

# Radioaktivna karotažna mjerenja sondom na žici i tijekom bušenja (LWD)

---

Jandrić, Dennis

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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:169:125892>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-05**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**RADIOAKTIVNA KAROTAŽNA MJERENJA SONDOM NA ŽICI I TIJEKOM  
BUŠENJA (LWD)**

Završni rad

Dennis Jandrić

N4255

Zagreb, 2021.

RADIOAKTIVNA KAROTAŽNA MJERENJA SONDOM NA ŽICI I TIJEKOM  
BUŠENJA (LWD)

DENNIS JANDRIĆ

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Karotažna mjerenja služe za mjerenje fizikalnih svojstava stijene koju se buši i fluida koji se nalaze u porama stijene. U pravilu postoje dva načina izvođenja karotažnih mjerenja, a to su mjerenje pomoću opreme spuštene na žici ili mjerenjem za vrijeme bušenja. Značajne su razlike između ovih metoda počevši od uvjeta u kojima se primjenjuju, te samog izgleda opreme i prijenosa podataka na površinu. Radioaktivna karotažna mjerenja se temelje na mjerenju ili prirodne radioaktivnosti stijena ili pobuđene radioaktivnosti, kao što su karotaža gustoće i neutronska. Glavne razlike karotaže tijekom bušenja i sondom na žici su u izvedbi mjerenja, kao što je kontakt sonde s stijenom u bušotini prilikom mjerenja. S obzirom na to je i kvaliteta podataka drugačija, no karotaža tijekom bušenja daje podatke u realnom vremenu.

Ključne riječi: : Radioaktivna mjerenja u bušotini, karotaža tijekom bušenja, karotaža sondom na žici

Završni rad sadrži: 20 stranica, 9 slika i 6 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF

Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF

Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 17. rujna 2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS KRATICA.....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. VRSTE KAROTAŽNIH MJERENJA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Karotaža spuštanjem sonde na žici.....	5
2.2. Karotaža tijekom bušenja (LWD).....	7
<b>3. RAZLIKE IZMEĐU KLASIČNIH KAROTAŽNIH MJERENJA I MJERENJA TIJEKOM BUŠENJA.....</b>	<b>9</b>
3.1. Razlike u izgledu opreme.....	9
3.2. Izvođenje mjerenja.....	10
<b>4. PRIJENOS PODATAKA NA POVRŠINU.....</b>	<b>11</b>
4.1. Karotaža tijekom bušenja.....	11
4.2. Klasično karotažno mjerenje sondom na žici.....	15
<b>5. RADIOAKTIVNA KAROTAŽNA MJERENJA.....</b>	<b>16</b>
5.1. Primjena radioaktivnih karotažnih metoda.....	16
5.2. Sonde za radioaktivnu karotažu.....	17
5.3. Usporedba radioaktivne karotaže prilikom mjerenja na žici i mjerenja tijekom bušenja...20	
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>22</b>
<b>7. LITERATURA.....</b>	<b>23</b>

## **POPIS SLIKA**

<b>Slika 1-1.</b> Prvi zapis karotažnih mjerenja.....	2
<b>Slika 2-1.</b> Prikaz karotažne opreme kod mjerenja žicom i kod mjerenja bušenjem.....	3
<b>Slika 2-2.</b> Niz podzemne opreme za mjerenja na žici.....	5
<b>Slika 2-3.</b> Shematski prikaz obavljanja mjerenja na žici.....	5
<b>Slika 2-4.</b> Niz podzemne opreme kod karotaže tijekom bušenja.....	6
<b>Slika 4-1.</b> Shematski prikaz telemetrijskog pulsa.....	10
<b>Slika 4-2.</b> Shematski prikaz prijenosa podataka na površinu.....	11
<b>Slika 5-1.</b> Sonda za mjerenje otpornosti i prirodne radioaktivnosti.....	15
<b>Slika 5-2.</b> Sonda za mjerenje prirodne radioaktivnosti za vrijeme bušenja.....	17

## **POPIS KRATICA**

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

BHA – sklop alatki dna bušotine (engl. *Bottom hole assembly*)

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

RSS – rotirajući upravljivi sustavi (engl. *Rotary steering system*)

SCADA – računalni sustav za nadzor, mjerenje i upravljanje (engl. *Supervisory control and data acquisition*)

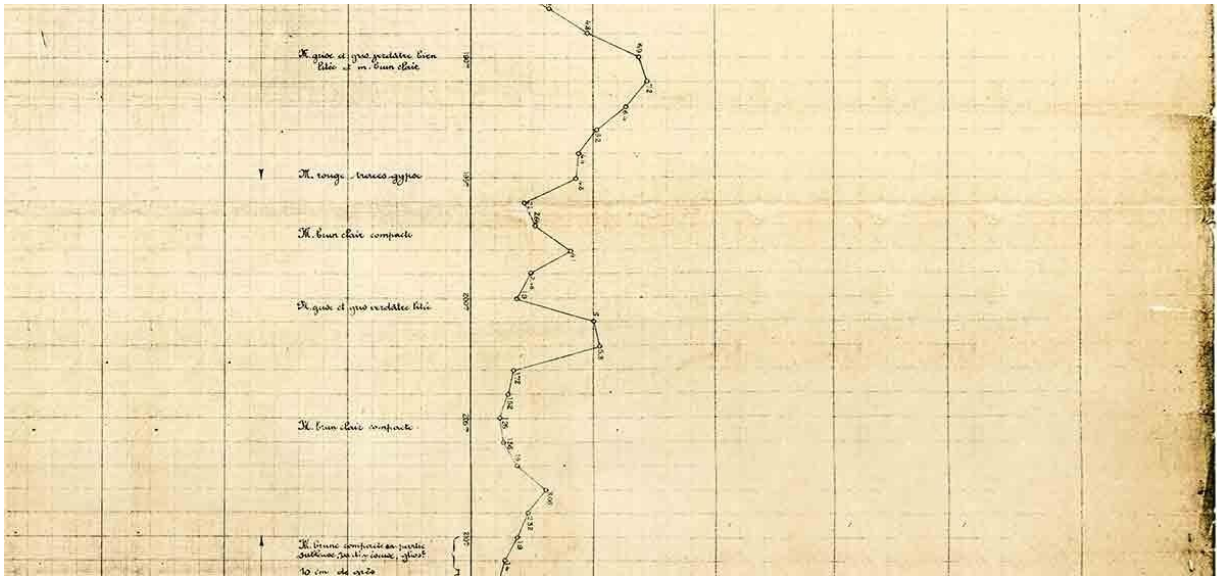
API – američki institut za naftu (engl. *American Petroleum Institute*)

TAP – alatka za mjerenje temperature, ubrzanja i tlaka (engl. *Temperature, acceleration and pressure probe*)

ASCII – američki standardni znakovnik za razmjenu informacija (engl. *American Standard Code for Information Interchange*)

