

# Usporedba zvučnih karotažnih mjerenja sondom na kabelu i tijekom bušenja

---

Špehar, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:812991>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Prije diplomski studij naftnog rudarstva

**USPOREDBA ZVUČNIH KAROTAŽNIH MJERENJA SONDOM NA KABELU I  
TIJEKOM BUŠENJA**

Završni rad

Filip Špehar

N4483

Zagreb, 2024.

## USPOREDBA ZVUČNIH KAROTAŽNIH MJERENJA SONDOM NA KABELU I TIJEKOM BUŠENJA

Filip Špehar

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Zvučna karotaža pruža neophodne informacije o fizikalnim svojstvima nabušenihi stijena te fluida koji se u njima nalaze. Jedno je od osnovnih mjerenja korištenih za utvrđivanje prisutnosti ugljikovodika i omogućavanja njihove učinkovite i sigurne proizvodnje. Princip mjerenja je mjerenje vremena prolaska elastičnog vala između odašiljača i prijemnika na sondi. Zvučna karotaža može se provoditi na dva načina, mjerenjem pomoću sonde spuštene na kabelu ili mjerenjem tijekom bušenja (LWD). U ovome radu prikazane su razlike između građe alata i uvjeta mjerenja ovih dviju metoda, kao i njihove prednosti i nedostaci. Usporedbom podataka o intervalnim brzinama dobiven je uvid u njihovu kvalitetu i preciznost. Iako zvučna karotaža tijekom bušenja ima manji opseg mjerenja pokazala su se mala odstupanja, uglavnom ovisna o uvjetima unutar bušotine. Može se reći da LWD mjerenja imaju prednost tijekom izrade kanala bušotine, prije potencijalnih oštećenja ili prodora filtrata isplake, međutim mjerenja sondom na kabelu pokazuju ipak nešto kvalitetnije podatke zahvaljujući povoljnim uvjetima u bušotini tijekom mjerenja.

Ključne riječi: zvučna karotaža, mjerenje sondom na kabelu, mjerenje tijekom bušenja

Završni rad sadrži: 20 stranica, 9 slika, i 9 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGNF

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGNF  
Izv. prof. dr. sc. Sonja Koščak Kolin, RGNF  
Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA.....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA.....</b>	<b>IV</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ZVUČNA KAROTAŽA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Metoda karotažnog mjerenja sondom na kabelu .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Metoda karotažnog mjerenja tijekom bušenja .....</b>	<b>6</b>
<b>3. KONSTRUKCIJA SONDI .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. Razlika između sondi za mjerenje na kabelu i mjerenje tijekom bušenja .....</b>	<b>9</b>
<b>4. UVJETI RADA .....</b>	<b>11</b>
<b>5. USPOREDBA PRIKUPLJENIH PODATAKA .....</b>	<b>13</b>
<b>5.1. Usporedba izmjerenih brzina valova .....</b>	<b>13</b>
5.1.1. Brzine longitudinalnih valova.....	13
5.1.2. Brzine transverzalnih valova.....	15
<b>5.2. Usporedba podataka iz bušotine u Meksičkom zaljevu .....</b>	<b>17</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>19</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>20</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Dijagram zvučne karotaže (zeleno) prikazan zajedno s dijagramom gustoće (crveno).....	3
Slika 2-2. Odnos brzina longitudinalnih i transverzalnih valova za različite stijene .....	4
Slika 2-3. Prikaz izvođenja karotažnog mjerenja na kabelu i tijekom bušenja .....	5
Slika 3-1. Osnovna sonda za zvučnu karotažu. ....	7
Slika 3-2. Rasprostiranje longitudinalnog i transverzalnog glavnog vala u bušotini .....	8
Slika 3-3. Sonda za kompenziranu zvučnu karotažu. ....	9
Slika 3-4. Ilustrirani prikaz različite građe sonde za mjerenja na kabelu i mjerenja tijekom bušenja .....	10
Slika 5-1. Dijagram brzina longitudinalnih valova za karotažna mjerenja na kabelu i tijekom bušenja, razlike mjerenih brzina u postotcima .....	14
Slika 5-2. Dijagram brzina transverzalnih valova dobivenih karotažnim mjerenjem na kabelu i tijekom bušenja, razlike mjerenih brzina u postotcima .....	16

## **POPIS KORIŠTENIH KRATICA**

LWD – karotažna mjerenja tijekom bušenja (engl. *Logging while Drilling*)

MWD – mjerenja tijekom bušenja (engl. *Measurements while Drilling*)

NOVADRIL – vrsta sintetičke isplake

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\Delta t$	$\mu\text{s/m}$	intervalno vrijeme
$k$	$\text{N/m}^2$	volumni modul elastičnosti
$V_p$	$\text{m/s}$	brzina longitudinalnog vala
$V_s$	$\text{m/s}$	brzina transverzalnog vala
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća
$\mu$	$\text{N/m}^2$	modul smicanja
$i$	$^\circ$	upadni kut valne zrake
$\theta$	$^\circ$	kut loma valne zrake
$V_1$	$\text{m/s}$	brzina rasprostiranja zvučnog vala kroz isplaku u bušotini
$V_2$	$\text{m/s}$	brzina rasprostiranja zvučnog vala kroz stijenu
$\lambda$	$\text{m}$	valna duljina
$f$	$\text{Hz}$	frekvencija
$v$	$\text{m/s}$	brzina rasprostiranja vala

## 1. UVOD

Karotažna mjerenja neizostavan su dio gotovo svih faza tijekom istraživanja i eksploatacije ugljikovodika, a omogućuju pouzdanu i pravovremenu karakterizaciju nabušenih stijena. Ključna su za uspješno i ekonomično iskorištavanje naftnih i plinskih ležišta. Pružaju informacije o svojstvima i sastavu stijena i fluida, kao što su poroznost, propusnost, zasićenje fluidima, mehanička svojstva stijena i ostalo. Provode se u različitim fazama životnog vijeka bušotine, uključujući faze bušenja, istraživanja, opremanja, proizvodnje i napuštanja. Jedna od metoda dobivanja podataka je zvučna karotaža, koja se temelji na mjerenju brzine rasprostiranja zvučnih valova kroz fluid u bušotini i stijenu. U ovome radu razmotrene su dvije metode zvučnih karotažnih mjerenja, karotažno mjerenje sondom spuštrenom na kabelu nakon bušenja i karotažno mjerenje tijekom bušenja.

Karotažna mjerenja tijekom bušenja omogućavaju analizu podataka u stvarnom vremenu, pružaju mogućnost trenutačne prilagodbe, time povećavajući učinkovitost bušaćih operacija i smanjujući neproduktivno vrijeme. S druge strane, metoda karotažnih mjerenja sondom na kabelu podrazumijeva spuštanje sonde za izvođenje mjerenja u bušotini nakon što je određeni interval izbušen te omogućava detaljnu analizu i precizna mjerenja. Cilj rada je usporediti ove dvije metode s obzirom na građu alata, radne uvjete mjerenja te preciznost i kvalitetu podataka.



