda SWB 45-2 detektira postojanje referentnih reflektora SDH na referentnom bloku. Na Slici 50 prikazana je sonda u položaju u kojem detektira postojanje reflektora SDH<sub>1</sub>, na Slici 51 postojanje reflektora SDH<sub>2</sub>, a na Slici 52 reflektora SDH<sub>3</sub>.



**Slika 50. Detektiranje reflektora SDH<sub>1</sub> sondom SWB 45-2**



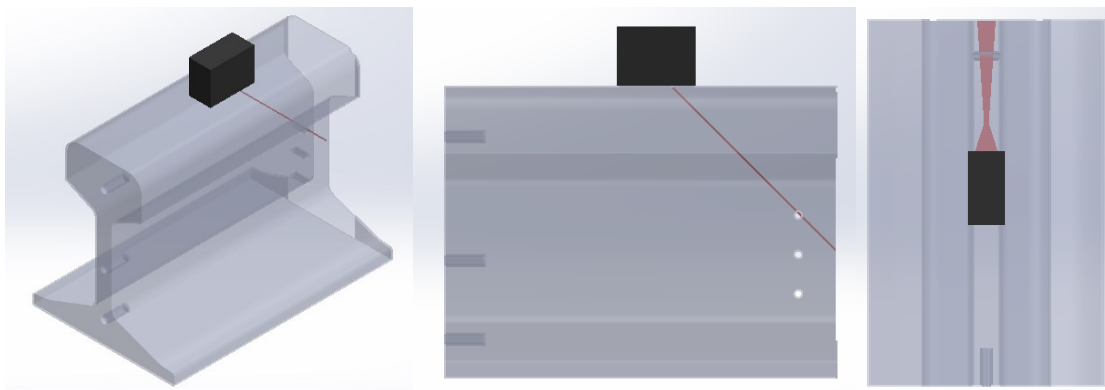
**Slika 51. Detektiranje reflektora SDH<sub>2</sub> sondom SWB 45-2**



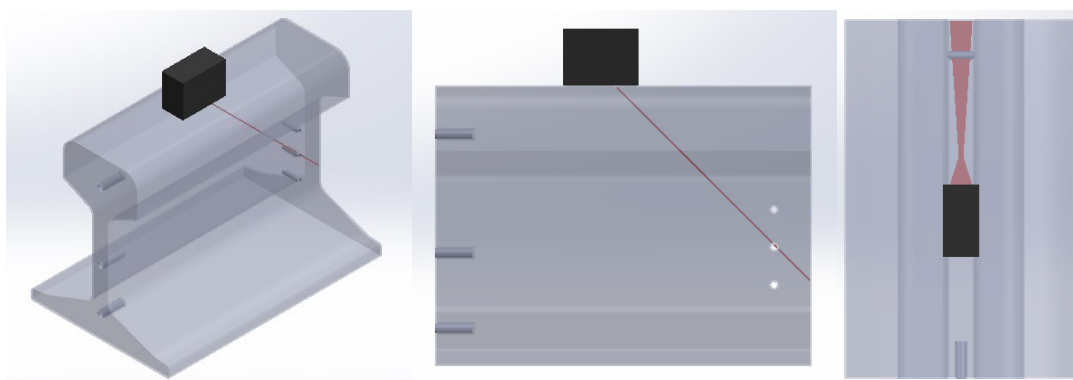
**Slika 52. Detektiranje reflektora SDH<sub>3</sub> sondom SWB 45-2**



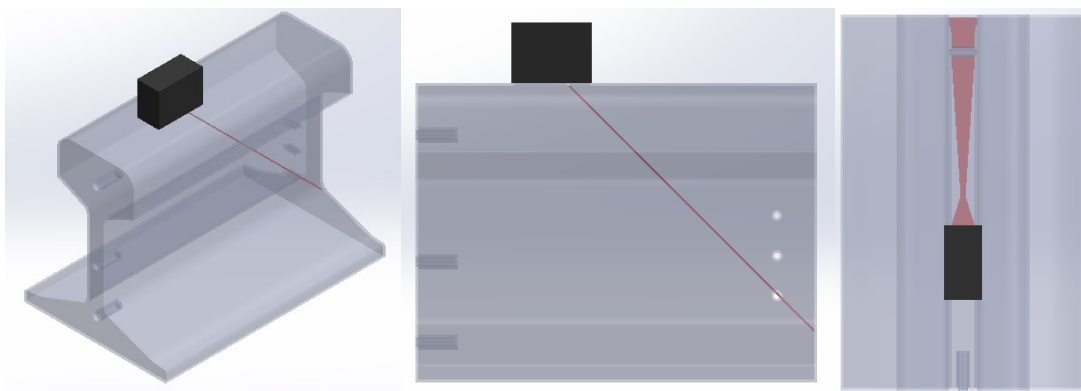
Na narednim slikama prikazane su geometrije ultrazvučnih snopova pri detektiranju SDH sondom SWB 45-2. S lijeva na desno je prikazana izometrija, bokocrt i tlocrt. Na *Slici 53* prikazana je geometrija snopa prilikom ispitivanja SDH<sub>1</sub>, na *Slici 54* prilikom ispitivanja SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 55* prilikom ispitivanja SDH<sub>3</sub>.



**Slika 53. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>1</sub> sondom SWB 45-2**



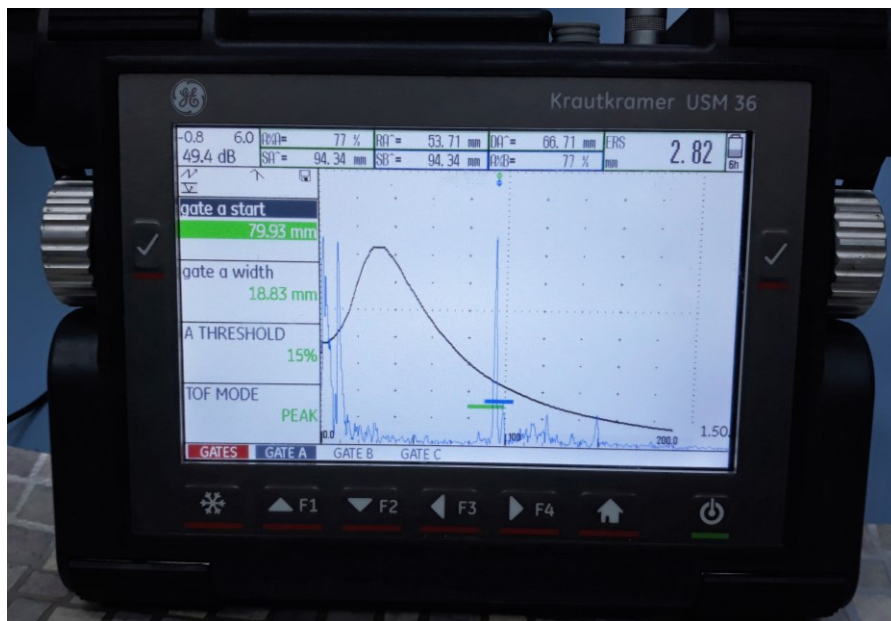
**Slika 54. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>2</sub> sondom SWB 45-2**



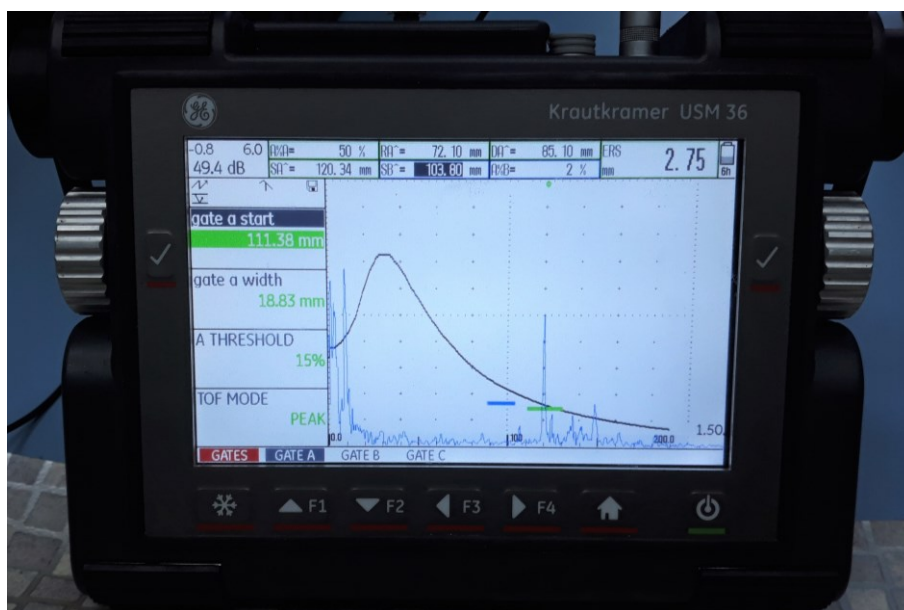
**Slika 55. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>3</sub> sondom SWB 45-2**

Na prethodnim slikama se može uočiti kako u vratu tračnice prilikom detektiranja SDH<sub>3</sub> dolazi do odbijanja ultrazvučnog snopa od ruba.