## 1. UVOD

Karotaža dolazi od francuske riječi Carottage, koja podrazumijeva izvlačenje jezgre pomoću sonde tj. od izraza “Carottage Électrique” jer su prva mjerenja u Francuskoj 1927. bila električna. Izveli su ih braća Schlumberger i Henri G. Doll. Koristili su četiri elektrode pomoću kojih su izmjerili električnu otpornost u bušotini sondom spuštrenom na žici, s dubinskim razmacima od 1 metra. Spuštanjem sonde u bušotinu u Alsaceu, 5. rujna 1927. godine, nastao je prvi zapis (slika 1-1.) geofizičkog mjerenja koje danas zovemo karotaža. Nakon toga počinje nagla komercijalizacija mjerenja u bušotini. Od tada do danas su oprema i metode znatno napredovale jer osim električne metode koja je prva primijenjena, danas se koriste i radioaktivne, akustične i elektromagnetske metode. Samo mjerenje izvode se spuštanjem sonde u bušotinu, to jest najčešće prilikom podizanja sonde iz bušotine tako da se fizikalna veličina koju mjerimo bilježi kontinuirano duž cijelog kanala bušotine, a rezultati se prikazuju dijagramom. Sonde koje se koriste za ovakva ispitivanja sadrže senzore koji mogu pružiti informacije o fizičkim parametrima stijene u okolini bušotine, stupcu fluida u kanalu bušotine i parametrima protoka u bušotini te donekle o svojstvima i stanju pojedinih elemenata bušotine poput zaštitnih cijevi i cementnog kamena. Karotažna mjerenja se mogu odvijati tijekom različitih faza radnog vijeka bušotine; od bušenja, istraživanja, opremanja, proizvodnje i napuštanja, ali se u principu razlikuje karotaža prilikom bušenja (engl. *Logging while Drilling, LWD*), kojom se dobivaju podaci u stvarnom vremenu, od karotaže nakon bušenja. S obzirom da u bušotini vladaju različiti uvjeti tijekom različitih aktivnosti i faza radnog vijeka bušotine, tako će se i primijenjena oprema i metode razlikovati. Cilj završnog rada je usporediti radioaktivne metode za ova dva načina karotažnih mjerenja, njihove glavne razlike s obzirom na konstrukciju opreme i uvjete mjerenja, te kvalitetu podataka jer su podaci mjereni tijekom bušenja često slabije kvalitete nego podaci dobiveni klasičnim načinom karotažnih mjerenja.



**Slika 1-1.** Prvi zapis karotažnih mjerenja (Schlumberger, 1927)

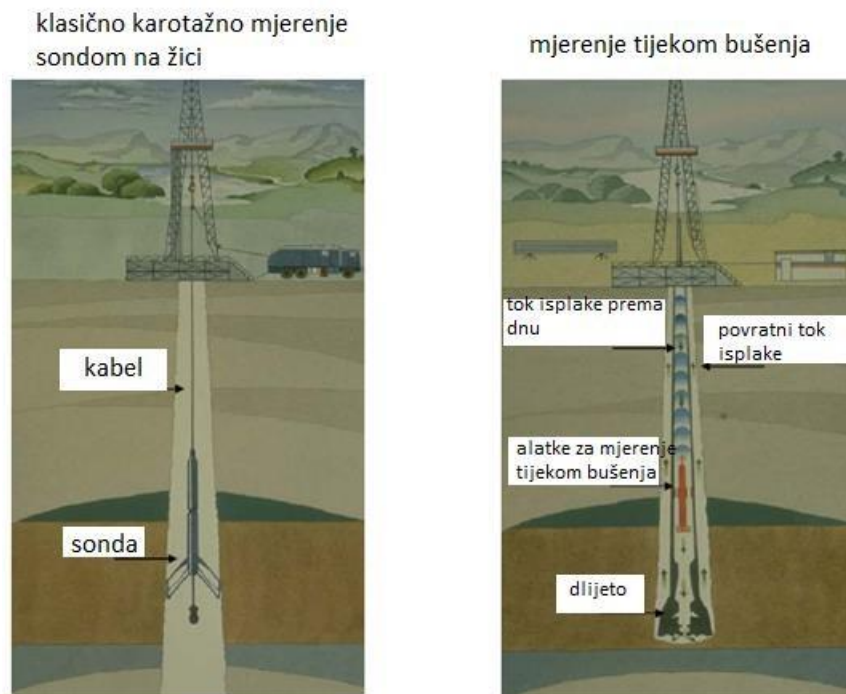


## 2. VRSTE KAROTAŽNIH MJERENJA

Prije početka samog bušenja, potrebno je odrediti koju vrstu podataka se želi izmjeriti i odrediti način na koji će se ti geološki i geofizički podatci prikupiti; sondom spuštrenom na žici ili tijekom bušenja.

Kao što je prikazano (slika 2-1.) kod žice se koristi električni kabelski sustav koji spušta sondu ili mjerne uređaje u bušotinu, a zatim oni u bušotini prikupljaju podatke i prenose ih operaterima na površini. Takav način mjerenja ima veću gustoću podataka po jedinici debljine sloja radi telemetrijskih uređaja. Alternativa mjerenju na žici je mjerenje tijekom bušenja koje omogućuje prikupljanje podataka u stvarnom vremenu. Alati za LWD sastavljeni su od sklopa alatki na dnu (engl. *Bottom hole assembly, BHA*), zajedno s opremom mjerenja tijekom bušenja (engl. *Measurement While Drilling, MWD*), rotirajućeg upravljivog sustava (engl. *Rotary Steerable System, RSS*) i druge opreme. LWD ima mnoge prednosti nad klasičnim karotažnim mjerenjem jer su sustavi veći, a time i robusniji. Podatci se mogu skupljati bez prekida bušenja, nema problema s trajektorijom bušotine i sveukupno štede dosta vremena i resursa. Najpovoljnije je vrijeme za određivanje svojstava stijena neposredno nakon završetka bušotine, kada je formacija izložena otvorenom kanalu bušotine. Određivanje svojstava stijena izvodi se koristeći alatke za mjerenje u otvorenom kanalu bušotine. U nekim slučajevima koristi se LWD, posebno kod bušotina koje imaju kompleksan profil i trajektoriju pa se mjerni instrumenti uključuju kao dio bušaće opreme. Bušači obično stabiliziraju bušotinu ugradnjom zaštitnih cijevi i njihovom naknadnom cementacijom, ali metal koji zaštitne cijevi sadrže može dovesti do interferencije s mnogim mjernim uređajima i time do smanjenja učinkovitosti mjerenja. Napretkom tehnologije povećana je mogućnost mjerenja svojstava stijena u zacijevljenom kanalu bušotine te čak i lociranje fluida koji se nalazi iza zaštitnih cijevi korištenjem metoda mjerenja u zacijevljenim kanalima bušotine. Također, mnogi od tih uređaja mjere protok fluida i druge proizvodne parametre u bušotini ili ispituju povezanost cementnog kamena sa zaštitnim cijevima i stijenkama kanala bušotine.

Prvi zadatak prilikom mjerenja je određivanje položaja ležišta ugljikovodika. Nakon toga se provjerava, ima li dovoljno resursa da završavanje bušotine te da li privođenje proizvodnji bušotine ima ekonomskog smisla. Karotažna mjerenja ukazuju na osnovna svojstva poroznosti dijela stijene koji je zasićen fluidima, zasićenja vodom, naftom i plinom te vertikalni opseg proizvodne zone ugljikovodika.