## 2. ZVUČNA KAROTAŽA

Zvučna karotaža pruža korisne i neophodne informacije za razumijevanje litoloških svojstava nabušenih stijena te svojstva fluida koji se u njima nalaze. Stoga se smatra jednim od osnovnih mjerenja korištenih za utvrđivanje prisutnosti ugljikovodika. U geomehaničkoj analizi, pruža podatke o pnom tlaku i zonama gdje je on povišen, čvrstoći stijene, promjenama okolnih formacija i smjeru naprezanja. Može se koristiti za procjenu kvalitete cementacije, korelaciju s površinskim seizmičkim podacima i izradu sintetskih seizmograma. Međutim, ukoliko je poznata litologija, iz mjerenog vremena putovanja vala može se odrediti poroznost, što je osnovna namjena zvučne karotaže (Kinoshita i dr., 2010).

Temelji se na mjerenju vremena prolaska elastičnog vala između odašiljača i prijemnika na sondi. Sonda za mjerenje sadrži izvore i prijemnike zvučnih valova, pri čemu izvor odašilje zvučni puls koji putuje najprije kroz fluid u bušotini, a zatim kroz stijenu, dok prijemnici primaju signale reflektirane ili refraktirane kroz stijene uz kanal bušotine. Mjereno vrijeme rasprostiranja vala duž puta od odašiljača do prijemnika naziva se intervalno vrijeme ( $\Delta t$ ). Brzina rasprostiranja vala ovisi o poroznosti stijene, njezinom litološkom sastavu i fluidima u porama.

Sa dijagrama zvučne karotaže očitava se intervalno vrijeme prolaska vala, odnosno sporost (engl. *Slowness*). Primjer ovakvog dijagrama nalazi se na Slici 2-1. Sporost je inverzna vrijednost brzine ( $v$ ) te je izražena u mikrosekundama po metru ( $\mu\text{s/m}$ ).

Tijekom mjerenja prati se vrijeme rasprostiranja longitudinalnih (P) valova (engl. *Compressional wave*) te pomoću sofisticiranijih sondi koje mogu detektirati cijeli valni paket, transverzalnih (S) valova (engl. *Shear wave*). Longitudinalni valovi, poznati i kao kompresijski valovi, šire se većom brzinom od ostalih vrsta valova te se tako prvi registriraju. Oni uzrokuju oscilacije čestica u mediju u istom smjeru u kojem se val širi, stvarajući pritom kompresiju i ekspanziju materijala kroz koji prolaze. Transverzalni valovi, poznati kao i posmični valovi, šire se sporije od P-valova i stoga su poznati kao sekundarni valovi. Svojim prolaskom kroz sredstvo uzrokuju osciliranje čestica okomito na pravac širenja vala, što uzrokuje smicanje materijala i sporiji prijenos energije. Modul elastičnosti i gustoća sredstva kroz koje se valovi rasprostiru određuju brzinu širenja valova, stoga:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \text{ i } V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2-1)$$

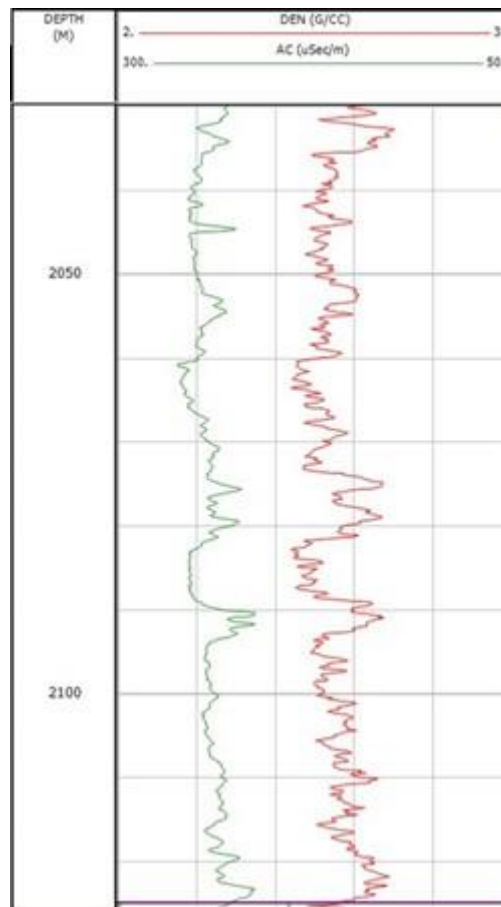
gdje su:  $k$  – volumni modul elastičnosti (N/m<sup>2</sup>)

$\mu$  – modul smicanja (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  – gustoća (kg/m<sup>3</sup>)

$V_p$  – brzina longitudinalnog vala (m/s)

$V_s$  – brzina transverzalnog vala (m/s).

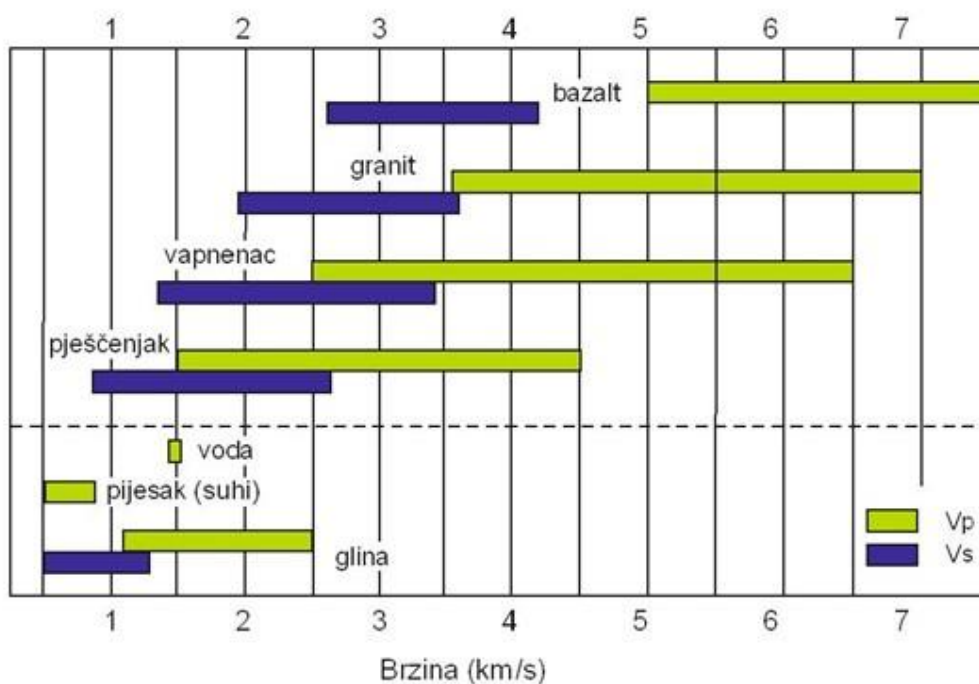


**Slika 2-1.** Dijagram zvučne karotaže (zeleno) prikazan zajedno s dijagramom gustoće (crveno) (Orešković, 2017)

Kao što se može primijetiti u jednadžbi 2-1, veća brzina longitudinalnih valova direktna je posljedica volumnog modula elastičnosti, koji je uvijek pozitivan.

Bitna razlika koja omogućava raspoznavanje čvrstih i tekućih faza je ta da se transverzalni valovi, za razliku od longitudinalnih, ne šire u tekućinama i plinovima, iz razloga što tekućine i plinovi ne pružaju otpor posmičnoj deformaciji, odnosno  $\mu=0$ , te je posljedično  $V_s=0$ . U slučaju longitudinalnih valova, ova karakteristika tekućina i plinova uzrokuje

smanjenje brzine njihovog širenja. Velik utjecaj na širenje valova ima i litološki sastav stijene te njezina mehanička svojstva (Slika 2-2). Kao što je prikazano na Slici 2-2, provođenjem ispitivanja zaključeno je da u stijenama s visokim stupnjem poroznosti, brzina P-valova, kao i S-valova u manjoj mjeri, znatno je smanjena.