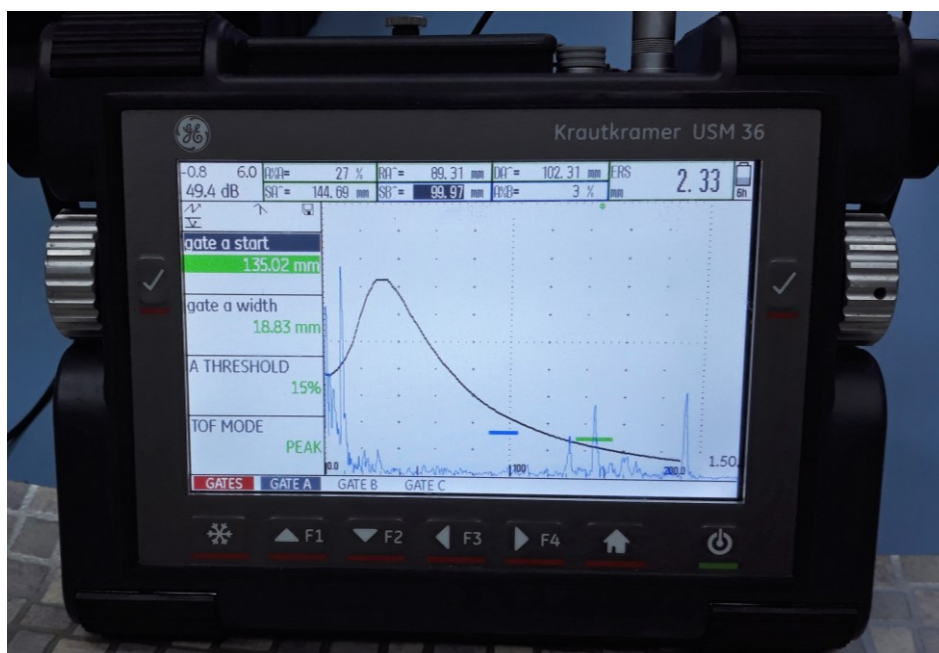
Na narednim slikama prikazani su ekrani uređaja u trenucima kada sonda detektira reflektor na referentnom bloku. Signal za koji se daju rezultati presječen je kontrolnim vratima. Na *Slici 56* prikazan je ekran prilikom detektiranja SDH<sub>1</sub>, na *Slici 57* prilikom detektiranja SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 58* prilikom detektiranja SDH<sub>3</sub>.



Slika 56. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>1</sub> sondom SWB 45-2



Slika 57. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>2</sub> sondom SWB 45-2



Slika 58. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>3</sub> sondom SWB 45-2

Rezultati ispitivanja koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja su prikazani u Tablici 9. Podaci za izračun  $D_{FBH}$  dani su u Tablici 5.

Tablica 9. Rezultati ispitivanja SDH sondom SWB 45-2

	$SA$	$RA$	$DA$	$ERS$	$D_{FBH}$
<b>SDH<sub>1</sub></b>	94,34 mm	53,71 mm	66,71 mm	2,82 mm	3,5 mm
<b>SDH<sub>2</sub></b>	120,34 mm	72,10 mm	85,10 mm	2,75 mm	3,7 mm
<b>SDH<sub>3</sub></b>	144,69 mm	89,31 mm	102,31 mm	2,33 mm	3,9 mm

### **4.2.3. Ispitivanje sondom WB 45-N2**

Treće ispitivanje provodi se sondom WB 45-2 radi se o kutnoj sondi s izlaznim kutom  $45^\circ$  i frekvencije 2 MHz.

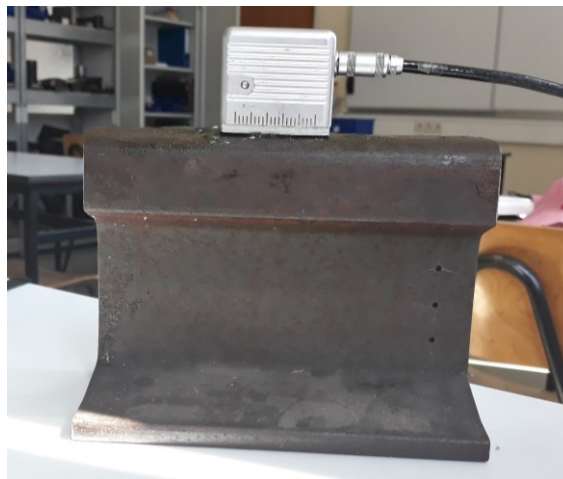
#### *4.2.3.1. Prikaz odjeka reflektora FBH sondom WB 45-2*

Na narednim slikama prikazani su položaji u kojima sonda WB 45-2 detektira postojanje referentnih reflektora FBH na referentnom bloku. Na *Slici 59* prikazana je sonda u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>1</sub>, na *Slici 60* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 61* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora FBH<sub>3</sub>.

Da bi usporedba položaja ultrazvučnih sondi na bloku bila lakša navede slike su prikazane zajedno na stranici.