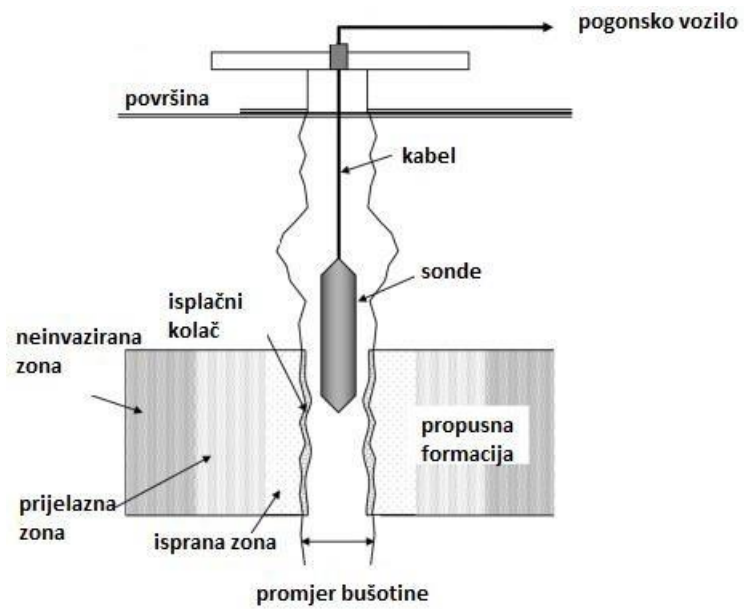


**Slika 2-1.** Prikaz karotažne opreme kod mjerenja žicom i mjerenja tijekom bušenja ([www.geo-skill.com](http://www.geo-skill.com), 2020)

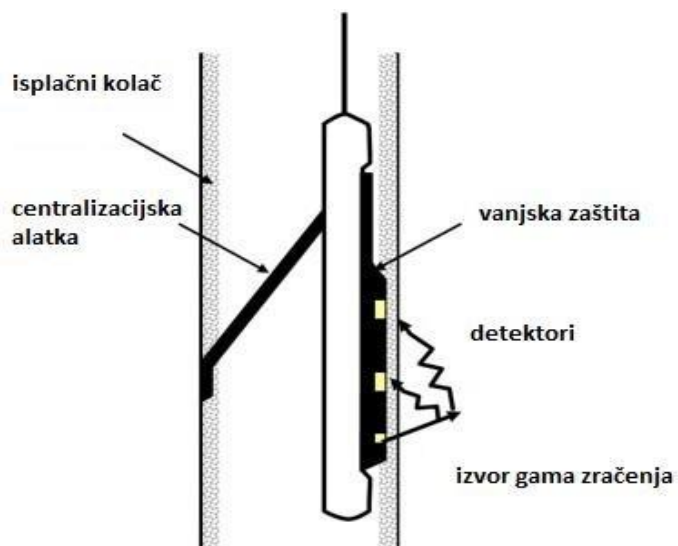
## 2.1. Karotaža spuštanjem sonde na žici

Mjerenje sondom spuštenom na žici ili klasična karotaža može se definirati kao prikupljanje i analiza geofizičkih podataka kao funkcija dubine u bušotini, kada je izbušena konačna dubina bušotine. Izvode se kontinuirana mjerenja svojstava stijena koja se mogu povezati s petrofizikalnim svojstvima radi donošenja odluka o daljnjim radnjama vezanim uz bušenje i pridobivanje ugljikovodika. Mjerenja obično uključuju električna svojstva poput otpornosti i vodljivosti, gustoću, brzinu rasprostiranja zvučnih valova, prirodnu radioaktivnost, temperaturu, tlak i mjerenje dimenzija kanala bušotine te uzorkovanje fluida. Postupak se izvodi spuštanjem instrumenta, sonde, ili niza od više sondi na žici u bušotinu i bilježenjem fizikalnih svojstava pomoću raznih senzora. Ova metoda koristi iznimno sofisticiranu opremu koja je neovisna o bušaćim alatima. Mjerenja opremom na žici primarno se koriste u otvorenom kanalu bušotine, međutim, postoje instrumentikoj koji mogu pravilno i uspješno raditi i u zacijevljenom kanalu bušotine. Ukoliko se radi o bušotinama kopnu, koristi se vozilo, odnosno kamion, koji sadrži svu opremu potrebnu za prikupljanje električnih impulsa koji se prenose kroz kabel, koji također služi i za održavanje težine samog alata u bušotini. U bušotinama na moru se koristi ista oprema postavljena u maloj kabini u blizini platforme.

Za uspješno izvođenje mjerenja potrebno je pripremiti bušotinu i ukloniti svu bušaću opremu. Tada se sonda spaja na kabel (slika 2-2) i postavlja na maksimalnu dubinu bušotine te se snima prilikom izvlačenja sonde na površinu. Mjerenje se vrši prilikom izvlačenja (slika 2-3), da se ostvari konstantna napetost kabela ili žice radi korelacije dubine. Iznimka su određeni uvjeti u bušotini gdje je temperatura toliko visoka da uređaj možda neće izdržati spuštanje na dno. U tom slučaju mjerenja se vrše prilikom spuštanja i ako je moguće ponavljaju prilikom dizanja. Većina mjerenja vrši se kontinuirano dok se sonda kreće, iako određeni alati za uzorkovanje tekućine i mjerenje tlaka zahtijevaju zaustavljanje sonde. Kabel ili žica namataju se ili odmataju s vitla koje koristi pogonski motor vozila i to brzinama od 300 do 1800 metara na sat, ovisno o mjerenju koje se izvodi (Goncalves Bastos, 2013.).



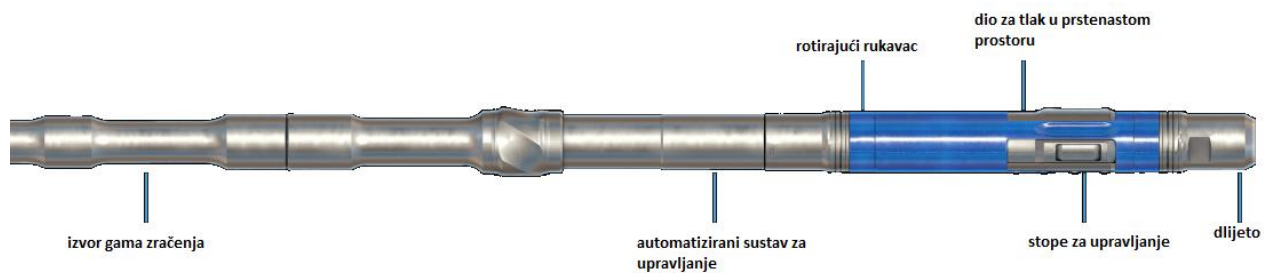
Slika 2-2. Niz podzemne opreme za mjerenja na žici ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2016)



Slika 2-3. Shematski prikaz obavljanja mjerenja na žici ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2019)