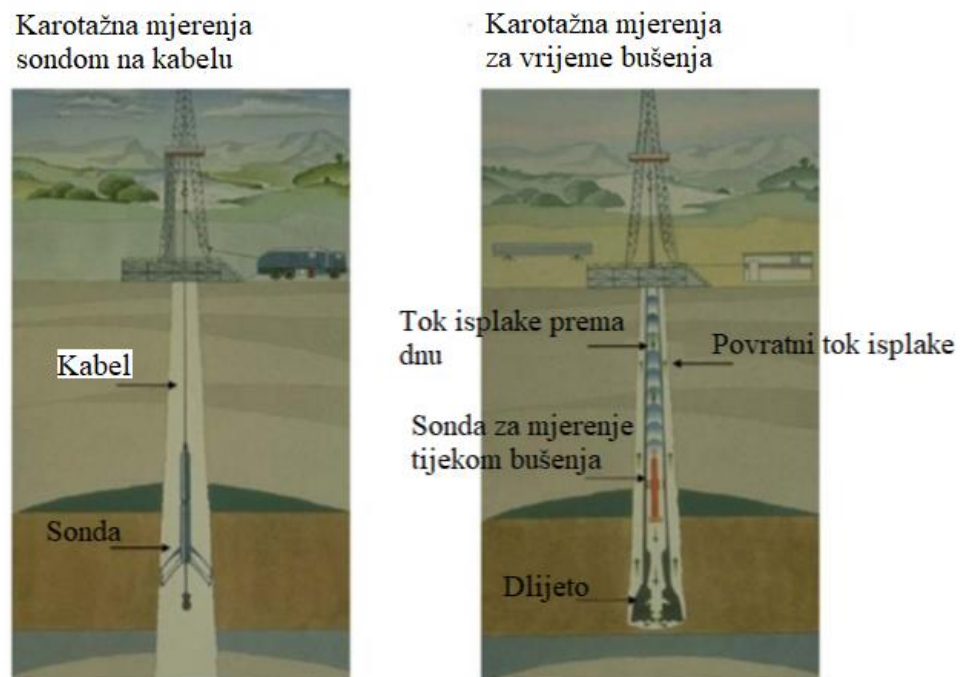
**Slika 2-2.** Odnos brzina longitudinalnih i transverzalnih valova za različite stijene

Longitudinalni valovi brži su u gušćim i manje poroznim stijenama, kao što su vapnenci i dolomiti, a sporiji su u poroznim i manje gustim stijenama, kao što su pijesci. Isto vrijedi i za transverzalne valove, uz pojavu gdje im brzina drastično pada u stijenama sa visokim udjelom vode, kao što su gline.

## 2.1. Metoda karotažnog mjerenja sondom na kabelu

Metoda mjerenja sondom na kabelu (engl. *Wireline*) podrazumijeva spuštanje alata za provođenje karotažnog mjerenja, odnosno sonde, na kabelu u bušotinu. Mjerenja se provode između bušačkih operacija, te na kraju bušenja. Primarni način mjerenja ovom metodom je u otvorenom kanalu bušotine, nakon što je određeni interval izbušen, no postoje i sonde koje mogu izvoditi mjerenja u zacijevljenom kanalu bušotine. Postoje i posebne sonde, koje se koriste pri ispitivanju kvalitete cementacije. Na Slici 2-3 je prikaz provođenja mjerenja nakon što je bušači niz izvučen iz kanala bušotine te je bušotina očišćena i stabilizirana. Procesom se upravlja iz specijaliziranog kamiona na površini, koji sadrži potrebnu opremu

za prikupljanje i analizu električnih impulsa, prenošenih sa sonde do površine kroz kabel. U slučaju odobalnih mjerenja, kamion je zamijenjen kabinom na platformi. Sonda za provođenje karotažnog mjerenja spušta se kabelom na željenu dubinu mjerenja, a snimanje započinje nakon što se sonda počne izvlačiti na površinu. Time se ostvaruje stalna napetost kabela što osigurava točno određivanje dubine sonde u bušotini (Goncalves Bastos, 2013).



**Slika 2-3.** Prikaz izvođenja karotažnog mjerenja na kabelu i tijekom bušenja (Geologist skills, 2020)

Prednost ove vrste karotažnog mjerenja je u preciznijim i pouzdanijim podacima, koji proizlaze iz stabilnih uvjeta mjerenja. Budući da je bušotina očišćena te je iz nje izvađen sav alat, instrumenti nisu izloženi vibracijama i dinamičkim uvjetima bušenja. Samim time dodatna prednost ove metode je mogućnost kontroliranja uvjeta mjerenja. Glavni nedostatak ove metode je ekonomske prirode, a proizlazi iz potrebe za potpunim zaustavljanjem radnih operacija te vađenjem bušaćeg niza iz kanala bušotine kako bi se alat za mjerenje mogao spustiti u bušotinu. Još jedna negativna strana je relativno dulje vrijeme potrebno za izvođenje mjerenja.

## 2.2. Metoda karotažnog mjerenja tijekom bušenja

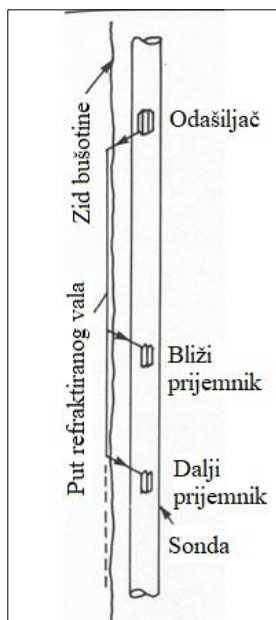
Mjerenja tijekom bušenja (engl. *Measurements while Drilling*, MWD) omogućavaju operaterima mjerenje različitih parametara u kanalu bušotine bez izvlačenja bušačkog niza. Dodatak tim mjerenjima su karotažna mjerenja tijekom bušenja (engl. *Logging while Drilling*, LWD). U početku su rijetko korištena, u slučaju kada karotažna mjerenja nisu bila moguća zbog putanje kanala bušotine. Također su korištena za usmjeravanje kanala bušotine, povećanje učinkovitosti bušenja i prikupljanje korelacijskih podataka. S vremenom i razvojem tehnologije postala su alternativna opcija za karotažna mjerenja na kabelu (Tollefsen i dr., 2007).

Oprema za provođenje mjerenja tijekom bušenja postavlja se neposredno iznad dlijeta, što znači da LWD uređaji mogu prolaziti kroz sve dijelove kanala kojima prolazi dlijeto te tako izvoditi detaljna i neophodna mjerenja u bušotinama složene putanje kao što su horizontalne bušotine. Sonde su opremljene vlastitim izvorom energije te imaju sposobnost kontinuiranog mjerenja. Mjerenja provedena ovom metodom zapisuju se u funkciji vremena, za razliku od karotažnih mjerenja sondom na kabelu koja se bilježe u funkciji dubine. Komunikacija sonde s površinskim uređajima vrši se slanjem signala kroz isplaku, što ju čini sporom, 1 do 2 bita informacija u sekundi, međutim to je sasvim dovoljno za dobivanje ključnih podataka potrebnih za donošenje odluka tijekom bušenja. Unatoč sličnim principima mjerenja kao kod karotaže na kabelu, LWD sonde mjerenje izvode prilikom kretanja prema dolje, zbog prirode kretanja bušačkog niza, za razliku od mjerenja od dna bušotine prema vrhu, što je slučaj kod sonde na kabelu (Goncalves Bastos, 2013).