**Slika 59. Detektiranje reflektora FBH<sub>1</sub> sondom WB 45-2**

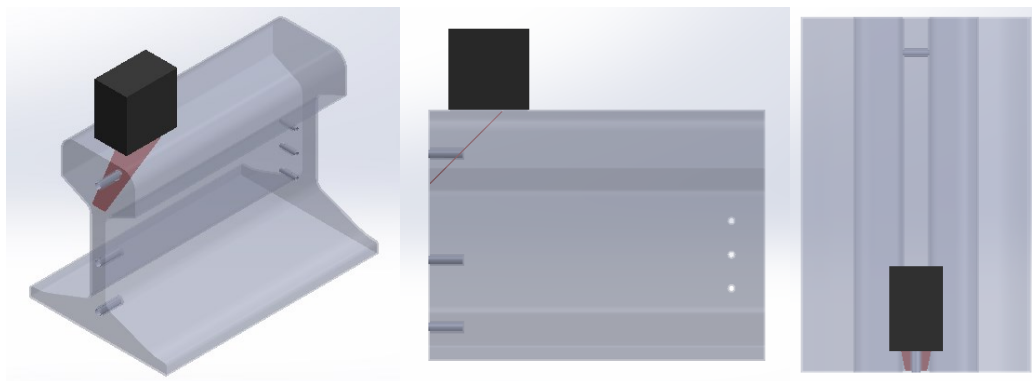


**Slika 60. Detektiranje reflektora FBH<sub>2</sub> sondom WB 45-2**

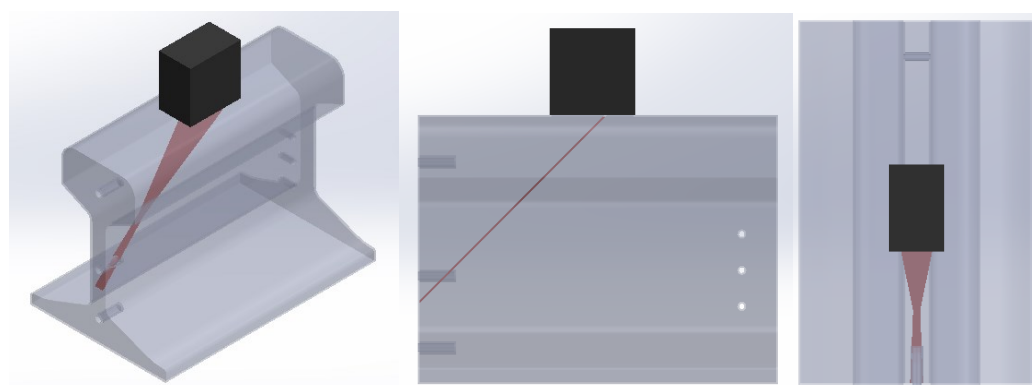


**Slika 61. Detektiranje reflektora FBH<sub>3</sub> sondom WB 45-2**

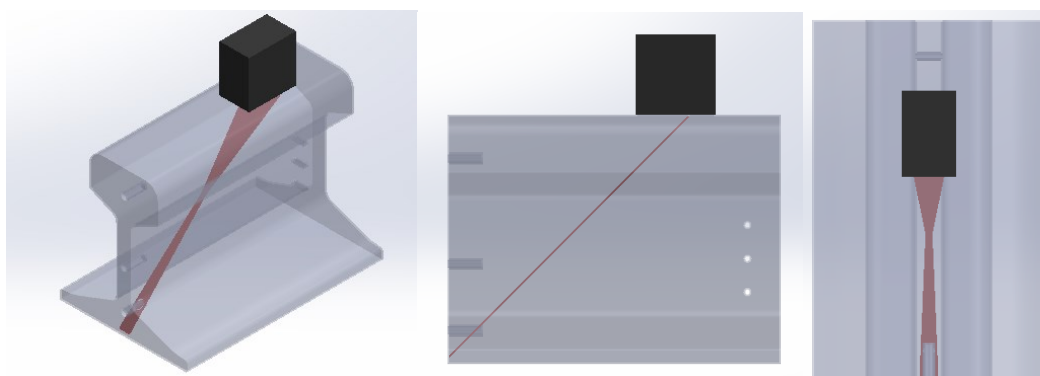
Na narednim slikama prikazane su geometrije ultrazvučnih snopova pri detektiranju FBH sondom WB 45-2. S lijeva na desno je prikazana izometrija, bokocrt i tlocrt. Na *Slici 62* prikazana je geometrija snopa prilikom ispitivanja FBH<sub>1</sub>, na *Slici 63* prilikom ispitivanja FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 64* prilikom ispitivanja FBH<sub>3</sub>.



**Slika 62.** Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>1</sub> sondom WB 45-2



**Slika 63.** Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub> sondom WB 45-2



**Slika 64.** Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub> sondom WB 45-2



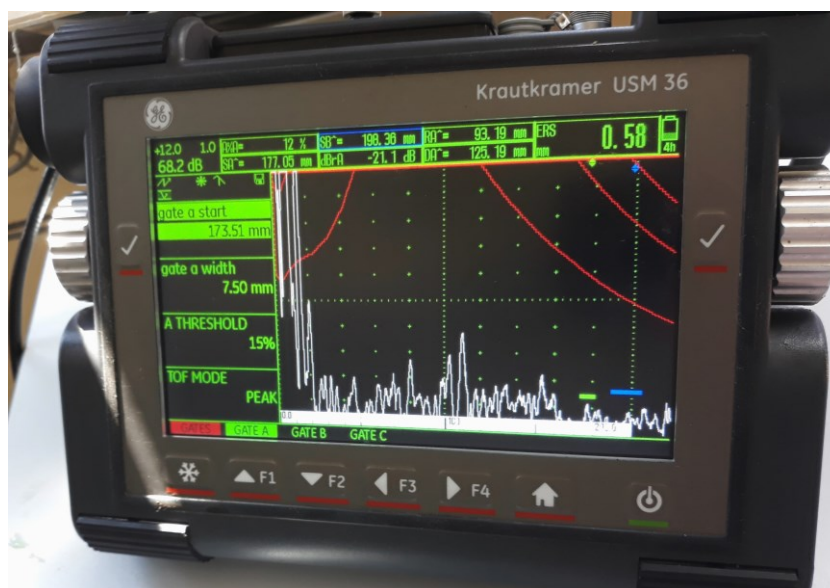
Na narednim slikama prikazani su ekrani uređaja u trenucima kada sonda detektira reflektor na referentnom bloku. Signal za koji se daju rezultati presječen je kontrolnim vratima. Na *Slici 65* prikazan je ekran prilikom detektiranja FBH<sub>1</sub>, na *Slici 66* prilikom detektiranja FBH<sub>2</sub>, a na *Slici 67* prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub>.



Slika 65. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>1</sub> sondom WB 45-2



Slika 66. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>2</sub> sondom WB 45-2



Slika 67. Ekran uređaja pri detektiranju FBH<sub>3</sub> sondom WB 45-2

Iz prikaza ekrana na prethodnim slikama može se uočiti kako se prilikom detektiranja FBH<sub>3</sub> javlja mnogo šumova. U tom slučaju je pojačanje veće nego kod detektiranja ostalih FBH.

Rezultati ispitivanja koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja su prikazani u Tablici 10.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja FBH sondom WB 45-2

	<i>SA</i>	<i>RA</i>	<i>DA</i>	<i>ERS</i>
<b>FBH<sub>1</sub></b>	34,45 mm	-7,64 mm	24,36 mm	0,8 mm
<b>FBH<sub>2</sub></b>	119,86 mm	52,75 mm	85,75 mm	0,6 mm
<b>FBH<sub>3</sub></b>	177,05 mm	96,19 mm	125,19 mm	0,58 mm

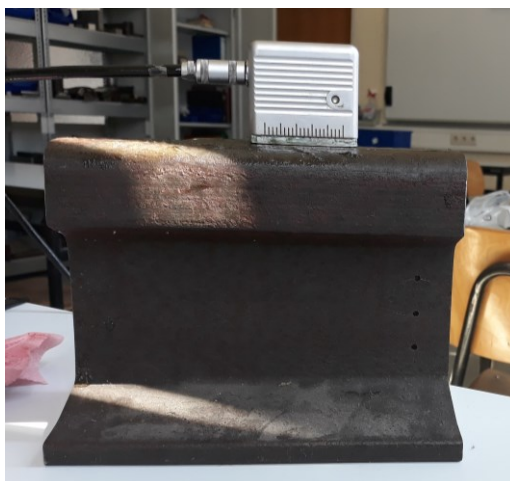


---

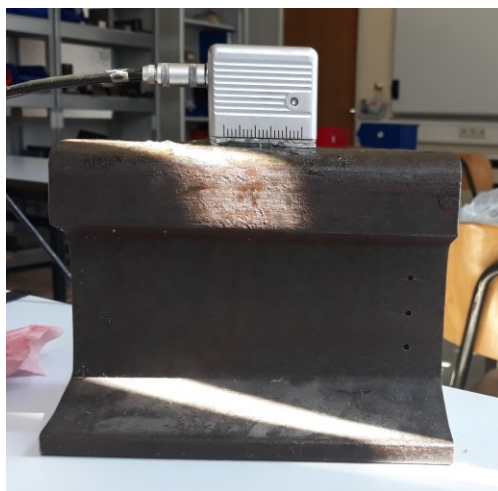
*4.2.3.2. Prikaz odjeka reflektora SDH sondom WB 45-2*

Na narednim slikama prikazani su položaji u kojima sonda WB 45-2 detektira postojanje referentnih reflektora SDH na referentnom bloku. Na *Slici 68* prikazana je sonda u položaju u kojem detektira postojanje reflektora SDH<sub>1</sub>, na *Slici 69* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 70* u položaju u kojem detektira postojanje reflektora SDH<sub>3</sub>.

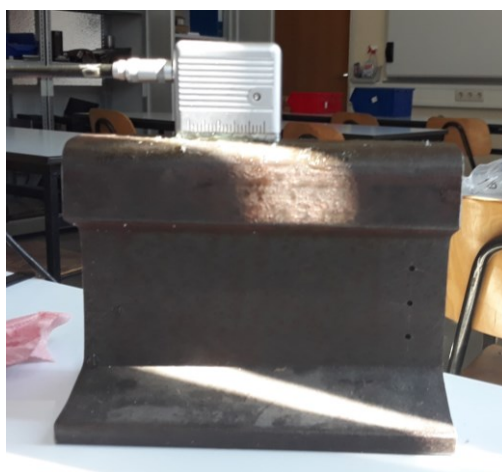
Da bi usporedba položaja ultrazvučnih sondi na bloku bila lakša navede slike su prikazane zajedno na stranici.



