# Analiza kvarova i metoda popravaka podmorskih optičkih kabelskih sustava

**Vukušić, Ivica**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:081063

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository

zir.nsk.hr

UNIRI DIGITALNA KNJIŽNICA

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**
**POMORSKI FAKULTET**

**IVICA VUKUŠIĆ**

# ANALIZA KVAROVA I METODA POPRAVAKA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELSKIH SUSTAVA

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**
**POMORSKI FAKULTET**

# ANALIZA KVAROVA I METODA POPRAVAKA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELSKIH SUSTAVA

# FAILURE ANALYSIS AND METHOD OF REPAIR OF SUBMARINE OPTICAL CABLE SYSTEMS

**ZAVRŠNI RAD**
**BACHELOR THESIS**

Kolegij: Optoelektronički sustavi
Mentor: prof. dr. sc. Irena Jurdana
Student: Ivica Vukušić
Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu
JMBAG: 0112010568

Rijeka, rujan 2024.

Student: Ivica Vukušić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112010568

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom
**ANALIZA KVAROVA I METODA POPRAVAKA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELSKIH SUSTAVA**
*(naslov završnog rada)*

izradio samostalno pod mentorstvom
prof. dr. sc. Irena Jurdana

---

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student

Ivica Vukusic
*(potpis)*

Ivica Vukušić

Student: Ivica Vukušić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim i završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na http://creativecommons.org/licenses/

Student – autor

Ivica Vukusic

*(potpis)*

Ivica Vukušić

## SAŽETAK

Razvoj industrije podmorskih optičkih kabela snažno utječe na komunikaciju kako globalno tako i na regionalnim razinama. Tehnologija danas omogućava kvalitetan i brz prijenos različitih informacija te je evidentno da su sustavi podvodnih kabela u odnosu na trenutni rast širokopojasnih mreža, i dalje ključna odrednica svjetskih ukupnih telekomunikacijskih sposobnosti i kapaciteta. Obzirom da se više od 90 % svjetske elektroničke komunikacije obavlja putem podmorskih optičkih kabela, naglašava razinu ovisnosti komunikacijskih mreža o industriji podvodnih kabela, utvrđivanju i metodama rješavanja kvarova. Napredak u industriji podmorskih optičkih kabela evidentan je, kretao se od inovacija u ukapanju kabela koristeći napredne tehnike oranja, do dizajna visoko naprednih, otvorenih pristupnih podmorskih kabelskih mreža koje sveobuhvatno povezuju sve zemlje unutar određenog područja. No, podmorski su optički kabeli izloženi različitim opasnostima kako od vremenskih nepogoda, do gospodarskih aktivnosti (ribolova i sidrenja brodova) što može oštetiti kabeli i uzrokovati kvarove. Troškovi popravaka kvarova mogu biti visoki, ako se kvar pravovremeno ne utvrdi i otkloni.

U ovom završnom radu naglasak je na analizi postupaka utvrđivanja i metoda popravaka kvarova na podmorskim optičkim kabela. Opisuju se postupci i instrumenti koji se koriste za testiranje kvarova te koji omogućuju pravovremeno i točno lociranje kvara i testiranje optičkog podmorskog kabela nakon popravka. Posebno se daje prikaz mjerenja optičkog signala uz pomoć testne kutije tijekom popravka kvara.

**Ključne riječi:** industrija podmorskih optičkih kabela, optički kabel, kvarovi, instrumenti za testiranje, metode popravaka.

## SUMMARY

The development of the submarine fibre optic cable industry strongly affects communication both globally and regionally. Technology today enables high-quality and fast transmission of various information, and it is evident that underwater cable systems, in relation to the current growth of broadband networks, are still a key determinant of the world's overall telecommunication capabilities and capacities. Considering that more than 90% of the world's electronic communication is carried out via submarine fibre optic cables, it highlights the level of dependence of communications networks on the submarine cable industry, fault detection

and troubleshooting methods. Advances in the submarine fibre optic cable industry are evident, ranging from innovations in cable laying using advanced flowing techniques, to the design of highly advanced, open access submarine cable networks that comprehensively connect all countries within a given area. However, submarine optical cables are exposed to various dangers, from weather to economic activities (fishing and anchoring of ships), which can damage the cables and cause malfunctions. The costs of repairing defects can be high, if the defect is not identified and eliminated in time.