Karotaža tijekom bušenja daje mogućnost prikupljanja podataka u stvarnom vremenu, odnosno prilikom izrade kanala bušotine što omogućava donošenje brzih i informiranih odluka. Glavna prednost u odnosu na mjerenja izvedena sondom na kabelu, osim kontinuiranog zapisa podataka tijekom bušenja, je mogućnost izvođenja mjerenja bez zaustavljanja bušačkih operacija. Robusnija građa uređaja u svrhu podnošenja teških radnih uvjeta te sposobnost rada u horizontalnim bušotinama također su velike prednosti. S druge strane, upravo zbog teških uvjeta i znatno više smetnji prilikom izvođenja mjerenja, podaci dobiveni LWD metodom manje su preciznosti od podataka dobivenih sondom na kabelu, te je potrebno primijeniti korekcije zbog bušotinskih uvjeta.

### 3. KONSTRUKCIJA SONDI

Sonda kojom se provode mjerenja zvučne karotaže sadrži piezoelektrični odašiljač (engl. *Transmitter*) i piezoelektrični prijemnik (engl. *Receiver*) (Slika 3-1). Kada sonda dosegne ciljanu dubinu, odašiljač pretvara električni napon u ultrazvučnu vibraciju te ju emitira prema stijeni.



**Slika 3-1.** Osnovna sonda za zvučnu karotažu (Orešković, 2017).

Ove vibracije su frekvencija između 15 000 i 30 000 Hz. Nakon emitiranja zvučnog vala, oni se rasprostiru kroz različite slojeve geoloških formacija, te se na tom putu reflektiraju (odbijaju), lome i raspršuju ovisno o svojstvima stijena i tekućina u porama stijene. Primarno se rasprostiru isplakom, malom brzinom sve do stijenke kanala bušotine koja omogućava veću brzinu širenja ultrazvučnog vala. U tom trenutku val se djelomično odbija (reflektira), a djelomično lomi (refraktira). Prilikom širenja valnih zraka one podliježu Snellovom zakonu, prikazanom jednačinom 3-1, prema kojem se na granici sredstava s različitim brzinama zrake reflektiraju pod kutom jednakim upadnom kutu. Za val koji se refraktira vrijedi da se lomi prema okomici kada je u sljedećem sloju brzina manja ( $V_1 > V_2$ ), odnosno da se lomi od okomice kada je u sljedećem sloju brzina veća ( $V_2 > V_1$ ). U bušotinskim uvjetima, val iz isplake gdje ima malu brzinu prelazi u stijenu, u kojoj je brzina znatno veća:

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin \theta}{V_2} \quad (3-1)$$

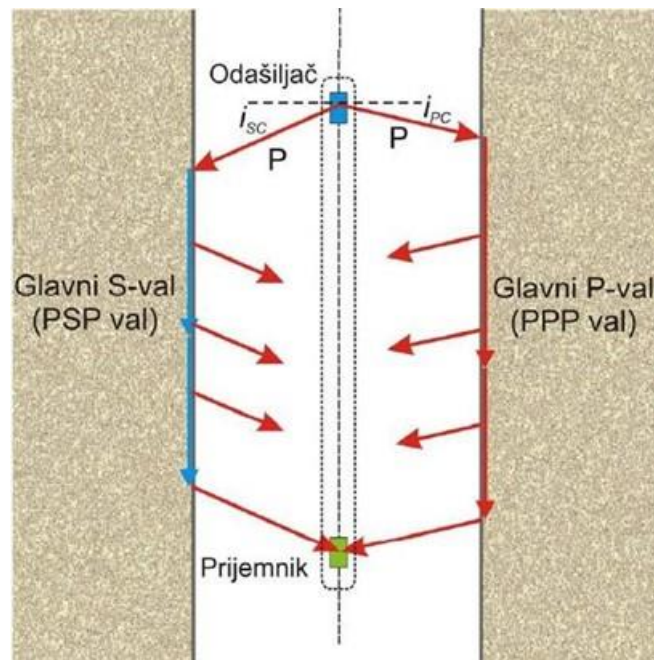
- gdje su:  $i$  – upadni kut valne zrake

$\theta$  – kut loma valne zrake

$V_1$  – brzina rasprostiranja zvučnog vala kroz isplaku u bušotini (m/s)

$V_2$  – brzina rasprostiranja zvučnog vala kroz stijenu (m/s).

U slučaju kada se val lomi pod kutom od  $90^\circ$ , on će se širiti duž granice dvaju sredstava te se naziva glavnim valom (engl. *Head Wave*) (Slika 3-2). Zbog širenja u drugom sredstvu, koje je u ovom slučaju stijena, do prijemnika stiže prije direktnog vala koji se rasprostire manjom brzinom kroz isplaku. Najmanja udaljenost između odašiljača i prijemnika gdje glavni val stiže do prijemnika prije direktnog vala naziva se kritična udaljenost, te nam je njezino poznavanje bitno u svrhu optimalnog rasporeda prijemnika i odašiljača na sondi.



**Slika 3-2.** Rasprostiranje longitudinalnog i transverzalnog glavnog vala u bušotini (Orešković, 2017)

Sonde koje se koriste za zvučnu karotažu su malog promjera mjerenja koji ovisi o udaljenosti između odašiljača i prijemnika, te valnoj duljini. Valna duljina omjer je brzine rasprostiranja valova ( $v$ ) i frekvencije odašiljača ( $f$ ):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3-2)$$

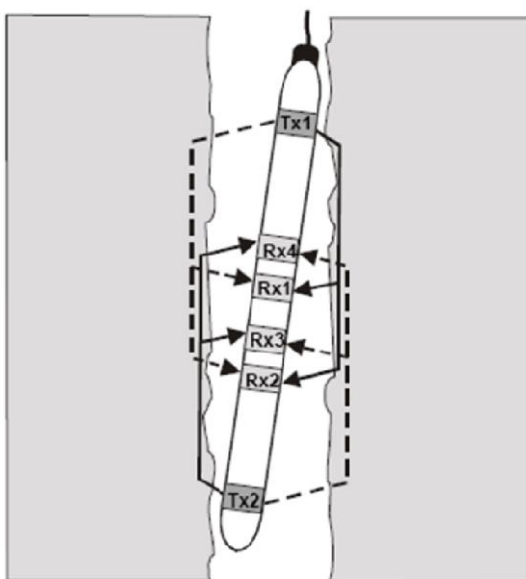
gdje su:  $\lambda$  – valna duljina (m)

$v$  – brzina rasprostiranja vala (m/s)

$f$  – frekvencija odašiljača (Hz).

Veća brzina rasprostiranja valova kroz stijenu, rezultirat će većom valnom duljinom i dubljim prodiranjem u formaciju.

Osnovna sonda je sonda za kompenziranu zvučnu karotažu (engl. *Borehole Compensated Sonic*) koja se sastoji od barem dva odašiljača i četiri prijemnika (Slika 3-3). Sonda je konstruirana na način da se odašiljači nalaze iznad i ispod prijemnika, koji su u srednjem dijelu tijela sonde (Slika 3-3). Na taj način dobivaju se dva intervalna vremena iz suprotnih smjerova, a izračunom njihove srednje vrijednosti kompenzira se utjecaj položaja sonde u bušotini.