**Slika 68. Detektiranje reflektora SDH<sub>1</sub> sondom WB 45-2**

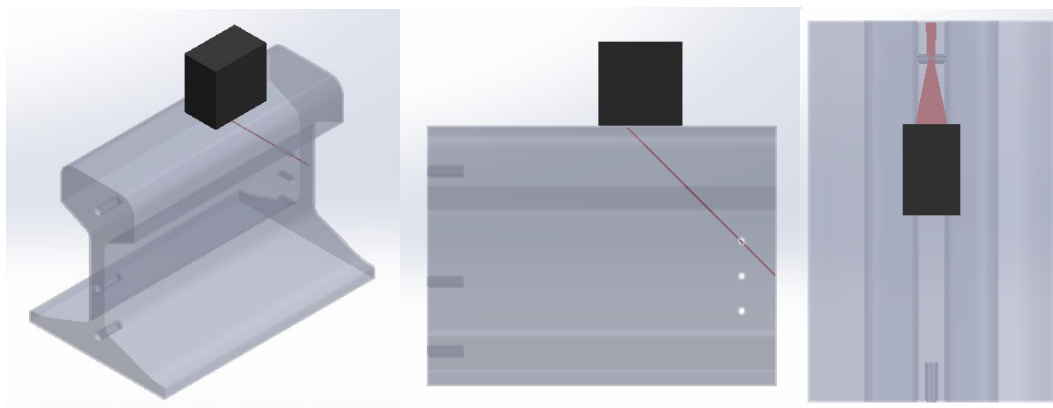


**Slika 69. Detektiranje reflektora SDH<sub>2</sub> sondom WB 45-2**

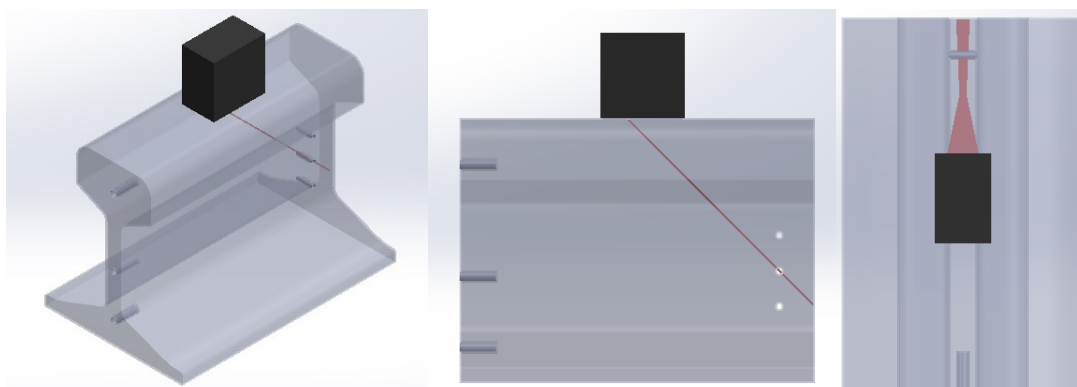


**Slika 70. Detektiranje reflektora SDH<sub>3</sub> sondom WB 45-2**

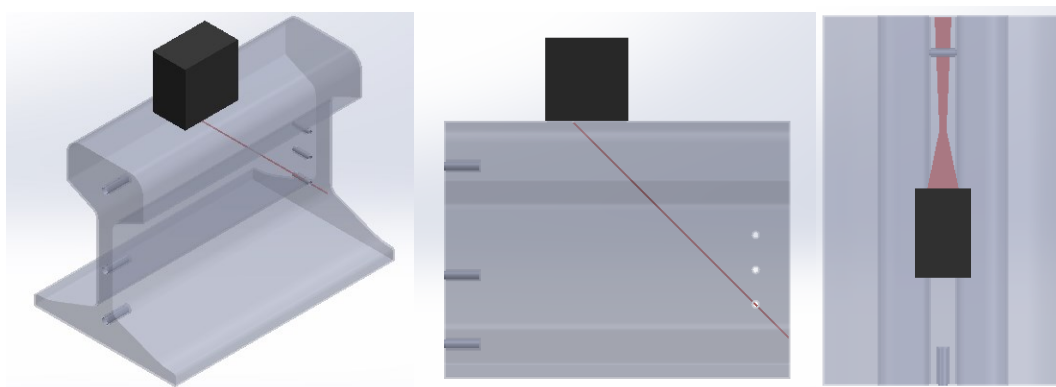
Na narednim slikama prikazane su geometrije ultrazvučnih snopova pri detektiranju SDH sondom WB 45-2. S lijeva na desno je prikazana izometrija, bokocrt i tlocrt. Na *Slici 71* prikazana je geometrija snopa prilikom ispitivanja SDH<sub>1</sub>, na *Slici 72* prilikom ispitivanja SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 73* prilikom ispitivanja SDH<sub>3</sub>.



**Slika 71. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>1</sub> sondom WB 45-2**



**Slika 72. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>2</sub> sondom WB 45-2**



**Slika 73. Geometrija ultrazvučnog snopa prilikom detektiranja SDH<sub>3</sub> sondom WB 45-2**

Na narednim slikama prikazani su ekrani uređaja u trenucima kada sonda detektira reflektor na referentnom bloku. Signal za koji se daju rezultati presječen je kontrolnim vratima. Na *Slici 74* prikazan je ekran prilikom detektiranja SDH<sub>1</sub>, na *Slici 75* prilikom detektiranja SDH<sub>2</sub>, a na *Slici 76* prilikom detektiranja SDH<sub>3</sub>.



Slika 74. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>1</sub> sondom WB 45-2



Slika 75. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>2</sub> sondom WB 45-2



Slika 76. Ekran uređaja pri detektiranju SDH<sub>3</sub> sondom WB 45-2

Rezultati ispitivanja SDH koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja mogu se vidjeti u *Tablici 11*. Podaci za izračun  $D_{FBH}$  dani su u *Tablici 5*.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja SDH sondom WB 45-2

	<i>SA</i>	<i>RA</i>	<i>DA</i>	<i>ERS</i>	$D_{FBH}$
<b>SDH<sub>1</sub></b>	93,34 mm	34 mm	66 mm	2,70 mm	3,5 mm
<b>SDH<sub>2</sub></b>	120,69 mm	53,34 mm	85,34 mm	2,65 mm	3,7 mm
<b>SDH<sub>3</sub></b>	149,17 mm	73,48 mm	105,48 mm	2,65 mm	3,9 mm

### 4.3. Usporedba signala odjeka s referentnih reflektora

U sljedećim tablicama dani su skupni podaci o signalima odjeka s referentnih reflektora. U *Tablici 12* dani su rezultati mjerenja udaljenosti detektiranog reflektora od izlazne točke *P*. Ta vrijednost je dobivena zbrajanjem iznosa skraćene projekcije *RA* te udaljenosti izlazne točke. U *Tablici 13* dani su rezultati mjerenja dubine *DA*, u *Tablici 14* zvučnog puta *SA*, a u *Tablici 15* rezultati mjerenja ekvivalentne veličine *ERS*.

**Tablica 12. Rezultati mjerenja udaljenosti detektiranog reflektora od izlazne točke *P***

	<b>MWB 45-2</b>	<b>SWB 45-2</b>	<b>WB 45-2</b>
<b>FBH<sub>1</sub></b>	24,24 mm	23,07 mm	25,64 mm
<b>FBH<sub>2</sub></b>	83,48 mm	82,67 mm	84,75 mm
<b>FBH<sub>3</sub></b>	123,77 mm	124,54 mm	125,19 mm
<b>SDH<sub>1</sub></b>	64,23 mm	65,71 mm	66 mm
<b>SDH<sub>2</sub></b>	84,47 mm	84,10 mm	85,34 mm
<b>SDH<sub>3</sub></b>	106,17 mm	101,31 mm	105,48 mm

**Tablica 13. Rezultati mjerenja dubine *DA***

	<b>MWB 45-2</b>	<b>SWB 45-2</b>	<b>WB 45-2</b>
<b>FBH<sub>1</sub></b>	24,24 mm	24,07 mm	24,36 mm
<b>FBH<sub>2</sub></b>	83,48 mm	83,67 mm	84,75 mm
<b>FBH<sub>3</sub></b>	123,77 mm	126,54 mm	125,19 mm
<b>SDH<sub>1</sub></b>	64,23 mm	66,71 mm	66 mm
<b>SDH<sub>2</sub></b>	84,47 mm	85,10 mm	85,34 mm
<b>SDH<sub>3</sub></b>	106,17 mm	102,31 mm	105,48 mm

Tablica 14. Rezultati mjerenja zvučnog puta SA

	MWB 45-2	SWB 45-2	WB 45-2
<b>FBH<sub>1</sub></b>	34,29 mm	34,05 mm	34,45 mm
<b>FBH<sub>2</sub></b>	118 mm	118,32 mm	119,86 mm
<b>FBH<sub>3</sub></b>	175,03 mm	178,97 mm	177,05 mm
<b>SDH<sub>1</sub></b>	90,84 mm	94,34 mm	93,34 mm
<b>SDH<sub>2</sub></b>	119,46 mm	120,34 mm	120,69 mm
<b>SDH<sub>3</sub></b>	150,15 mm	144,69 mm	149,17 mm