In this final paper, the emphasis is on the analysis of procedures for determining and repairing faults on submarine optical cables. Procedures and instruments used for fault testing are described, which enable timely and accurate fault location and testing of the optical submarine cable after repair. In particular, the measurement of the optical signal with the help of the test box during the repair of the fault is presented.

**Keywords:** submarine fibre optic cable industry, fibre optic cable, failures, test instruments, repair methods.

## SADRŽAJ

**SAŽETAK** ..... **I**

**SUMMARY** ..... **I**

**SADRŽAJ** ..... **III**

**1. UVOD** ..... **1**

**2. OPĆENITO O OPTIČKIM KABELIMA, POJAM, VRSTE I OBILJEŽJA** ..... **3**

2.1. OPĆENITO O INDUSTRIJI OPTIČKIH KABLOVA ..... 3

2.2. POJAM I OBILJEŽJA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ..... 5

2.3. TEHNOLOŠKE KOMPONENTE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ..... 6

2.4. TIPOVI PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ..... 7

**3. ZNAČAJ PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ZA GLOBALNU KOMUNIKACIJU** ..... **10**

3.1. ULOGA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA U GLOBALNOJ KOMUNIKACIJI ..... 10

3.2. POUZDANOST PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ..... 11

3.3. RAZNOLIKOST RUTA ..... 12

3.4. IZAZOVI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA U RAZVOJU PODMORSKE KABELSKE INDUSTRIJE ..... 13

**4. POLAGANJE I TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA** ..... **17**

4.1. PRIPREMA I TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA PRIJE POLAGANJA ..... 17

4.2. POLAGANJE I TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ..... 22

4.3. TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA POMOĆU OPTOELEKTRONIČKOG INSTRUMENTA ..... 24

4.4. TIPOVI OPTOELEKTRONIČKOG TESTNOG INSTRUMENTA ..... 29

4.5. POJAČALO PODMORSKOG OPTIČKOG KABELA ..... 32

**5. KVAROVI I METODE POPRAVAKA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA** ..... **37**

5.1. PROCEDURE U POSTUPKU ANALIZE I POPRAVKA KVARA ..... 37

5.2. UTVRĐIVANJE I LOCIRANJE KVARA ..... 39

5.3. MJERENJE I ISPITIVANJE SNAGE SIGNALA ..... 40
5.4. TEHNIKE POPRAVAKA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ..... 45
**ZAKLJUČAK ..... 52**
**LITERATURA ..... 54**
**POPIS KRATICA ..... 57**
**POPIS SLIKA ..... 58**

# 1. UVOD

Industrija podmorskih optičkih kabela omogućava komunikaciju između različitih regija, kao i unutar samih regija. Osigurava međunarodno usmjeravanje prometa, zaštitu redundancije, i mnoge druge ključne usluge za telekomunikacijske operatere. Sustavi podmorskih kabela su bili, a u odnosu na trenutni rast širokopojasnih mreža, i dalje su ključna komponenta svjetskih ukupnih telekomunikacijskih sposobnosti i kapaciteta. Više od 90 % svjetske elektroničke komunikacije obavlja se putem podmorskih optičkih kabela. Navedeno naglašava razinu ovisnosti komunikacijskih mreža o industriji podmorskih kabela i krhkost prekograničnih podmorskih komunikacija koje se moraju poštovati i štititi. Napredak u industriji podmorskih optičkih kabela kretao se od inovacija u ukapanju kabela koristeći napredne tehnike oranja, do dizajna visoko naprednih, otvorenih pristupnih podmorskih kabelskih mreža koje sveobuhvatno povezuju sve zemlje unutar određenog područja. Podmorski su optički kabeli izloženi prirodnim i ljudskim opasnostima, od vremenskih nepogoda, tsunamija koji potpuno uništavaju podvodne optičke mreže, do ribolova i sidrenja brodova, koji mogu oštetiti kabele što rezultira visokim troškovima popravaka.

Analizom dosadašnjeg razvoja industrije podmorskih optičkih kabela i utjecaja na telekomunikacijske mreže i operatere, može se sagledati značaj podmorskih optičkih kabela na svjetske telekomunikacijske sposobnosti i kapacitet. Slijedom toga, problem istraživanja u ovom završnom radu su postupci polaganja i testiranja podmorskih optičkih kabela, vrste testne opreme i pojačala te metode i popravak kvarova na podmorskim optičkim kabelima. Predmet istraživanja je analiza podmorskih optičkih kabela, načina polaganja i testiranja, te metoda utvrđivanja i popravka kvarova. Problem i predmet istraživanja odnose se na slijedeće objekte istraživanja: industrija podmorskih optičkih kabela, oprema za polaganje i testiranje, kvarovi, metode popravaka kvarova.