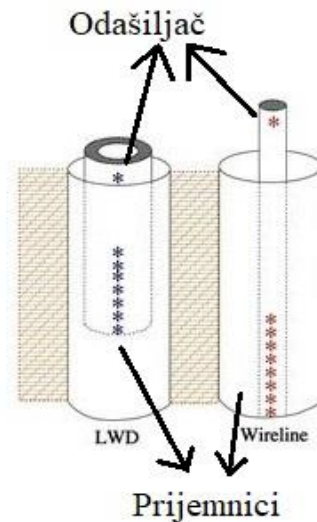


**Slika 3-3.** Sonda za kompenziranu zvučnu karotažu (Orešković, 2017).

### **3.1. Razlika između sonde za mjerenje na kabelu i mjerenje tijekom bušenja**

Karotažna mjerenja provedena prilikom spuštanja sonde na kabelu razlikuju se od onih provedenih prilikom bušenja u vidu radnog okruženja te izazova koje moraju savladati. Samim time možemo pretpostaviti da postoji razlika u građi i izgledu samog alata. Na Slici 3-4 je skicom prikazana razlika između spomenutih alata. Primjećuje se razlika u promjeru i duljini samih sonde, te veličini prstenastog prostora određenog vanjskim promjerom sonde i promjerom kanala bušotine. Bitno je naglasiti kako će oblik i veličina alata uvijek biti uvjetovana jedinstvenim zahtjevima bušotine u kojoj se mjeri (Briggs, 2006).





**Slika 3-4.** Ilustrirani prikaz različite građe sondi za mjerenja na kabelu i mjerenja tijekom bušenja (Briggs, 2006)

Alat korišten za karotažu spuštanjem na kabelu je primjetno manjeg promjera, što proizlazi iz potrebe da prilikom spuštanja prođe kroz sve već zacijevljene dijelove kanala bušotine, bilo da se mjerenja provode nakon dovršetka kanala bušotine ili tijekom privremenog zaustavljanja bušenja. LWD alat dio je bušaćeg niza te mora imati robusniju građu kako bi izdržao zahtjevnije uvjete rada prilikom bušenja u odnosu na alat koji se spušta na kabelu u zacijevljenom kanalu. Ovi uvjeti obuhvaćaju visoke temperature, tlakove i mehanička naprezanja. Većeg su promjera u usporedbi s onima koji se spuštaju na kabelu, te su šuplji iznutra kao i ostatak bušaćeg niza u svrhu omogućavanja prolaska isplake kroz bušaći niz zbog čišćenja i hlađenja dlijeta te čišćenja kanala bušotine. Prstenasti prostor između alata i stijenki kanala bušotine je manji, no pomno dizajniran kako bi se osigurala neometana cirkulacija isplake i zaštita osjetljivih senzora sonde. Također imaju manji razmak između odašiljača i prijemnika, što rezultira manjom kritičnom udaljenosti. Na izgled i konstrukciju alata utjecaj imaju i specifični zahtjevi bušotine, primjerice u horizontalnim ili kosim bušotinama, gdje fleksibilnost i otpornost na savijanje utječu na veličinu i oblik alata. (Briggs, 2006).

#### 4. UVJETI RADA

Osim razlika u građi sonde, postoje znatne razlike između radnih uvjeta pri mjerenju sondom na kabelu i prilikom bušenja. Primarni utjecaj na mjerenja ima radno okruženje sonde, odnosno kanal bušotine. Alati korišteni za mjerenja izrađeni su u skladu s primijenjenim korekcijama za unaprijed poznate uvjete rada. Konstruirani su na način da se ti utjecaji na mjerenja otklone. Međutim, problemi nastaju prilikom krive primjene korekcija te ukoliko se uvjeti u bušotini znatno mijenjaju s dubinom. Osim toga, promjer bušotine bitan je uvjet za kvalitetnu zvučnu karotažu zbog optimalnog pozicioniranja sonde unutar bušotine, zbog utjecaja na putanju zvučnih valova i radi kalibracije sonde na određen promjer. Kvaliteta izrade bušotine je stoga izrazito bitna, pošto suženja ili proširenja kanala bušotine mogu poremetiti dobivene podatke. Prema prirodi mjerenja, karotaža sondom na kabelu ima znatno povoljnije radne uvjete jer se mjerenje odvija u očišćenoj bušotini, bez prisutnosti bušačkog alata. Sukladno tome, uvjeti unutar bušotine imaju znatno veći utjecaj na LWD mjerenja (Tollefsen i dr., 2007).

Bušotina i okolne stijene se konstantno mijenjaju, od početka izrade, pa sve do napuštanja bušotine. Problemi prilikom bušenja, kao što je pad tlaka u bušotini ispod pornog tlaka, izazvat će oštećenje isplačnog obloga te nestabilnost kanala bušotine. To može dovesti do urušavanja, što će uzrokovati znatno drugačije uvjete mjerenja za karotažu na kabelu, pošto će se dogoditi u zonama gdje su LWD mjerenja prethodno provedena. Suprotno tome, u slučaju previsokog bušotinskog tlaka doći će do prodora bušotinskih fluida u pribušotinsku zonu, što može dovesti do smanjenja propusnosti i zagađenja pribušotinske zone. Oba slučaja mogu imati negativne posljedice na karotažna mjerenja te dovode do odstupanja između podataka dobivenih ovim metodama.

Utjecaj na mjerenja ima i isplačni fluid, primarno zbog sastava, no taj utjecaj se smatra neizbježnim jer je specifičan sastav isplake potreban za smanjenje oštećenja okolnih formacija te izradu sigurne i učinkovite bušotine. Pri LWD mjerenjima, gustoća i temperatura isplake podliježu značajnim promjenama prilikom reakcije na dinamične uvjete bušenja. Bušač može povećati gustoću isplake kao kompenzaciju za porni tlak ili probleme sa stabilnošću kanala bušotine, dok temperatura raste prilikom svakog prestanka cirkulacije te zbog trenja pri rotaciji dlijeta. S druge strane, kod mjerenja na kabelu gustoća isplake je poprilično konstantna cijelom dubinom bušotine, dok temperatura raste prema gradijentu za koji možemo pretpostaviti da je linearan.

Načini na koji isplaka utječe na prikupljanje podataka su: gustoćom, isplačnim oblogom, kontrolom filtracije i očekivane dubine prodora filtrata isplake u pribušotinsku zonu, kemijskim sastavom te viskoznošću, koja utječe na brzinu kretanja sonde. Utjecaj filtrata isplake jednako je, ako ne i značajniji od utjecaja same isplake. Dubina prodora filtrata isplake posebno se ističe u usporedbi ovih dviju metoda. Ona ovisi o vremenu, nadtlaku unutar bušotine, propusnosti stijena i razvoju isplačnog obloga. Upravo vremenska komponenta dovodi do razlike, jer će dubina prodora iznositi tek nekoliko centimetara za karotažna mjerenja tijekom bušenja. Za mjerenja na kabelu, koja se odvijaju u pravilu nekoliko dana nakon bušenja određene dionice kanala bušotine, dubina prodora će biti znatno veća. Prodor isplake će na zvučna mjerenja utjecati na način da poveća ili smanji dubinu mjerenja, ovisno o razlici sporosti (inverzne brzine) između pornih fluida i filtrata isplake. Brzine zvučnih valova također mogu biti pod utjecajem oštećenja stijena oko kanala bušotine, što može dovesti do netočnih rezultata mjerenja. Još jedan aspekt utjecaja isplake, izrazito bitan za LWD sonde koje provode dugo vremena u isplačnom fluidu, su korozivna djelovanja na materijale od kojih je sonda izrađena. Oni moraju biti sposobni izdržati sve bušotinske uvjete pa tako i djelovanje isplake (Page & Vickers, 2011).