Tablica 15. Rezultati mjerenja ekvivalentne veličine ERS

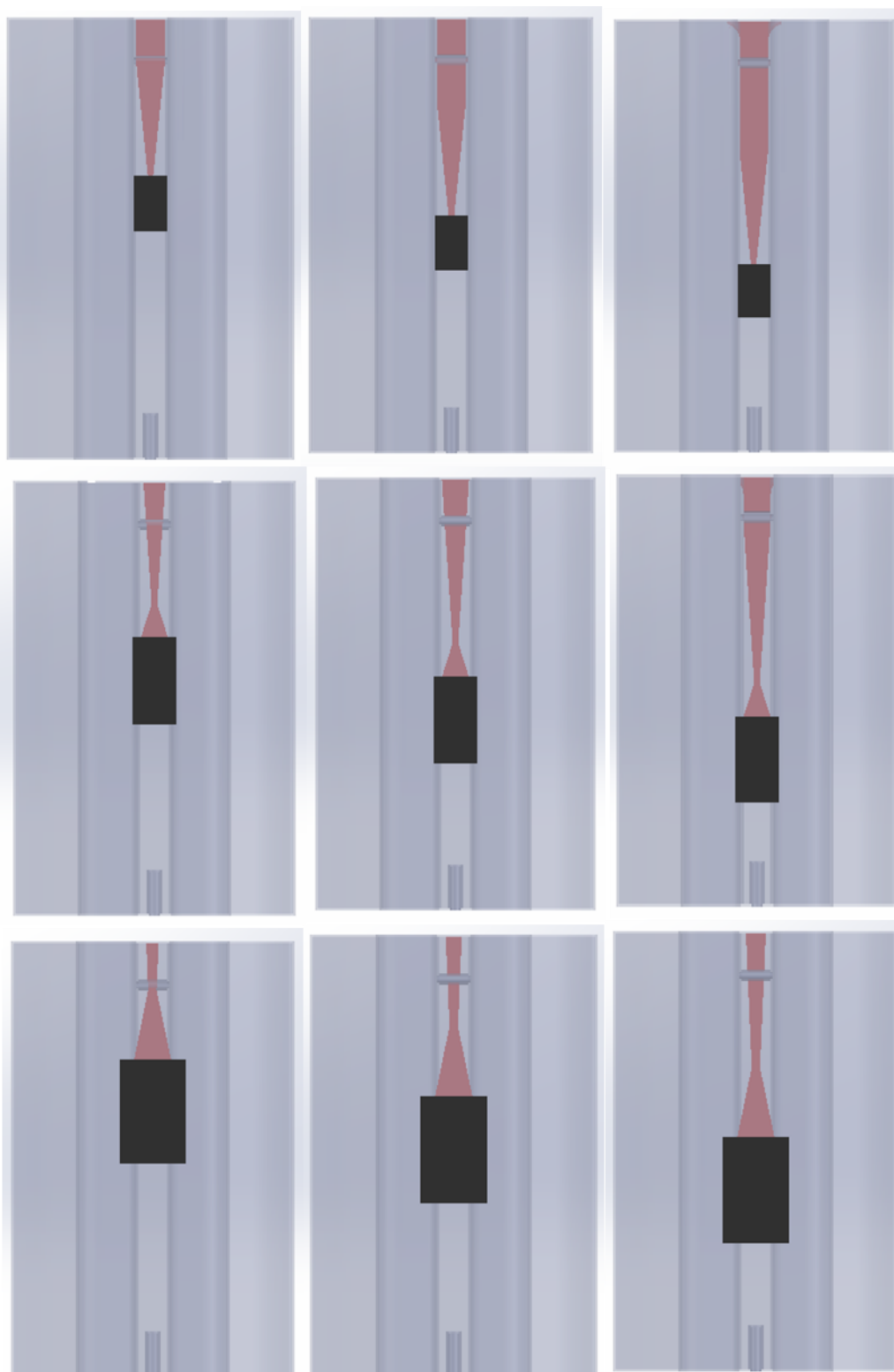
	MWB 45-2	SWB 45-2	WB 45-2
<b>FBH<sub>1</sub></b>	0,27 mm	0,63 mm	0,80 mm
<b>FBH<sub>2</sub></b>	0,39 mm	0,82 mm	0,60 mm
<b>FBH<sub>3</sub></b>	0,34 mm	0,72 mm	0,58 mm
<b>SDH<sub>1</sub></b>	1,03 mm	2,82 mm	2,70 mm
<b>SDH<sub>2</sub></b>	0,86 mm	2,75 mm	2,65 mm
<b>SDH<sub>3</sub></b>	1,04 mm	2,33 mm	2,65 mm

Temeljem vrijednosti procjena ekvivalentne veličine ERS iz Tablice 14 može se zaključiti kako za niti jednu od korištenih kutnih sonda FBH ne može predstavljati referentni reflektor. Naime, poznat je podatak da je promjer svih FBH 5 mm, a rezultati mjerenja značajno odstupaju od te vrijednosti.

Korištenjem sonde MWB 45-2 za detektiranje reflektora SDH dobivene su vrijednosti koje odstupaju od vrijednosti dobivenih korištenjem sonde SWB 45-2 i WB 45-2 čiji su rezultati ujednačeni. Može se zaključiti kako ta sonda nije pogodna za ispitivanje. Ostale sonde daje približne vrijednosti promjera koji iznosi 3 mm.

Na Slici 77 nalazi se usporedba tlocrtnih prikaza ultrazvučnih snopova pri procjenjivanju SDH reflektora. U redovima, s lijeva na desno prikazana je procjena redom SDH<sub>1</sub>, SDH<sub>2</sub> i SDH<sub>3</sub>, a u stupcima, odozgora prema dolje, korištenje sonde MWB 45-2,

SWB 45-2 i WB 45-2. Uočava se razlika u geometriji ultrazvučnog snopa zbog utjecaj bočnih površina vrata tračnice kod korištenja sonde MWB 45-2 u odnosu na preostale sonde.



**Slika 77. Prikaz tlocrta ultrazvučnih snopova s lijeva na desno SDH1, SDH2, SDH3, korištenjem sonde odozgor prema dolje MWB 45-2, SWB 45-2, WB 45-2**



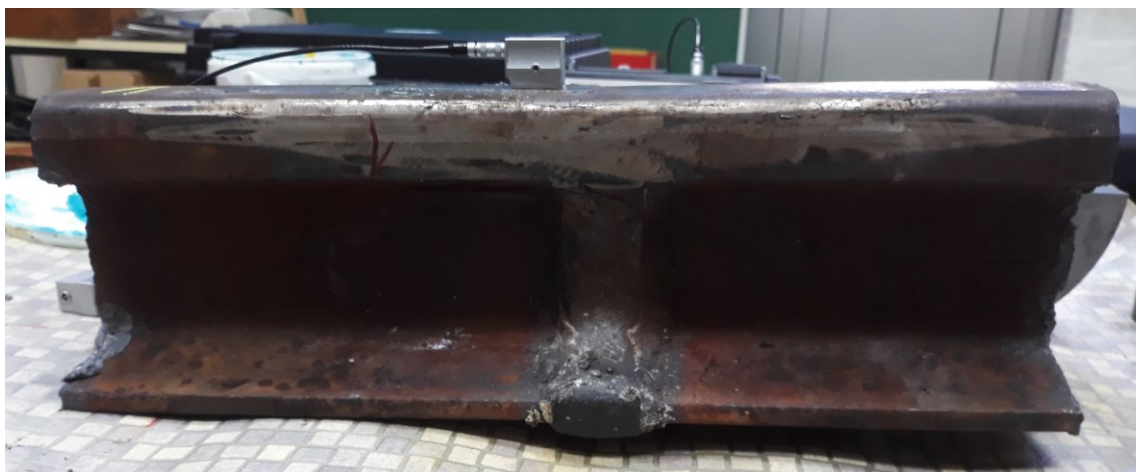
Usporedbom rezultata iz *Tablice 7*, *Tablice 9* i *Tablice 11* u kojima su navedene vrijednosti  $D_{FBH}$  s mjerom promjera koja iznosi 3 mm također se uočava kako se vrijednosti razlikuju.

#### 4.4. Ultrazvučno ispitivanje uzorka zavara

Pomoću sonde MWB 45-2, SWB 45-2 i WB 45-2 provedeno je ispitivanje uzorka aluminotermijskog zavara tračnice. Ispitivanjem su pronađene dvije greške. Jedna greška se nalazi u zavaru u glavi tračnice, a druga u zavaru u vratu tračnice.

##### 4.4.1. Ispitivanje greške u glavi tračnice

Na narednim slikama prikazane su sonde u položajima u kojima detektiraju grešku u zavaru u glavi tračnice. Na *Slici 78* prikazana je sonda MWB 45-2, na *Slici 79* sonda SWB 45-2, a na *Slici 80* sonda WB 45-2 u položaju u kojem detektira pogrešku u glavi tračnice.