Svrha ovog završnog rada je analizirati industriju podmorskih optičkih kabela, vrste, značaj i obilježja podmorskih optičkih kabela te analizirati metode, postupanje i opremu u funkciji testiranja i otklanjanja kvara na podmorskim optičkim kabelima. Cilj rada je istražiti i analizirati industriju podmorskih optičkih kabela, tehnička i druga obilježja opreme za testiranje, te postupak mjerenja snage optičkog signala radi otklanjanja kvara na podmorskim optičkim kabelima.

Za potrebe izrade ovoga završnog rada korištene su sljedeće znanstvene metode: metoda analize i sinteze, metode indukcije i dedukcije, povijesna metoda, komparativna metoda i metoda kompilacije.

Završni rad je podijeljen u pet cjelina i Zaključak. U prvom dijelu, Uvodu, navedeni su problem i predmet, te svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode koje se u radu primjenjuju te je obrazložena struktura rada. Drugo poglavlje naslova, Općenito o optičkim kabelima, pojam, vrste i obilježja, daje uvodne informacije i obilježja podmorskih optičkih kabela. Treće poglavlje naslova, Značaj podmorskih optičkih kabela za globalnu komunikaciju daje prikaz uloge optičkih komunikacija u globalnoj komunikaciji, otvara pitanje pouzdanosti, odabira ruta i predstavlja izazove i trendove u industriji podmorskih kabelskih sustava. U četvrtom poglavlju naslova, Polaganje i testiranje podmorskih optičkih kabela, daje se detaljan prikaz optoelektroničkih instrumenata koji se koriste prilikom polaganja i testiranja podmorskih optičkih kabela. Peto poglavlje naslova, Kvarovi i metode popravaka podmorskih optičkih kabela, opisuje postupak otkrivanja kvara, testne metode i metode popravka kvara. U posljednjem dijelu, Zaključku, dana je sinteza rezultata istraživanja i značaja razvoja industrije podvodnih kabela posebno u kontekstu popravaka kvarova.

# 2. OPĆENITO O OPTIČKIM KABELIMA, POJAM, VRSTE I OBILJEŽJA

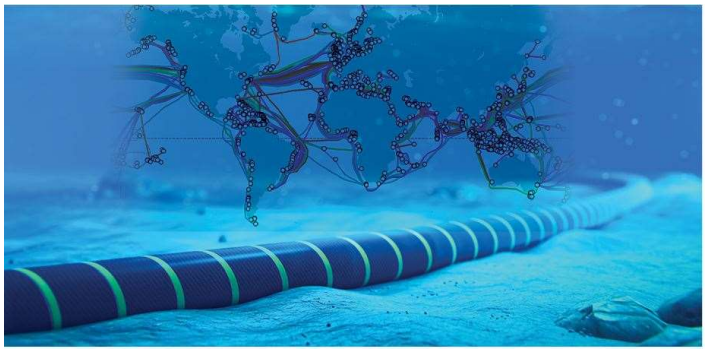
U ovom poglavlju se obrazlaže dosadašnji razvoj industrije podmorskih optičkih kabela, daje pojmovno obrazloženje optičkog kabela te prikaz tipova, obilježja i tehničkih karakteristika industrije podmorskih optičkih kabela.

## 2.1. OPĆENITO O INDUSTRIJI OPTIČKIH KABLOVA

Razvoj industrije podmorskih optičkih kabela doprinosi komunikaciji na globalnoj razini. Doprinos je vidljiv u različitim područjima i to međunarodnom usmjeravanju prometa, zaštiti redundancije, i druge ključne usluge za telekomunikacijske operatere te općenito povezivanju u gospodarskom i društvenom smislu. U odnosu na trenutni rast širokopojasnih mreža, sustavi podvodnih kabela su bili, i jesu ključna komponenta svjetskih telekomunikacijskih sposobnosti i kapaciteta.[1] Elektronička komunikacija obavlja se putem podvodnih optičkih kabela gotovo u 90 % svjetske komunikacije. Ova činjenica potvrđuje razinu ovisnosti komunikacijskih mreža o industriji podmorskih kabela i krhkost prekograničnih podmorskih komunikacija u slučaju kvarova.