## **5. USPOREDBA PRIKUPLJENIH PODATAKA**

Provedene su brojne studije kojima je bio cilj usporediti kvalitetu dobivenih podataka, izmjerene brzine i učinkovitost mjerenja ovih dviju karotažnih metoda. U ovome radu navest ću dvije studije kako bi prikazao razlike te prednosti mjerenja na kabelu, odnosno mjerenja tijekom bušenja.

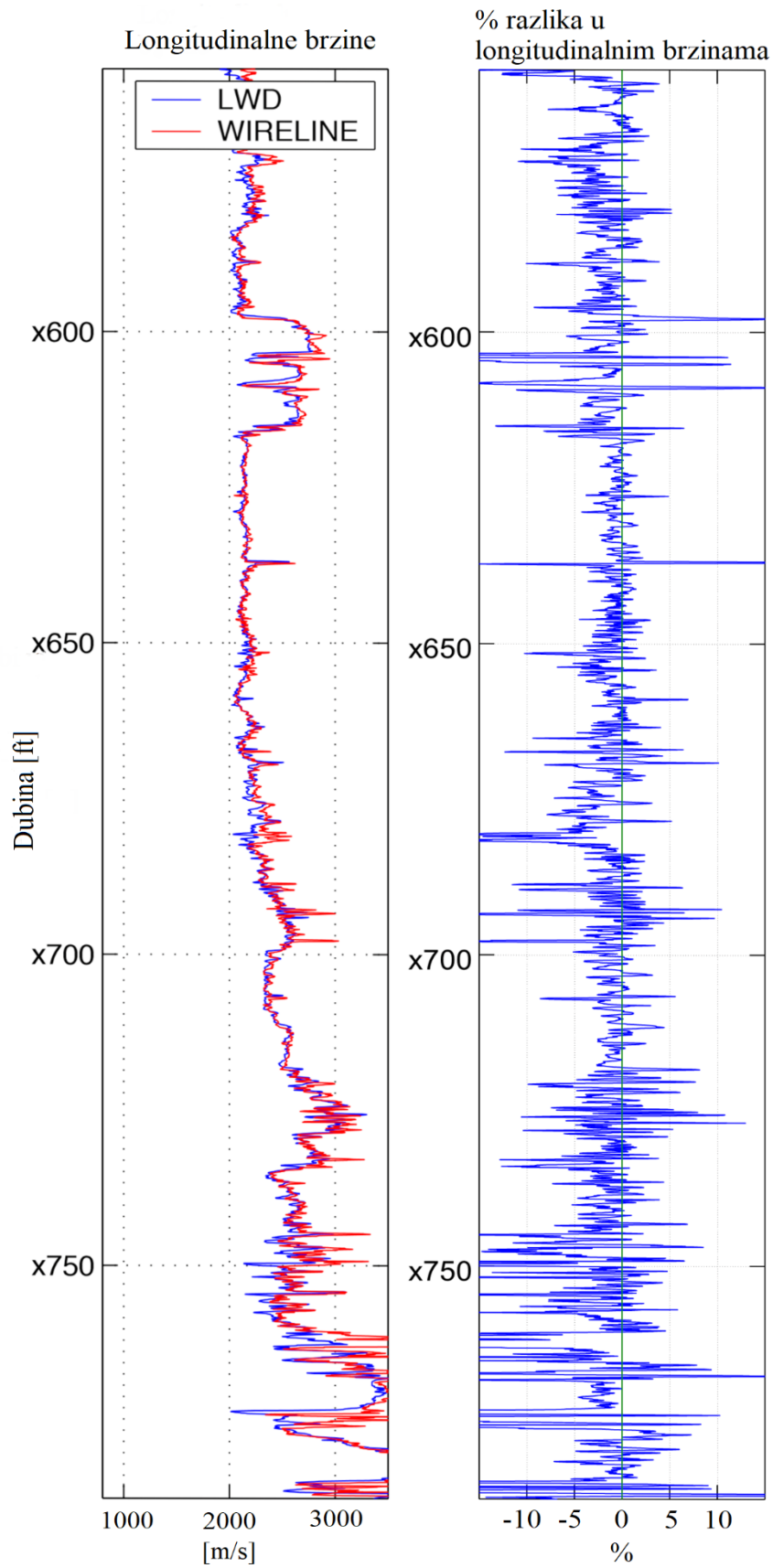
### **5.1. Usporedba izmjerenih brzina valova**

Prva studija, autora Briggs i dr. (2004), uspoređivala je brzine postignute dipolnim mjerenjima, u istoj bušotini i na istim dubinskim intervalima (Slika 5-1 i Slika 5-2). Razlika koja proizlazi iz prirode mjerenja je vrijeme mjerenja, tj. karotažna mjerenja na kabelu su provedena deset dana nakon završetka bušenja, te posljedično deset dana nakon provođenja mjerenja tijekom bušenja (LWD).

#### **5.1.1. Brzine longitudinalnih valova**

Očitavanjem dijagrama brzina longitudinalnih valova (Slika 5-1), primjećujemo da su mjerenja sondom na kabelu konstantno postizala veće brzine, od 1 - 4 % u odnosu na mjerenja tijekom bušenja. Mogu se primijetiti velika odstupanja na dijagramu razlike brzina u postotcima, do kojih dolazi zbog razlike u dubini na kojoj je mjerenje obavljeno. Odnosno, kako LWD sonde vrše mjerenja u funkciji vremena, dolazi do razlike mjerenja jer vrijeme napredovanja prilikom bušenja nije konstantno. Za razliku od mjerenja na kabelu koje se provodi izvlačenjem sonde konstantnom brzinom. Kako bi prikazali odstupanja u postotcima, vrijednosti mjerene tijekom bušenja su interpolirane u svrhu poklapanja s dubinom za mjerenja na kabelu, što objašnjava nagle poraste u odstupanju. Ovo se može zaključiti zbog toga što do sličnih odstupanja dolazi cijelom duljinom kanala bušotine. Naime, iako ovakve razlike može uzrokovati i oštećenje nabušenih stijena, te promjena zbog zadebljanja isplačnog obloga između provođenja dviju metoda mjerenja, nije vjerojatno da bi se u tom slučaju odstupanja javljala po cijeloj dubini intervala.

Oba mjerenja su također poprilično slična kao funkcija dubine, što potvrđuje da do odstupanja dolazi prilikom interpoliranja podataka (Briggs i dr., 2004).