## 2.2. Karotaža tijekom bušenja (LWD)

Karotaža tijekom bušenja (engl. *Logging while Drilling, LWD*) dodatak je mjerenjima kod bušenja (MWD). Koristi se za prikupljanje podataka u kanalu bušotine za vrijeme bušenja, bez potrebe za uklanjanjem bušaćih alatki. Karotaža tijekom bušenja pruža slične mogućnosti kao i klasična karotažna mjerenja (na kabelu), ali postoje razlike u kvaliteti podataka, razlučivosti i pokrivenosti mjerenjem. LWD-mjerenje koristi velike uređaje (slika 2-4) i u pravilu se najbitnije sonde postavljaju najbliže dlijetu. LWD uređaji mogu prolaziti bilo gdje, gdje može i dlijeto i samim time su značajno učinkovitije u horizontalnim bušotinama produženog bočnog dosega. Podaci se na površinu šalju pomoću impulsa ili signala kroz isplaku iz uređaja postavljenih na bušaću alatku. Komunikacija instrumentima na površini je jako spora i iznosi 1 do 2 bita informacija po sekundi. Sonde za mjerenje tijekom bušenja (LWD) imaju slične principe mjerenja kao i klasične sonde, no mjerenje se izvodi prema dolje (kako se bušotina produbljuje), a ne prema gore od dna kao što je to slučaj kod karotaže na žici. LWD sonde opremljene su vlastitim izvorom energije, a mjerenja se mogu kontinuirano provoditi i bilježiti u memoriju kao funkcija vremena ili prenositi na površinu u stvarnom vremenu putem impulsa tlaka kroz stupac isplake. U ovoj metodi između sonde i procesorske jedinice nema električnih kablova već se na površini impulsi dekodiraju i pretvaraju u podatke istovrsne onima kod karotažnih mjerenja sondom na žici.



**Slika 2-4.** Niz podzemne opreme kod karotaže tijekom bušenja ([www.scientificdrilling.com](http://www.scientificdrilling.com), 2019)

### **3. RAZLIKE IZMEĐU KLASIČNIH KAROTAŽNIH MJERENJA I MJERENJA TIJEKOM BUŠENJA**

Razlike među karotažnim metodama velike su i odnose se ponajprije na vrijeme izvođenja mjerenja. Kod opreme na žici postupak mjerenja izvodi se nakon postizanja željene dubine kanala bušotine i uz mogućnost mjerenja u zacijevljenom ili nezacijevljenom kanalu, dok se mjerenja za vrijeme bušenja izvode na onoj dubini do koje je u tom trenutku izbušen kanal bušotine. S obzirom na to da se mjerenja izvode u različitim uvjetima, tako će i oprema koja se koristi biti drastično drugačija, pa će se za vrijeme bušenja koristiti oprema veće mase i dimenzija. Navedeno utječe na način izvođenja mjerenja te interpretaciju rezultata.

#### **3.1. Razlike u izgledu opreme**

Iako obje metode vrše mjerenja istih parametara, način na koji se to odvija se uvelike razlikuje (Briggs, 2006). Najočitija je razlika u veličini uređaja za mjerenje jer se karotaža tijekom bušenja izvodi opremom integriranom u dubinski bušaći sklop koji sadrži teške šipke i stabilizatore. Uloga stabilizatora prilikom karotaže je centralizacija alatki unutar kanala bušotine, što se posebno zahtjeva tijekom mjerenja zvučnim valovima ili mjerenjima električne otpornosti. Sonde na žici također često imaju centralizatore, ali također i opruge koje prislanjaju sondu uz zida kanala bušotine prilikom nekih mjerenja kao što su neutronska karotaža, karotaža gustoće, te mikrosonde. Za razliku od uređaja za mjerenje na žici gdje je oprema malih dimenzija, lagana i delikatna za korištenje, alatke za mjerenje tijekom bušenja su velike, teške i robusne i samim time mogu se koristiti i u složenijim uvjetima. Senzori LWD-uređaja su postavljeni tako da mogu vršiti mjerenja neometano tijekom bušenja, a sva elektronika i baterije smještene su unutar kućišta tako da isplaka ne može doprijeti do njih niti pri visokim dobavama. Za razliku od toga sonde za klasičnu karotažu na žici svoju energiju dobivaju kroz kabel.

### 3.2. Izvođenje mjerenja

Najveću razliku u izvođenju mjerenja čini vrijeme izvođenja, što u naftnoj industriji, gdje najam postrojenja ponekad prelazi i pola milijuna dolara na dan, predstavlja značajan trošak. U tom slučaju su postrojenja s opremom na žici u prednosti jer se komunikacija izvodi pri puno većim brzinama koje omogućuju prijenos višestruko većih količina podataka u jedinici vremena od LWD-mjerenja. No, prednost dobivanja podataka u stvarnom vremenu prilikom LWD-mjerenja omogućava donošenje odluka koje olakšavaju pravilno smještanje bušotine u podzemlju, čineći ih sigurnijima i učinkovitijima. Također, LWD-alatke se koriste u uvjetima gdje oprema na žici teško može doprijeti, poput zakrivljenih bušotina te bušotina kojima prijete opasnost od pojave nestabilnosti stijenki kanala bušotine (Mauborgne et al., 2017) Zbog svoje osjetljivosti je oprema na žici često neprimjenjiva je u okruženjima u kojima vladaju teži uvjeti. Za gotovo svako mjerenje koje se izvodi opremom na žici postoji ekvivalentna LWD- alatka, osim za bočno jezgrovanje i uzorkovanje fluida.

Značajna razlika je vrijeme prikupljanja podataka jer se kod klasične karotaže podaci dobivaju mjerenjem 2 do 10 dana nakon bušenja dok se prilikom mjerenja tijekom bušenja podaci dobivaju najkasnije nekoliko sati nakon bušenja. Povećanjem vremena nakon bušenja nastaje veća debljina isplačnog kolača, povećava se infiltrirana zona i veća je mogućnost oštećenja stijenki kanala bušotine. Također pukotine i proširenja neće biti maksimalnog promjera i vjerojatno će biti zamaskirane isplačnim kolačem.



## 4. PRIJENOS PODATAKA NA POVRŠINU

### 4.1. Karotaža tijekom bušenja

Prijenos podataka impulsom tlaka kroz isplaku (engl. *mud-pulse telemetry*) je najčešća metoda prijenosa podataka koja se koristi prilikom mjerenja za vrijeme bušenja (slika 4-1.). Postoji nekoliko načina za generiranje tlačnog impulsa isplake od kojih je najjednostavnije korištenje čepova ili ventila koji izbacuje isplaku u prstenasti prostor. U bušotini, ventil je postavljen tako da ograniči protok isplake prema informacijama koje se prenose. To stvara pulzacije u protoku koje predstavljaju informaciju. Fluktacije tlaka unutar bušačkog fluida se šire prema površini gdje ih registriraju senzori tlaka. Računalo na površini obrađuje primljene signale i rekonstruira informacije. Tehnologija je izvediva na tri načina koje čine pozitivni, negativni i kontinuirani puls.