**Slika 78.** Položaj u kojem sonda MWB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice



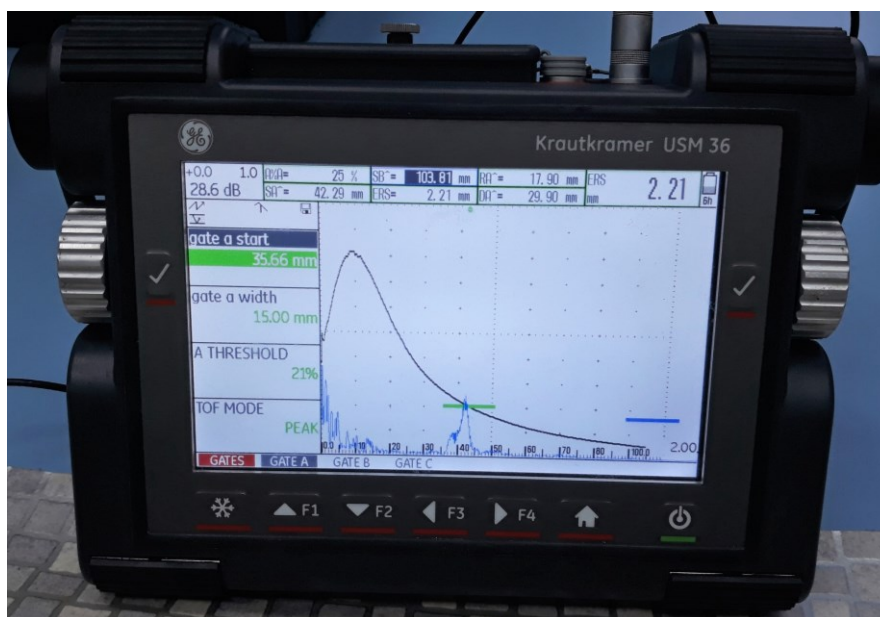
**Slika 79. Položaj u kojem sonda SWB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice**



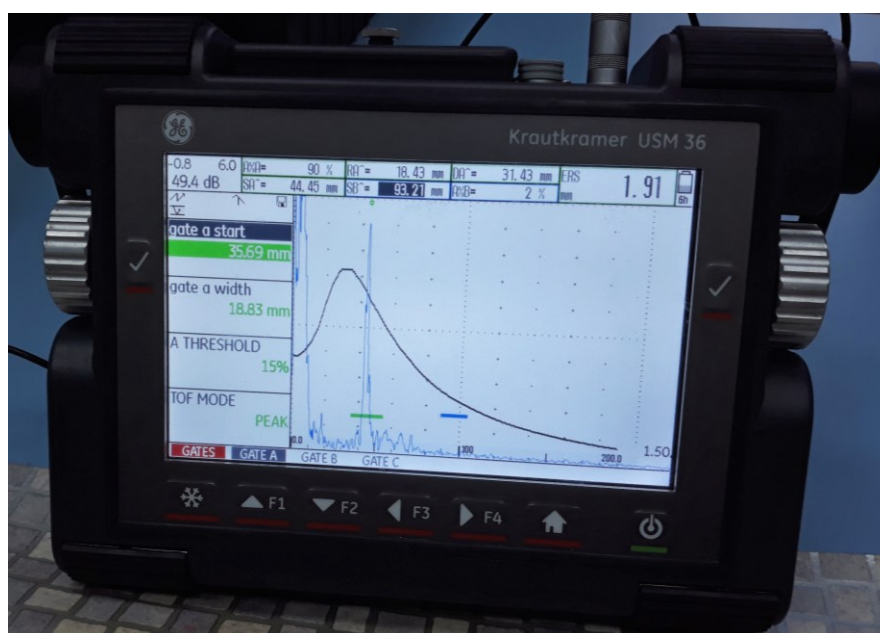
**Slika 80. Položaj u kojem sonda WB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice**

Na narednim slikama prikazani su ekrani ultrazvučnih uređaja u trenutcima kada sonde detektiraju grešku u zavaru u glavi tračnice. Na *Slici 81* prikazan je ekran ultrazvučnog uređaja u trenutku u kojem sonda MWB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice, na *Slici 82* ekran u trenutku u kojem sonda SWB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice, a na *Slici 83*

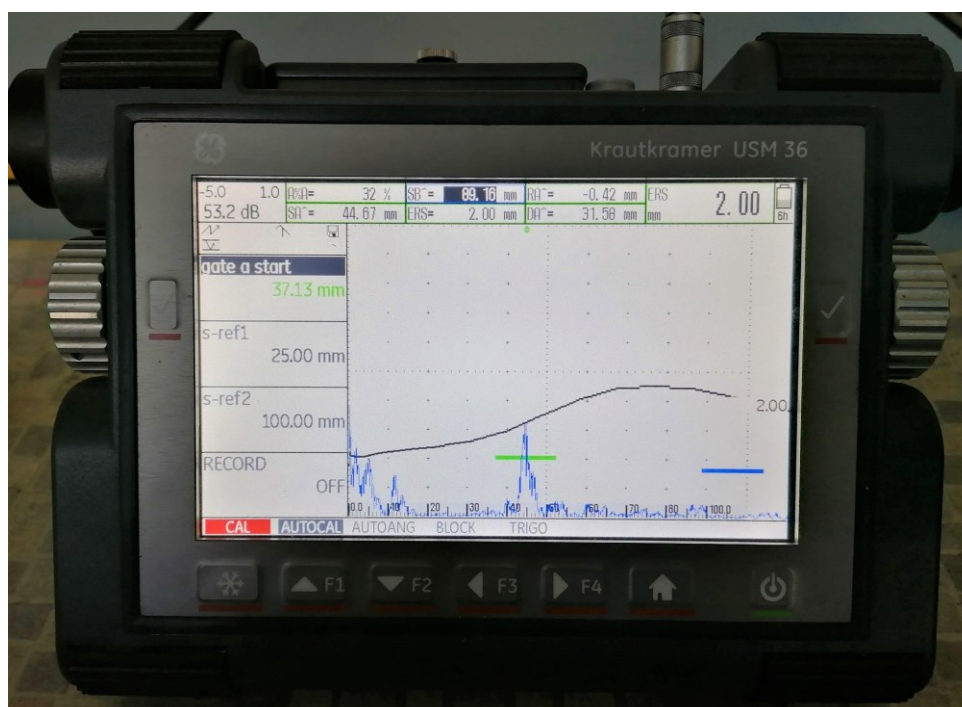
ekran u trenutku u kojem sonda WB 45-2 detektira pogrešku u glavi tračnice. Kontrolnim vratima označen je signal za koji se daju podaci.



Slika 81. Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u glavi tračnice sondom MWB 45-2



Slika 82. Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u glavi tračnice sondom SWB 45-2



Slika 83. Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u glavi tračnice sondom WB 45-2

U Tablici 16 prikazani su rezultati ispitivanja greške u zavaru u glavi tračnice koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja greške u glavi tračnice

	MWB 45-2	SWB 45-2	WB 45-2
<b>RA</b>	17,90 mm	18,43 mm	-0,42 mm
<b>P</b>	30,90 mm	30,43 mm	31,68 mm
<b>DA</b>	29,90 mm	31,43 mm	31,58 mm
<b>SA</b>	42,29 mm	44,45 mm	44,67 mm
<b>ERS</b>	2,21 mm	1,91 mm	2 mm

Pronađena je greška na dubini od približno 31 mm, a ekvivalentnog je promjera približno 2 mm.



#### 4.4.2. Ispitivanje greške u vratu tračnice

Na narednim slikama prikazane su sonde u položajima u kojima detektiraju grešku u zavaru u vratu tračnice. Na *Slici 84* prikazana je sonda MWB 45-2, na *Slici 85* prikazana je sonda SWB 45-2, a na *Slici 86* prikazana je sonda WB 45-2 u položaju u kojem detektira pogrešku u vratu tračnice.