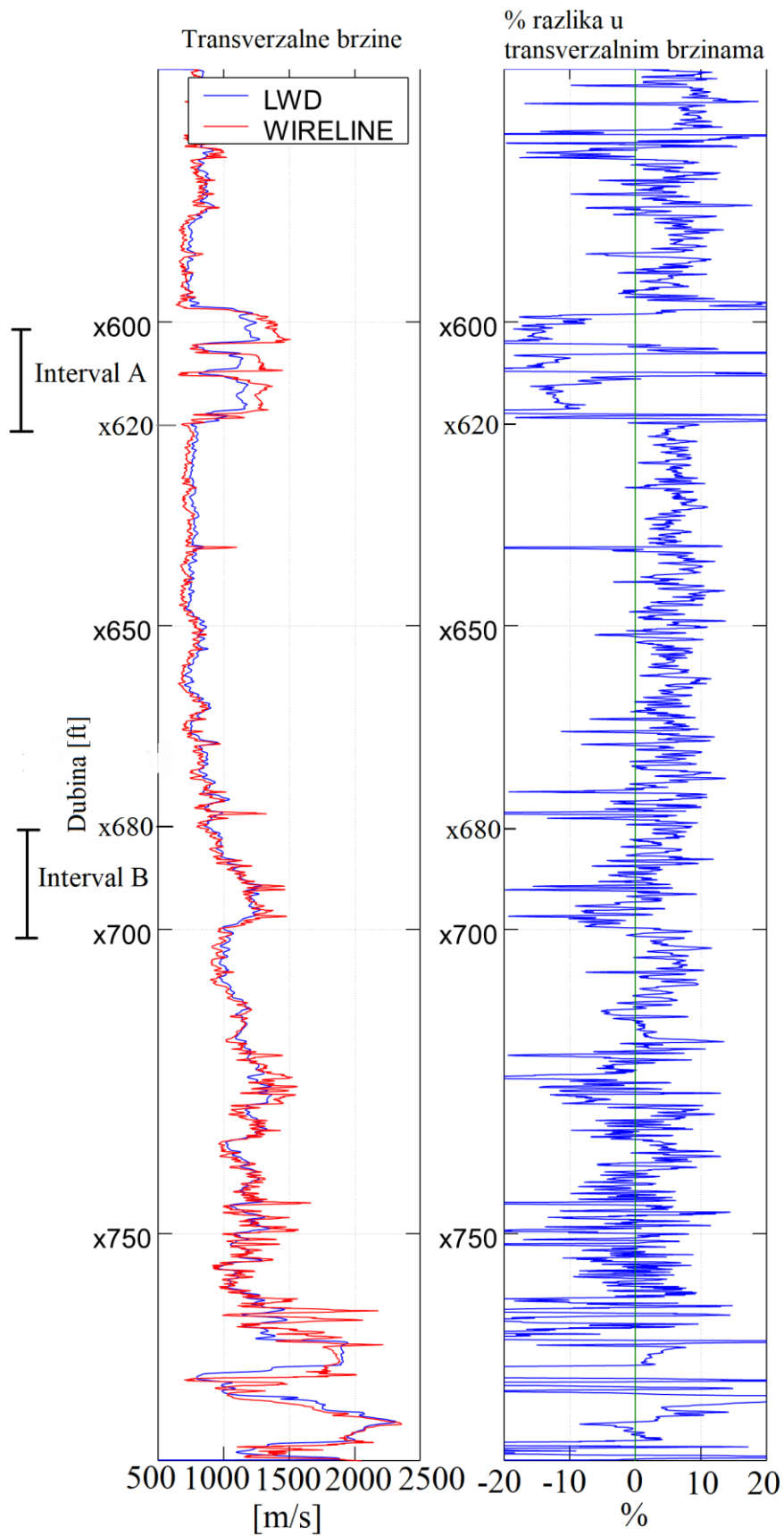


**Slika 5-1.** Dijagram brzina longitudinalnih valova za karotažna mjerenja na kabelu i tijekom bušenja, razlike mjerenih brzina u postotcima (Briggs i dr., 2004)

### 5.1.2. Brzine transverzalnih valova

Kod transverzalnih valova razlike u brzinama su izraženije, pri čemu mjerenja tijekom bušenja ostvaruju 5 – 7 % veće brzine od onih na kabelu, no razlike su ujednačene cijelom dubinom mjerenja. Do odstupanja od trenda dolazi u intervalu A (Slika 5-2). Ovdje primjećujemo kako su brzine longitudinalnih i transverzalnih valova porasle, međutim brzine transverzalnih valova kod LWD mjerenja do 15 % manje nego kod mjerenja na kabelu, što znači da je došlo do promjene u iznosu od 20 – 22 % u odnosu na ostatak mjerenog intervala. Kod ovakvih mjerenja, opće pravilo je da je opseg mjerenja sonde ovisan o razmaku između odašiljača i prijemnika (što je veća udaljenost to je veći opseg, odnosno dublje prodiranje u stijenu) te o frekvenciji odašiljača (što je veća frekvencija, manji je opseg). Podaci mjereni sondom na kabelu dobiveni su pri manjim frekvencijama odašiljača, te imaju veći opseg mjerenja u odnosu na LWD mjerenja. Kako se oštećenja stijena tijekom bušenja javljaju u neposrednoj blizini kanala bušotine, sonda za mjerenje tijekom bušenja „vidi“ oštećenu zonu u kojoj će brzina valova biti niža. S druge strane, sonda na kabelu „vidi“ netaknutu stijenu dalje od kanala bušotine, koja nije oštećena prilikom bušenja. Kao dokaz ovoga može se usporediti interval A s intervalom B (Slika 5-2). U ovom intervalu također dolazi do povećanja brzine mjerene sondom na kabelu, što ukazuje na stijene slične litologije kao u oštećenom intervalu. Međutim, dolazi i do povećanja brzine mjerene tijekom bušenja, te je odstupanje u odnosu na mjerenje na kabelu istovjetno s ostatkom bušotine (Briggs i dr., 2004).

Općenito, usporedba podataka pokazuje veliku sličnost između dobivenih vrijednosti pomoću obje metode, uz mala odstupanja u brzinama longitudinalnih i transverzalnih valova. Međutim, u stijenama podložnim oštećenju prilikom bušenja, kao što su slabo konsolidirane stijene, potrebno je uzeti u obzir postizanja manjih brzina od očekivanih sondom za mjerenje tijekom bušenja. Na ove podatke potrebno je utjecati primjenom potrebnih korekcija ili promjenom dizajna sonde za veći opseg (zahvat) mjerenja.



**Slika 5-2.** Dijagram brzina transverzalnih valova dobivenih karotažnim mjerenjem na kabelu i tijekom bušenja, razlike mjerenih brzina u postotcima (Briggs i dr., 2004)

## 5.2. Usporedba podataka iz bušotine u Meksičkom zaljevu

Studija koja je također referencirana u ovome radu, u svrhu pokazivanja kako različite vrste stijena (primarno pješčenjaci i šejlovi) utječu na dobivene podatke, provedena je u Meksičkom zaljevu, otprilike 16 kilometara od obale Louisiane. Svrha ispitivanja provedenih u ovoj bušotini bila je uspoređivanje rezultata karotažnih mjerenja na kabelu i karotažnih mjerenja tijekom bušenja, kako bi ustanovili kolika je sličnost podataka i eventualna odstupanja LWD mjerenja. Podaci su dobiveni metodom ubrzanog snimanja koristeći sondu na kabelu i LWD alate, koji su radili sa sličnim frekvencijama odašiljača.