#### *Pozitivni puls*

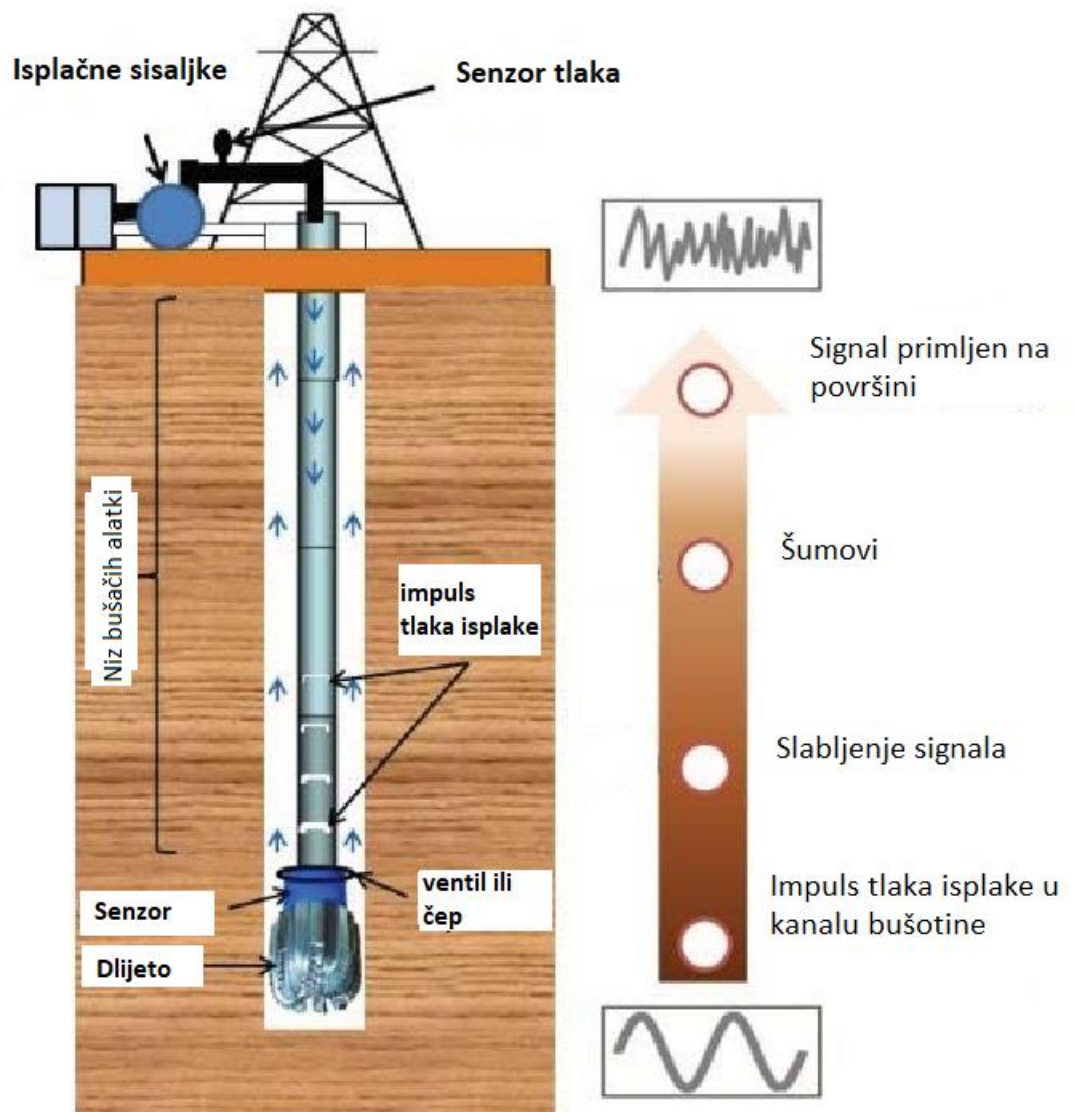
Uređaji koji funkcioniraju na principu pozitivnog pulsa kratko zatvore i otvore ventil da ograniče protok isplake unutar cijevne alatke. To dovodi do povećanja tlaka koji se registrira na površini.

#### *Negativni puls*

Uređaji na principu negativnog pulsa kratko otvore i zatvore ventil radi ispuštanja isplake iz cijevi u prstenasti prostor, što uzrokuje smanjenje tlaka. Digitalna informacija može se pretvoriti u oblik tlačnog signala.

#### *Kontinuirani val*

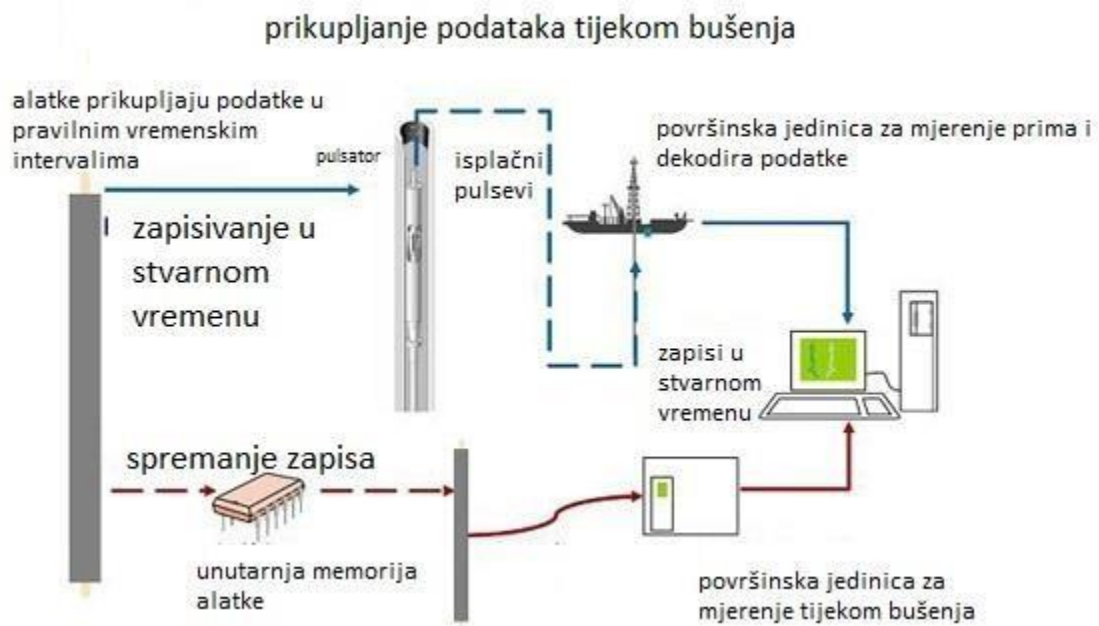
Uređaji s kontinuiranim valom postepeno zatvaraju i otvaraju ventil da se stvore periodičke tlačne promjene unutar bušačkog fluida. Naprednije metode uključuju takozvanu isplačnu sirenu kod koje se rotor okreće i naizmjenično propušta ili blokira protok isplake preko statora što generira kontinuirani val. Vrtanja rotora može se mijenjati ili biti diskontinuirana što uzrokuje fazni pomak u sinusoidalnom valu.