**Slika 84.** Položaj u kojem sonda MWB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice

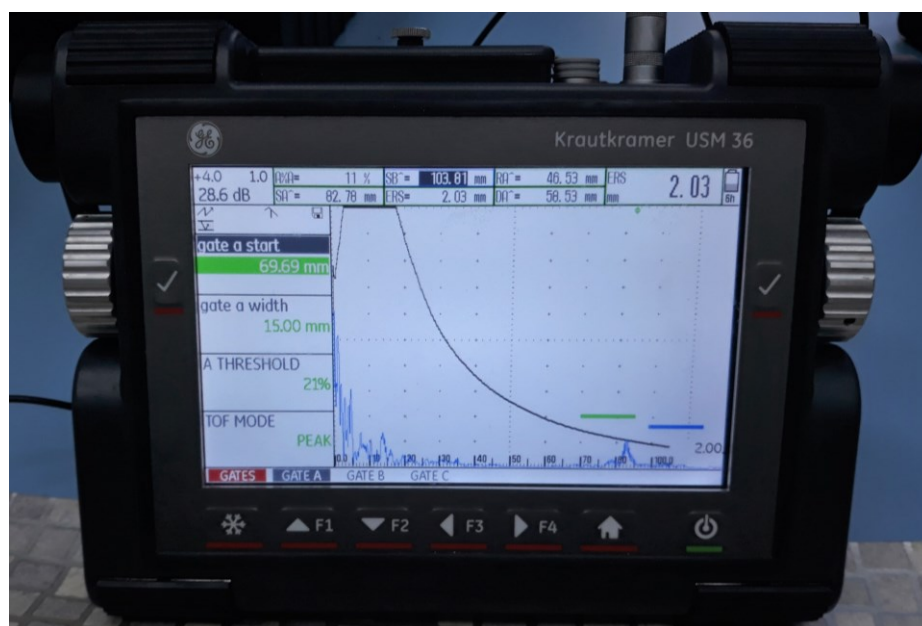


**Slika 85.** Položaj u kojem sonda SWB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice

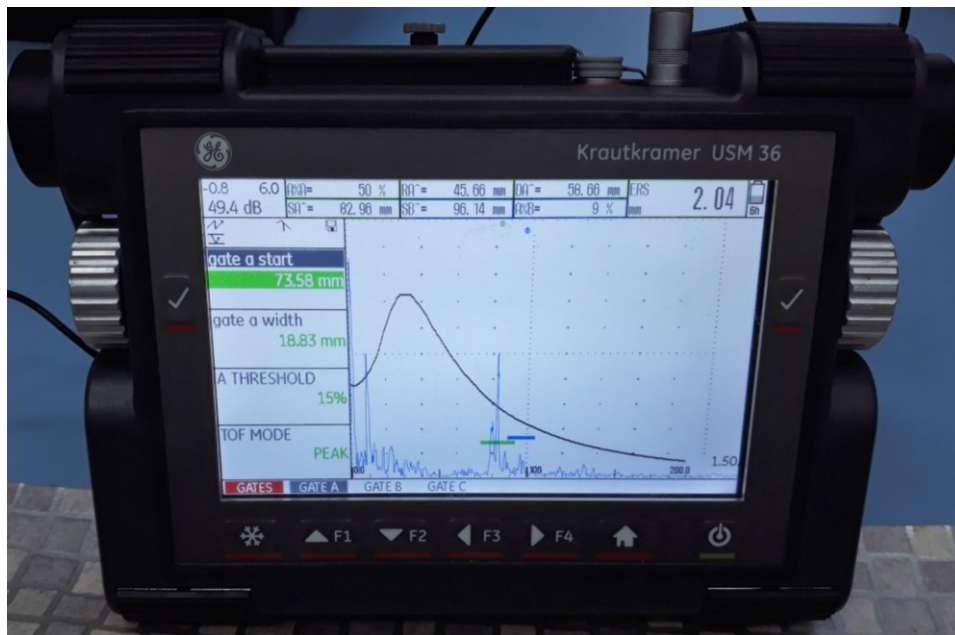


**Slika 86.** Položaj u kojem sonda WB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice

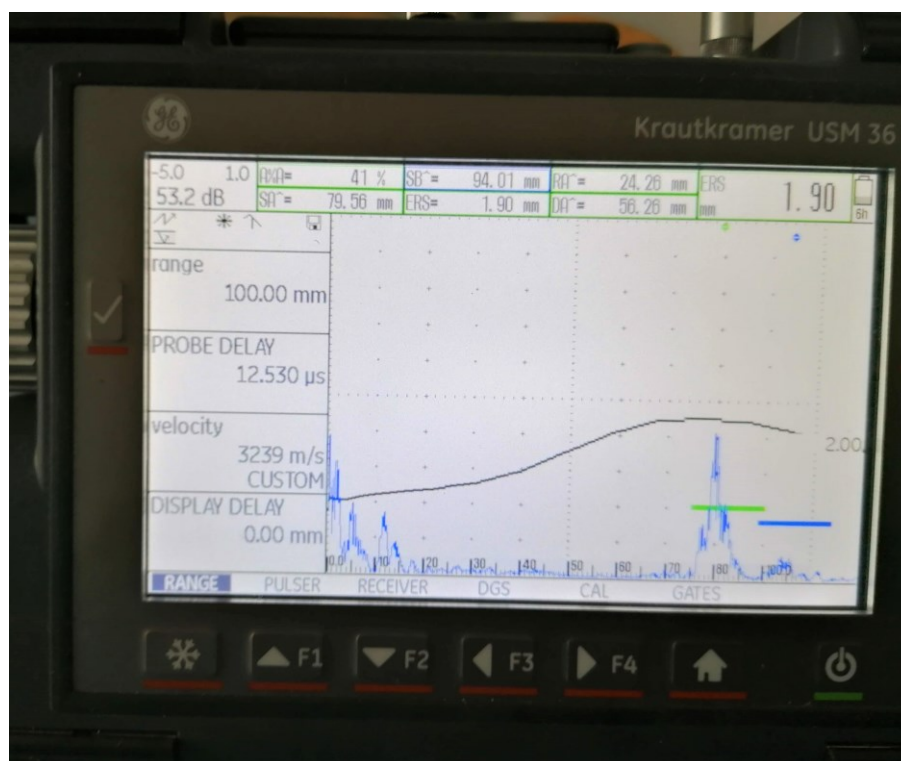
Na narednim slikama prikazani su ekrani ultrazvučnih uređaja u trenucima kada sonde detektiraju grešku u zavaru u vratu tračnice. Na *Slici 87* prikazan je ekran ultrazvučnog uređaja u trenutku u kojem sonda MWB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice, na *Slici 88* ekran u trenutku u kojem sonda SWB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice, a na *Slici 89* ekran u trenutku u kojem sonda WB 45-2 detektira pogrešku u vratu tračnice. Kontrolnim vratima označen je signal za koji se daju podaci.



**Slika 87.** Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u vratu tračnice sondom MWB 45-2



Slika 88. Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u vratu tračnice sondom SWB 45-2



Slika 89. Ekran uređaja pri detektiranju pogreške u vratu tračnice sondom WB 45-2

U Tablici 17 prikazani su rezultati ispitivanja greške u zavaru u vratu tračnice koji se mogu očitati s ekrana ultrazvučnog uređaja.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja greške u vratu tračnice

	MWB 45-2	SWB 45-2	WB 45-2
<b>RA</b>	46,53 mm	45,66 mm	24,26 mm
<b>P</b>	59,53 mm	57,66 mm	56,26 mm
<b>DA</b>	58,53 mm	58,66 mm	56,26 mm
<b>SA</b>	82,78 mm	82,96 mm	79,56 mm
<b>ERS</b>	2,03 mm	2,04 mm	1,90 mm

Pronađena je greška na dubini od približno 58 mm, a ekvivalentnog je promjera približno 2 mm.

Obzirom da se radi o greški u vratu tračnice koja je na približnoj dubini kao i referentni reflektor SDH<sub>1</sub> njihovi odzivi mogu se uspoređivati. Usporedba je dana u *Tablici 18*.

Tablica 18. Usporedba greške u vratu tračnice kod uzorka zavara i SDH<sub>1</sub> reflektora

	Uzorak zavara			SDH <sub>1</sub> reflektor		
	MWB 45-2	SWB 45-2	WB 45-2	MWB 45-2	SWB 45-2	WB 45-2
<b>RA</b>	46,53 mm	45,66 mm	24,26 mm	51,23 mm	53,71 mm	34 mm
<b>P</b>	59,53 mm	57,66 mm	56,26 mm	64,23 mm	65,71 mm	66 mm
<b>DA</b>	58,53 mm	58,66 mm	56,26 mm	64,23 mm	66,71 mm	66 mm
<b>SA</b>	82,78 mm	82,96 mm	79,56 mm	90,84 mm	94,34 mm	93,34 mm
<b>ERS</b>	2,03 mm	2,04 mm	1,90 mm	1,03 mm	2,82 mm	2,70 mm

Može se uočiti kako su rezultati ispitivanja greške u vratu uzorka ujednačeni. Pri procjenjivanju reflektora sonda MWB 45-2 bila je odbačena kao nepogodna za ispitivanje zbog utjecaja geometrije vrata tračnice na ultrazvučni snop. Na uzorku ispitivanog zavarenog spoja na bočnim stranama tračnice postoji nadvišenje čime se povećava širina vrata te geometrija nema utjecaja na ultrazvučni snop. Prema tome, pogreška u tom dijelu vrata može ispitivati i sondom MWB 45-2.