"Dio bušotine u kojem se provodila usporedba mjerenja bušen je dljetom promjera 311,15 mm (12.25 inča), i pokriva interval dubine između 2651,76 i 3395,47 metara mjerene dubine. Bušotina je izvorno bušena do dubine od 2759,96 metara mjerene dubine koristeći isplaku na bazi vode gustoće  $1162,32 \text{ kg/m}^3$ , no prije dodavanja LWD sonde, kao isplaku se počeo koristiti NOVADRIL (sintetička isplaka). Zbog ove procedure, šejlovi i pješčenjaci u intervalu od 2651,76 do 2759,96 metara bili su izloženi isplaci na bazi vode prije mjerenja. Tijekom 6 dana rada, bušotina je produbljena do dubine od 3421,38 metara, kada je LWD sonda izvađena iz bušačeg niza. Tijekom bušenja gustoća isplake povećana je sa  $1258,18 \text{ kg/m}^3$  na  $1342,06 \text{ kg/m}^3$ . Mjerenja sondom na kabelu provedena su 7 dana nakon zadnjih mjerenja provedenih LWD sondom, u tom trenutku gustoća isplake bila je  $1449,9 \text{ kg/m}^3$ " (Boonen i dr., 1998).

Prilikom analize podataka, karotažno mjerenje je podijeljeno u više intervala, koji odgovaraju određenim vrstama stijena. Rezultati su također pokazali da bez obzira na litologiju, dolazi do pada kvalitete podataka ukoliko je promjer bušotine veći od 355,6 mm (14 inča). Također, manja kvaliteta podataka je u ispranim dijelovima kanala bušotine, kao što je interval između 2651,76 i 2759,96 metara mjerene dubine. U svim intervalima, brzine postignute mjerenjem tijekom bušenja bile su veće od brzina postignutih karotažnim mjerenjima na kabelu. Do najmanjih razlika došlo je u pješčenjacima, oko 2 do 3 %. Šejlovi su pokazali ponešto veće razlike, od 4 do 6 %. Potrebno je napomenuti kako su ovi rezultati postignuti u dijelovima bušotine s dobrim uvjetima u kanalu bušotine, dok pri oštećenjima kanala i formacije dolazi do veće razlike. Također, mogu se primijetiti povećane razlike između postignutih brzina u šejlovima i pješčenjacima koji su promijenjeni prodorom filtrata isplake, do čega je došlo između mjerenja (Boonen i dr., 1998).

Dakle, obje metode pokazuju lošije podatke u istim uvjetima, kao što su isprani dijelovi kanala bušotine ili oštećenje stijena. LWD mjerenja imaju prednost tijekom izrade kanala



bušotine, prije potencijalnih oštećenja ili prodora filtrata isplake, međutim mjerenja na kabelu pokazuju ipak nešto kvalitetnije podatke zahvaljujući povoljnim uvjetima u bušotini tijekom mjerenja. Na temelju dobivenih podataka može se zaključiti kako su podaci dobiveni karotažnim mjerenjima tijekom bušenja, općenito dovoljno slični onima dobivenim karotažom na kabelu te se ova tehnologija može smatrati dostojnom zamjenom u slučaju kada mjerenja sondom na kabelu nije moguće izvesti.

## 6. ZAKLJUČAK

Zvučna karotaža neizostavna je komponenta mjerenja koja se provode kako bi omogućili sigurno i učinkovito istraživanje i eksploataciju nafte i plina. Metode koje se koriste za provođenje zvučnih mjerenja su karotažna mjerenja sondom na kabelu i mjerenja tijekom bušenja (LWD).

Cilj ovog rada bio je opisati osnove karotažnih mjerenja sondom na kabelu i LWD mjerenja, prikazati razlike između građe alata i uvjeta mjerenja te zašto postoje razlike. Također je provedena usporedba podataka (brzina longitudinalnih i transverzalnih valova) između ovih dviju metoda u svrhu provjere kvalitete i preciznosti dobivenih podataka, a koja je pokazala mala odstupanja, uglavnom ovisna o vrsti stijena te uvjetima u i oko bušotine. Međutim, u stijenama podložnim oštećenju prilikom bušenja, kao što su slabo konsolidirane stijene, potrebno je uzeti u obzir postizanje manjih brzina od očekivanih prilikom provođenja mjerenja tijekom bušenja. Iz usporedbe možemo zaključiti da su LWD mjerenja, ukoliko su pravilno pripremljena i provedena, dostojna zamjena za karotažna mjerenja na kabelu. LWD mjerenja svoje prednosti pronalaze u prikupljanju podataka u stvarnom vremenu i omogućavanju donošenja brzih odluka. Mogućnost mjerenja bez zaustavljanja bušaćih operacija i robusna građa s kojom može svladati teške radne uvjete predstavljaju bitne prednosti u odnosu na mjerenja sondom na kabelu. S druge strane, precizna mjerenja i visoka kvaliteta prikupljenih podataka, kao i znatno dulji niz godina razvoja i usavršavanja tehnologija, omogućila su da karotaža sondom na kabelu i danas bude relevantna i neizostavna metoda za izvođenje bušotinskih mjerenja.

U konačnici, izbor između mjerenja sondom na kabelu i LWD metode ovisi o specifičnim zahtjevima bušotine, te tehničkim i ekonomskim faktorima, a njihova komplementarna upotreba ima svoje mjesto u današnjoj industriji nafte i plina.

## 7. LITERATURA

1. BOONEN, P., BEAN, C., TEPPER, R., DEADY, R., 1998. *Important Implications from a Comparison of LWD and Wireline Acoustic Data from a Gulf of Mexico Well*. In SPWLA Annual Logging Symposium (pp. SPWLA-1998). SPWLA.
2. BRIGGS, V., RAO, R.V., GRANDI, S.K., BURNS, D.R., CHI, S., 2004. *A comparison of LWD and wireline dipole sonic data*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory.
3. BRIGGS, V.A., 2006. *A comparison of logging while drilling (LWD) and wireline acoustic measurements*. Doktorska disertacija. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
4. GONCALVES BASTOS, A.R., 2013. *Logging While Drilling versus conventional WireLine – Comparison*. Studija. Lisabon: Universidade de Lisboa
5. KINOSHITA, T., DUMONT, A., HORI, H., SAKIYAMA, N., MORLEY, J., GARCIA-OSUNA, F., 2010. *LWD sonic tool design for high-quality logs*. In SEG International Exposition and Annual Meeting (pp. SEG-2010). SEG.
6. OREŠKOVIĆ, J. 2017. *Bušotinska karotaža, interna skripta*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
7. PAGE, G., VICKERS, S., 2011. *The petrophysics of drilling fluids and their effects on log data*. *Petrophysics*, 52(05), 369-380.
8. TOLLEFSEN, E., WEBER, A., KRAMER, A., SIRKIN, G., HARTMAN, D., GRANT, L., 2007. *Logging while drilling measurements: from correlation to evaluation*. In SPE International Oil Conference and Exhibition in Mexico (pp. SPE-108534). SPE.

### WEB IZVORI:

9. GEOLOGIST SKILLS: Formation Evaluation and Objectives, 2020.  
URL: <https://www.geo-skill.com/2020/> (9.7.2024.)

## **IZJAVA**

*Izjavlujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na  
Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*



---

Filip Špehar



KLASA: 602-01/24-01/48  
URBROJ: 251-70-12-24-2  
U Zagrebu, 03. 09. 2024.

Filip Špehar, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/48, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 22.03.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### USPOREDBA ZVUČNIH KAROTAŽNIH MJERENJA SONDOM NA KABELU I TIJEKOM BUŠENJA

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof. dr. sc. Jasna Orešković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

Prof. dr. sc. Jasna Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina  
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)