**Slika 4-1.** Shematski prikaz telemetrije tlačnim impulsom isplake ([www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org), 2020)

Fazni pomak se mjeri i prevodi, odnosno dekodira u bitove. Brzina telemetrije s kontinuiranim pulsničkim valom može iznositi do 24 bita po sekundi iako je standardno 6 bita po sekundi. Druge dvije metode obično dosežu maksimum od 1 ili 2 bita po sekundi. Najčešći oblik slanja podataka prema površini radi na principu generiranja tlačnih pulzacija u stupcu isplake koja se protiskuje kroz niz (slika 4-1). S obzirom na to da se cijeli bušački niz rotira pri brzinama većim

od 60 okretaja u minuti dok se kroz niz protiskuju velike količine erozivnog bušaćeg fluida, nemoguće je povezati konvencionalnu opremu na žici s LWD alatima. Iz tog se razloga podaci koji se mjere tijekom bušenja šalju preko modulatora (slika 4-2.) ili sustava pulzacija na površinu. Postoji nekoliko načina za generiranje isplačnog pulsa od kojih je najjednostavnije korištenje čepova ili ventila koji izbacuje isplaku u prstenasti prostor. Naprednije metode uključuju takozvanu isplačnu sirenu kod koje se rotor okreće i naizmjenično propušta ili blokira protok isplake preko statora, što generira kontinuirani val. Stopa vrtnje rotora može se mijenjati ili biti diskontinuirana, što uzrokuje fazni pomak u sinusoidalnom valu. Fazni pomak mjeri se i prevodi, odnosno dekodira u bitove. Brzine telemetrije s kontinuiranim pulsni valom mogu iznositi do 24 bita po sekundi, iako je standardno 6 bita po sekundi. Druge dvije metode obično dosežu maksimum od 1 ili 2 bita po sekundi. Impulsni signali se registriraju pretvaračima tlaka za sva mjerenja koja se izvode i na površini se dekodiraju u bitove koji se raščlanjuju na pojedinačna mjerenja. Na primjer, mjerenja poput prirodne radioaktivnosti mogu zauzeti 8 bitova, dok tlačna mjerenja mogu zauzeti 16 bitova (Mauborgne et al, 2017). Ako uzmemo u obzir da se u svakom trenutku može izvoditi 20 različitih mjerenja koja se šalju prema površini, a maksimalna brzina iznosi 6 bita po sekundi, jasno se vidi da ne možemo dobiti veliku gustoću podataka za sva mjerenja. No, gotovo svi podaci se bilježe i u internoj memoriji pri velikim brzinama prijenosa. Dakle, čak i ako ne možemo poslati sve podatke u stvarnom vremenu, oni se i dalje bilježe te se mogu pogledati nakon što se alatke izvade na površinu. Stoga se LWD postupci usredotočuju na podatke bitne za monitoring, bušenje i podatke o potencijalnom ležištu.



**Slika 4-2.** Shematski prikaz prijenosa podataka na površinu  
([www.diavatly.com](http://www.diavatly.com), 2019)

#### 4.2. Klasično karotažno mjerenje sondom na žici

U slučaju klasičnih karotažnih sondi, podaci se na površinu prenose se preko električnog kabla. Kod konvencionalne karotaže podaci za svaki ciklus bilježe se i pohranjuju digitalno te se prate ustvarnom vremenu. Mjerenja se izvode i bilježe prilikom spuštanja i dizanja alatki kroz bušotinu. Mjerenja prilikom spuštanja sonde koriste se samo kao kontrola osim u slučaju kad očekujemo da mjerna oprema neće izdržati uvjete u bušotini dovoljno dugo da se uspije ponovno izvaditi. Osim toga, prilikom spuštanja poluge i papuče se pri prolasku trebaju zatvoriti, tada sonde nisu idealno postavljene unutar kanala bušotine za obavljanje mjerenja, što uzrokuje smanjenu kvalitetu podataka. Niz sondi se izvlači konstantnom brzinom da bi se omogućilo kontinuirano mjerenje nekoliko svojstava istovremeno u funkciji dubine. Uređaj TAP (engl. *temperature/acceleration/pressure tool*) je postavljen kao nezavisna alatka za snimanje. Na kraju mjerenja se radi osnovna obrada podataka. Kvaliteta podataka može biti znatno manja u pretjerano proširenim dionicama kanala bušotine ili pri naglim promjenama promjera kanala bušotine. Ako je kanal bušotine nepravilan i širok, mogu postojati problemi s sondama koje zahtijevaju kontakt sa stijenkom kanala bušotine, poput mjerenja gustoće i poroznosti. Mjerenja električne otpornosti i mjerenja pomoću brzine zvučnih valova su pod najmanjim utjecajem bušotinskih faktora.

## 5. RADIOAKTIVNA KAROTAŽNA MJERENJA

Radioaktivna karotaža se temelji na mjerenju prirodne ili izazvane radioaktivnosti. Gama karotaža i spektralna gama karotaža metode su mjerenja prirodnog gama zračenja radi lakše karakterizacije stijena u bušotini. Različite vrste stijena emitiraju različite količine prirodnog gama zračenja s različitim energetske spektrima. Radioaktivnost stijena koristi se dugi niz godina za pomoć pri definiranju litološkog sastava. Prirodni radioaktivni materijali uključuju elemente poput uranija, torija, kalija, radona i radija i obično su sadržani unutar nekih minerala. Primarni radioaktivni izotopi u stijenama jesu kalij-40 i izotopi povezani s raspadom uranija i torija. Obično ne postoji temeljna poveznica između vrste stijena i izmjerenog intenziteta gama zraka, ali postoji snažna korelacija između sadržaja radioaktivnih izotopa i mineralogije.

Pored mjerenja prirodne radioaktivnosti koriste se i metode pobuđene radioaktivnost, pri čemu se stijenu bombardira gama-zrakama ili brzim neutronima, te se mjeri njihovo prigušenje prolaskom kroz stijenu. Obzirom na izvor pobuđene radioaktivnosti razlikuje se gama-gama karotaža, odnosno karotaža gustoće, i neutronska karotaža.

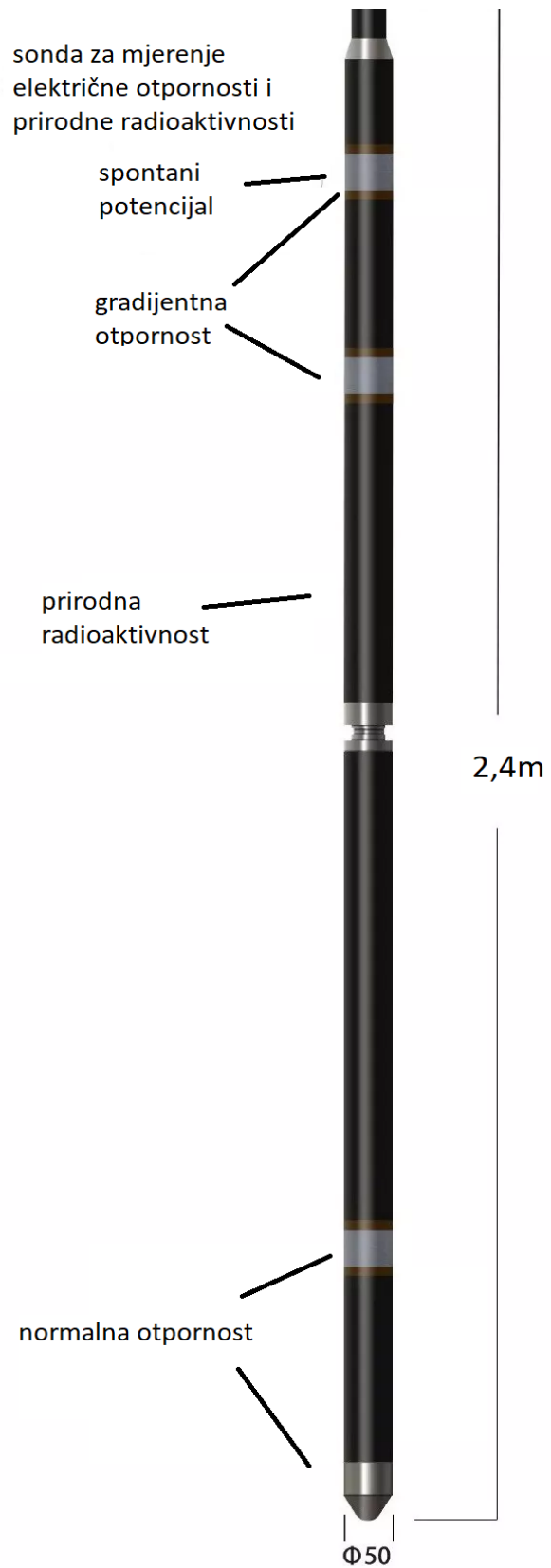
### 5.1. Primjena radioaktivnih karotažnih metoda