## 5. ZAKLJUČAK

Svrha ovog diplomskog rada bila je signale ultrazvučnih odziva od uvrta s ravnim dnom (FBH), koji su propisani normom EN 14730-1 iz 2010. godine, usporediti s odzivima od bočnih uvrta (SDH), koji su uobičajeni referentni reflektori za kutne sonde. Prilikom dobivanja signala ultrazvučnih odziva od referentnih reflektora utvrđeno je kako FBH nisu prikladni za referentne reflektore za kutne sonde na temelju toga što dobivene vrijednosti i rezultati odstupaju od njihovih stvarnih dimenzija te orijentacija FBH nije prikladna za dobivanje signala odziva kutnom sondom. Sukladno tome, u normi EN 14730-1 iz 2017. godine izostavljen je prilog koji propisuje referentni blok s uvrtima s ravnim dnom kao referentnim reflektorima.

Temeljem rezultata ispitivanja postavljena je pretpostavka da bi razlog različitih rezultata mogla biti geometrija. Korištenjem sonde MWB 45-2 za detektiranje reflektora SDH dobivene su vrijednosti ekvivalentne veličine koje odstupaju od vrijednosti dobivenih korištenjem sonde SWB 45-2 i WB 45-2.

Analizirani su odzivi dobiveni od tri referentna reflektora FBH i tri reflektora SDH. Po jedan FBH reflektor nalazi se u glavi, vratu i stopi bloka, a sva tri SDH reflektora nalaze u vratu bloka na različitim dubinama. Da bi se analizirao utjecaj specifičnih geometrija presjeka tračnice na dobivanje ultrazvučnih odziva prikazane su geometrije prostiranja ultrazvučnih snopova te je zaključeno kako geometrija presjeka tračnice ima utjecaja na dobivanje odziva. Taj utjecaj vidljiv je kod dobivenih odziva FBH reflektora u vratu i stopi te sva tri SDH reflektora sondom MWB 45-2, kao i FBH u stopi te SDH na najvećoj dubini sondom SWB 45-2, ali u manjoj mjeri kako je prikazano na *Slici 27*, *Slici 28*, *Slici 35*, *Slici 36*, *Slici 37*, *Slici 46* i *Slici 55*. Obzirom da se prilikom ispitivanja sondom WB 45-2 ne javlja utjecaj geometrije presjeka ona je pogodna za ispitivanje cijelog presjeka, a sonda SWB 45-2 u odnosu na sondu MWB 45-2 daje bolje procjene i signal na ekranu uređaja.

Kod ultrazvučnog ispitivanja uobičajeno je koristiti DGS dijagram u svrhu procjenjivanja veličine pronađenih nepravilnosti, a on se temelji na FBH reflektorima. Stoga su za SDH reflektore izračunate teorijske vrijednosti  $D_{FBH}$  i uspoređene sa ekvivalentnim veličinama (ERS) dobivenim u ispitivanju. U tim vrijednostima dolazi do razilaženja.

Korišteni uzorak u ispitivanju je aluminotermijski zavar s realnim greškama koje nisu idealnih oblika i orijentacija kao referentni reflektori na referentnim blokovima. Pronađena

greška na dubini od 58 mm najbliža je referentnom reflektoru SDH<sub>1</sub>, koji se nalazi na dubini od 66 mm stoga se mogu uspoređivati. Dobiveni signali odziva od SDH<sub>1</sub> rezultiraju vrijednostima ERS koje se razilaze od vrijednosti D<sub>FBH</sub>. Naime, ERS iznosi oko 2,7 mm, a D<sub>FBH</sub> oko 3,7 mm. Pritom vrijednost dobivena sondom MWB 45-2 odudara od vrijednosti dobivene drugim sondama, ona iznosi oko 1 mm. Neovisno o tome što vrijednost ERS dobivena sondom MWB 45-2 na SDH<sub>1</sub> u vratu odudara od vrijednosti ERS dobivenih ostalim sondama, ujednačene vrijednosti ekvivalentnih veličina za grešku u vratu na nešto manjoj dubini mogu se objasniti time što na toj poziciji vrata tračnice zavar ima nadvišenje, odnosno veća je širina bočnih stranica te time geometrija zavara na toj dubini nema utjecaja na ultrazvučni snop.

U radu je sustavno prikazano dobivanje odziva od referentnih reflektora različitim sondama. Dobiveni rezultati predstavljaju smjernice za daljnja poboljšanja i unapređivanje kvalitete rezultata ultrazvučnog ispitivanja aluminotermijskih zavara tračnica.

## LITERATURA

- [1] željeznica. Hrvatska tehnička enciklopedija. <https://tehnika.lzmk.hr/zeljeznica/> (pristupljeno 18.12.2021.)
- [2] željeznički promet. Hrvatska tehnička enciklopedija. <https://tehnika.lzmk.hr/zeljeznicki-promet/> (pristupljeno 18.12.2021.)
- [3] Sladojevic B. Ultrasonic Testing of Aluminothermic Welded Joints of Rail Tracks. 10th European Conference on Non-Destructive Testing: Moscow, 7-11 June 2010
- [4] Kozyrev NA, Kozyreva OA, Usoltsev AN, Kryukov RE. Modern Methods of Rail Welding. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017;253(1):012002
- [5] HRN EN 14730-1: Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Aluminotermijsko zavarivanje tračnica – 1. dio: Odobravanje postupaka zavarivanja (EN 14730-1:2006+A1:2010)
- [6] BS EN 14730-1:2017: Railway applications – Track – Aluminothermic welding of rails - Part 1: Approval of welding processes
- [7] HRN EN 16771:2016: Željeznički sustav – Infrastruktura – Aluminotermijsko zavarivanje žljebastih tračnica (EN 16771:2016)
- [8] SIST EN 14587-1:2019: Železniške naprave - Infrastruktura - Elektroporovno varjenje novih tirnic - 1. del: Varjenje tirnic kakovosti R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT in R400HT v varilnici
- [9] Jessop T, van den Burg H. Requirements for the European Education of Railway Track Welders in Aluminothermic Welding. EUROJOIN 6: Santiago de Compostela, Spain, 28 - 30 June 2006
- [10] Kralj S, Kožuh Z, Andrić Š. Zavarivački i srodni postupci. Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [11] Gehrman R, Keichel J. Standards struggle to keep up with the welders. International Railway Journal. 2014;54(12):45-47
- [12] Raude A, Colombier T, Rudlin J, Jasiuniene E, Kotsikos G. The Solution for Volumetric Assessment of Aluminothermic Rail Welds. 18th World Conference of Non-destructive Testing: Durban, South Africa, 16-20 April 2012
- [13] UIC Code 712 - Rail defects. 4th edition. January 2002

- [14] Government of India: Ministry of Railways. Manual for Fusion Welding of Rails by the Alumino-thermic Process. Revised 2012
- [15] Rail/Weld Failures. Indian Railway Institute of Civil Engineering. [https://www.iricen.gov.in/ModelRoom/H2\\_Rail%20Defects.html](https://www.iricen.gov.in/ModelRoom/H2_Rail%20Defects.html) (pristupljeno 06.01.2022.)
- [16] Krstelj V. Ultrazvučna kontrola: odabrana poglavlja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2003.
- [17] BS EN 16729-1:2016: Railway applications – Infrastructure – Non-destructive testing on rails in Track – Part 1: Requirements for ultrasonic inspection and evaluation principles
- [18] Vipparthy ST. Inspection of Defects in Rails using Ultrasonic Probe. The e-Journal of Nondestructive Testing. 2013;18(10)
- [19] What is ultrasonic testing and how does it work?. TWI. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/ultrasonic-testing> (pristupljeno 10.01.2022.)
- [20] Bombarda D, Vitetta GM, Ferrante G. Rail Diagnostics Based on Ultrasonic Guided Waves: An Overview. Applied Sciences. 2021;11(3):1071
- [21] Jemec V, Grum J. Automated Non-Destructive Testing and Measurement Systems for Rails. 10th European Conference on Non-Destructive Testing: Moscow, 7-11 June 2010
- [22] Ultrasonic Single Rail Flaw Detector UDS2-77. OKOndt GROUP. <https://www.okondt.com/products/ut/flaw-detectors/uds2-77-single-rail> (pristupljeno 13.02.2022.)
- [23] UDS2-73 rail flaw detector. OKOndt GROUP. <https://www.okondt.com/products/ut/flaw-detectors/uds2-73> (pristupljeno 14.02.2022.)
- [24] Ultrasonic Rail Testing. Pandrol. <https://www.pandrol.com/product/ultrasonic-rail-testing/> (pristupljeno 14.02.2022.)
- [25] Vehicles for railway diagnostics. Tvema. <https://tvema.com/629> (pristupljeno 14.02.2022.)
- [26] Ginzl E, Ekhlās AG, Matheson M, Cyr P, Brown B. Near Field Length Compensation Options. The e-Journal of Nondestructive Testing. 2014;19(6)