Najčešće primjene radioaktivnih karotažnih mjerenja su određivanje gustoće stijena, poroznosti, određivanje volumena udjela šejla te za koreliranje jezgri s karotažnom dubinom. Odziv pri mjerenju ovisi o zračenju, karakteristikama sonde i parametrima mjerenja. Uobičajeni detektor na sondi obuhvaća scintilacijski kristal natrijevog jodida od 30 cm s fotomultiplikatorom. Takvim sustavom mogu se otkriti tanki veoma radioaktivni slojevi, ali ako su tanji od 25 cm, nije ih moguće razaznati. (Hansen i Shray, 1996.) Budući da je radioaktivni raspad statičan proces, sporije kretanje sonde daje bolje rezultate. Nizak broj očitavanja posljedica je prebrzog prolaza alatke i ne može se povećati korekcijskim faktorima.

Najčešća je upotreba karotaže gama zrakama procjena volumena šejla u stijenama. Važno je zapamtiti da alatka mjeri radioaktivnost, a korelacija sa sadržajem šejla je empirijska. Kako se šejl sastoji od minerala gline tako je i veličina zrna u korelaciji s razinom gama zračenja. U stvarnosti šejlovi mogu sadržavati više od 30 posto kvarca i ostalih minerala. Druga primjena je koreliranje jezgri sa zabilježenom dubinom jer se razina radioaktivnog zračenja može mjeriti i na jezgri. Primarno se koristi za koreliranje dubine jezgre s dubinom mjerenja i tako ova tehnika pruža profil razina radioaktivnosti po duljini jezgre. Identificiraju se značajke mjerenja i položaj jezgre. Kada je nizak postotak jezgre oporavljen na površini nakon postupka jezgoravanja, ova metoda je korisna za koreliranje fragmenata jezgre s pravom dubinom. Također se mogu mjeriti kolone jezgre, za što je potrebna posebna oprema koja bilježi niske razine zračenja koje su povezane s manjim uzorcima.

## 5.2. Sonde za radioaktivnu karotažu

Kod karotaže sondom na žici dio za mjerenje koji sadrži mjerne senzore nalazi se u ulošku koji obuhvaća i elektroniku i napajanje (slika 5-1). Originalno se kao detektor koristila geiger-müllerova cijev dok se u novije vrijeme koriste čvrsti scintilacijski kristali poput natrijev jodid (NaI). Kad gama zraka dođe u kontakt s takvim kristalom, stvara se puls svjetlosti kojeg fotomultiplikator pretvara u električni puls. Bitan parametar je i konačna dubina bušotine pa je potrebno odlučiti jesu li vrijednosti temperature i tlaka premašile maksimalnu dozvoljenu radnu temperaturu i tlak koji je naveden od strane proizvođača kao ograničavajući za određenu sondu. Generalno gledano, sonde korištene kod klasične karotaže mogu podnijeti maksimalne tlakove do 15 MPa i temperature do 70 °C. Najbitniji ograničavajući faktor je radna temperatura pri maksimalnoj predviđenoj dubini. U normalnim uvjetima tlaka i temperature, sonde se mogu koristiti do dubina od 2000 metara.

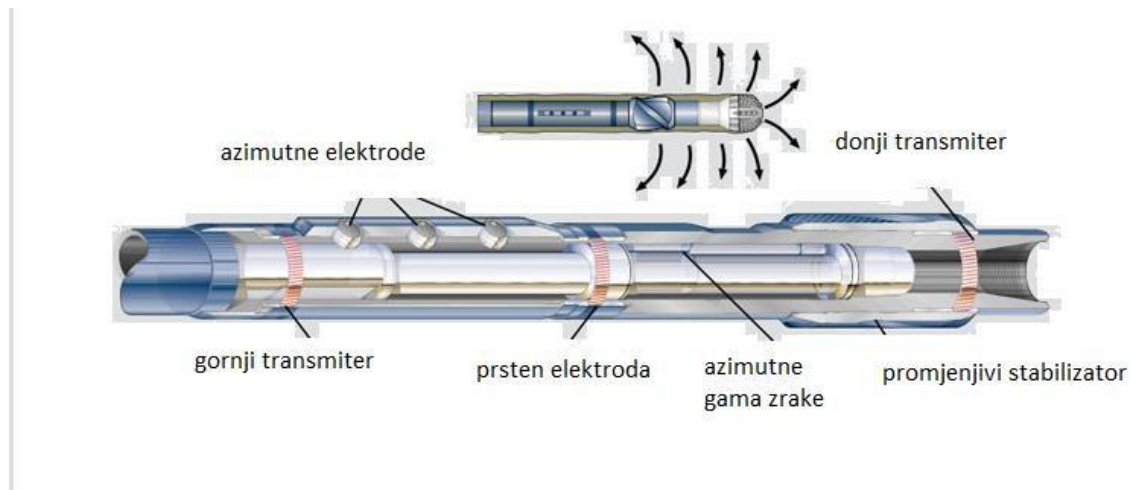


**Slika 5-1.** Sonda za mjerenje otpornosti i prirodne radioaktivnosti ([www.ivy Zhang918.com](http://www.ivy Zhang918.com), 2021)



Općenito, dubina se preciznije određuje prilikom klasične karotaže nego tijekom bušenja, na što utječe produljenje bušaćeg sklopa i mjeri se precizno tijekom operacija s integriranim mjernim kotačem. Mjerni kotač koristi mjerenje napetosti žice za korekciju izduživanja kabla i daje kalibrirane apsolutne dubine. Podatci sa svake alatke za karotažu spremaju se u zapis unutar alatke i postaju dostupne za prikaz u stvarnom vremenu preko SCADA (engl. *Supervisory control and data acquisition*) sustava. Alatka za mjerenje gama zračenja mjeri prirodno zračenje emitirano iz stijene u gama API jedinicama (GAPI) i to je standardni način za identificiranje litoloških jedinica i provjerepodataka. Alatke za gama karotažu koriste se pri svim prolazima, a senzori se nalaze u ulošku ili kombiniranim alatkama koje imaju dubinu prodiranja (istraživanja) od 24 do 61 centimetar. Kontrola kvalitete karotažnih podataka tijekom obrade uglavnom se provodila korelacijom svih dostupnih podataka.

Sonde koje se koriste za vrijeme bušenja (slika 5-2.) primjenjuju se dugotrajnije u težim uvjetima poput intenzivnih kratkotrajnih vibracija u svim smjerovima. Moraju izdržati sve uvjete koji se mogu pojaviti u kanalu bušotine i pružiti točne podatke čak i kada se sklop alatki savija i vibrira te izdržava erozijske učinke isplake. Za razliku od sondi koje se primjenjuju na žici, ove se moraju smjestiti unutar teških šipki te dopustiti relativno ujednačen protok fluida i mogu biti dizajnirani tako da se dijelovi koji se brže troše mogu zamijeniti lako i brzo. Sastoje se od elektroničkih sklopova koji imaju senzore za računanje pozicije i orijentacije kanala bušotine, odnosno kuta otklona i azimuta kanala bušotine. Kut otklona je kut kanala bušotine u odnosu na vertikalnu, dok je azimut kut pravca otklona u odnosu na geografski sjever. Za tu se svrhu u sustavu nalaze akcelerometri i magnetometri koji zajedničkim djelovanjem mjere otklon i azimut kanala bušotine. Po potrebi im mogu biti prigradene druge alatke. Mjerne alatke su udaljene od dlijeta radi smanjenja vibracija i sila tijekom bušenja te povećanja mjerne preciznosti. Senzori gama zraka se nalaze zaštićeni unutar kućišta skupa s fotomultiplikatorom.



**Slika 5-2.** Sonda za mjerenje prirodne radioaktivnosti za vrijeme bušenja ([mlp.ldeo.columbia.edu](http://mlp.ldeo.columbia.edu), 2013)

### 5.3. Usporedba radioaktivne karotaže prilikom mjerenja na žici i mjerenja tijekom bušenja

Postoje određeni razlozi za zabrinutost radi razlika između rezultata mjerenja između karotaže na žici i mjerenja prilikom bušenja. Uvaženo je mišljenje da te razlike mogu nastati zbog razlika u dizajnu alatki koji bi mogao bit osjetljiv na relativne razlike u koncentraciji smjese uranija, kalijai torija između kalibracijskih modela bušotina i stvarnih stijena. Osim toga, navode se greške u karakterizaciji procesa i točnosti korekcijskih algoritama primijenjenih za mjerene veličine. Svaka alatka osjetljiva je na koncentracije navedenih elemenata ovisno o njenim specifičnim geometrijskim parametrima. Da bismo odredili tu osjetljivost, računamo koeficijent osjetljivosti za svaku alatku prilikom kalibracije u bušotini s poznatim koncentracijama torija, uranija i kalija. Pod različitim bušotinskim uvjetima poput gustoće isplake i promjera bušotine alatke se ponašaju drugačije ovisno o osjetljivosti na koncentraciju. Takav pristup omogućuje nam određivanje razlika između dvije metode mjerenja prirodne radioaktivnosti na temelju geometrije alatke, dimenzije bušotine, koncentracija kalija, uranija i torija te gustoće isplake prije i nakon primjene korekcijskih algoritama.

Alatke koje se primjenjuju jednom i drugom metodom sastoje se od jednog detektora gama zrakakoji detektira prirodnu radioaktivnost nabušene stijene. Međutim problem predstavljaju razlike između odziva sonde za klasičnu karotažu i alatki koje se primjenjuju za mjerenje tijekom bušenja. Razlike u dizajnu alatki kao i točnost korekcijskih algoritama glavni su uzroci takvih razlika. Odziv alatke na koncentracije radioaktivnih elemenata ovisi od apsorpciji zračenja u kućište sonde, veličini scintilacijskog kristala u detektoru i bušotinskim uvjetima.

Za razliku od ostalih alatki za karotažna mjerenja, alatke za mjerenje prirodne radioaktivnosti potpuno su pasivne i ne emitiraju radijaciju već samo detektiraju prisutnost gama zraka u stijeni i bušotini.

Kvaliteta zapisa ispitana je u domeni realnih vrijednosti za litologiju bušotinskog intervala, ponovljivosti između različitih prolaza iste alatke i podudaranja zapisa pod utjecajem istih svojstava stijene. Na primjer, karotažno mjerenje otpornosti pokazuje slična svojstva kao i akustično mjerenje dok je mjerenje provodljivosti obično pokazivalo inverzna svojstva zapisu gama zračenja. Prije i nakon glavnog mjerenja rade se kratka mjerenja da se utvrdi ponovljivost. Ukupna kvaliteta izmjerenih podataka procjenjuje se u kontekstu bušotinskih uvjeta i parametara tijekom bušenja. To je zato što bušotine velikih promjera i nepravilnih kanala bušotine smanjuju kvalitetu podataka za centralizacijske alatke, a grube stijenke kanala bušotine smanjuju kontaktne uvjete za neke alatke.

## 6. ZAKLJUČAK

Karotaža tijekom bušenja ili popularno LWD su alternativa klasičnim karotažnim mjerenjima sondom na žici u svrhu dobivanja podataka o stijenama koje se buše. Mjerenja tijekom bušenja se razlikuju u odnosu na mjerenja sondom na žici ponajprije zbog razlika u kvaliteti podataka, razlučivosti i pokrivenosti mjerenje. Kako se prilikom bušenja mjerni sklop kreće u niže dijelove formacije, tako se i mjerenja tijekom bušenja uzimaju pri prolasku prema dolje, za razliku od klasične metode, gdje se podaci bilježe prilikom izvlačenja sonde. Brzina prijenosa podataka do površine prilikom bušenja će biti višestruko sporija nego mjerenjima sondom na žici. Prilikom mjerenja tijekom bušenja se koriste teške šipke zajedno sa sondama pri dnu niza koji završava dlijetom, dok se klasičnim načinom spušta sonda na žici ili kablu nakon bušenja. Iako oba načina mjerenja bilježe iste podatke, rezultati se mogu znatno razlikovati ovisno o dizajnu alatke koji je osjetljiv na koncentracije radioaktivnih materijala. Razni bušotinski uvjeti poput promjera kanala ili gustoće fluida također mogu značajno utjecati na alatke za mjerenje ovisno o njihovoj osjetljivosti na koncentraciju.

## 7. POPIS LITERATURE

1. BRIGGS, V.A., 2006. *A comparison of Logging While Drilling (LWD) and Wireline acoustic measurements*. Doktorska disertacija. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, str. 3-4, 23-45.
2. GONCALVES BASTOS, A.R., 2013. *Logging While Drilling versus conventional WireLine – Comparison*. Studija. Lisabon: Universidade de Lisboa, str. 1-12.
3. HANSEN, P., SHRAY, F., 1996. Unraveling the differences between lwd and wireline measurements. U: *37th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, 16.-19.6.1996*. Houston: The society of professional well log analysts, 1996, str. 1-6.
4. MAUBORGNE, M.,L., ALLIOLI,F., STOLLER, C., EVANS, M., MANCLOSSI, M., NICOLETTI,L., 2017. Exploring for oil with nuclear physics. EPJ Web of Conferences 146.

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom "Radioaktivna karotažna mjerenja sondom na žici i tijekom bušenja (LWD)" izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenim referencama.



---

Dennis Jandrić



KLASA: 602-04/21-01/218  
URBROJ: 251-70-12-21-2  
U Zagrebu, 15.9.2021.

**Dennis Jandrić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/218, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 1.7.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### RADIOAKTIVNA KAROTAŽNA MJERENJA SONDOM NA ŽICI I TIJEKOM BUŠENJA (LWD)

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

Voditeljica:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Jasna Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)