Napredak u industriji podmorskih optičkih kabela kretao se od inovacija u ukapanju kabela kada se koriste napredne tehnike oranja, do dizajna visoko naprednih, otvorenih pristupnih podmorskih optičkih kabelskih mreža koje povezuju sve zemlje unutar određenog područja. Podmorski optički kabeli (slika 1) su izloženi i prirodnim i ljudskim opasnostima, od tsunamija koji potpuno uništavaju podmorske optičke mreže, do ribolova i sidrenja brodova. Navedeno može oštetiti kabel, a popravci najčešće zahtijevaju i vrijeme i znatna financijska sredstva.

[1] Baoping, C., Di, Y., Feng, Q. (2021). Optical Fiber Cables. DOI: 10.1002/9783527822263.ch13. https://www.researchgate.net/publication/351269486_Optical_Fiber_Cables/citations



**Slika 1. Podmorski optički kabel**

Izvor: https://acacia-inc.com/blog/undersea-fiber-cables-are-connecting-our-world/

Povijest podmorskih optičkih kabela započinje s konceptom optičkih vlakana, koji su se razvili kroz dugi niz godina. Ideja korištenja svjetlosnih signala za prijenos podataka nije nova i seže u 19. stoljeće kada su znanstvenici eksperimentirali s optičkim telegrafima i drugim metodama prijenosa podataka pomoću svjetlosti. Radovi znanstvenika poput Colladona i Tyndalla iz tog razdoblja doprinijeli su razumijevanju principa loma svjetlosti i propagacije svjetlosnih signala kroz tanka vlakna.

Prva praktična optička vlakna pojavila su se tijekom 20. stoljeća. U 1950-ima, ruski znanstvenik[2] patentirao je ideju o prijenosu podataka kroz optička vlakna.

Revolucija u području optičkih kabela dogodila se 1970-ih i 1980-ih godina. U ranim 1970-ima, inženjeri[3] tvrtke Corning Glass Works uspjeli su proizvesti prvo optičko vlakno s niskim gubitkom, što je omogućilo komercijalnu upotrebu optičkih kabela za prijenos podataka. Godine 1977., kompanija AT&T[4] instalirala je prvi komercijalni sustav optičkih kabela u Long Beachu u Sjedinjenim Američkim Državama.

Tijekom 1980-ih, razvijene su tehnologije za izradu višekanalnih optičkih kabela, što je značajno povećalo kapacitet prijenosa podataka. U 1990-ima, optički kabel postao je standardna tehnologija za međugradsku i međunarodnu telekomunikaciju. Nakon 2000-ih, optički kabeli postali su još važniji za globalnu komunikaciju, s još većim kapacitetima i pouzdanošću.

---

[2] Papapavlou, C., Paximadis, K., Uzunidis, D., Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015,

[3] Ibidem

[4] Ibidem

Razvoj optičkih kabela nastavio se s fokusom na povećanje kapaciteta, smanjenje gubitaka i poboljšanje tehnologije polaganja kabela. Danas, optički kabeli predstavljaju osnovu globalne telekomunikacijske infrastrukture, omogućujući brz i pouzdan prijenos podataka širom svijeta. Daljnji napredak u ovoj tehnologiji očekuje se kako bi se zadovoljile rastuće potrebe za većim kapacitetom i boljom povezanošću.

## 2.2. POJAM I OBILJEŽJA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

Optički kabeli su vrsta komunikacijskog kabela koji se koristi za prijenos podataka pomoću svjetlosnih signala umjesto električnih signala.[5] Sastoje se od tankih vlakana od čistog stakla ili plastike (optičkih vlakana) koje mogu prenositi svjetlost duž velikih udaljenosti. Optički kabeli imaju široku primjenu u telekomunikacijama, internetu, televiziji, medicinskim uređajima i drugim područjima. Obilježja optičkih kabela su kako slijedi:[6]

- **Jezgra optičkog kabela -** Jezgra optičkog kabela sastoji se od optičkih vlakana koja su izrađena od stakla ili plastike. Ova vlakna omogućuju prijenos svjetlosti, za potrebe prijenosa podataka.
- **Refleksija svjetlosti -** Svjetlosni signali unutar optičkih vlakana reflektiraju se unutar jezgre zbog fenomena potpunog unutarnjeg odraza, što omogućuje svjetlosti da putuje duž cijele duljine kabela s minimalnim gubicima.
- **Zaštita i ojačanje -** Optički kabeli obično imaju vanjske slojeve koji pružaju zaštitu od mehaničkih oštećenja i okolišnih utjecaja, kao i ojačanja za dodatnu čvrstoću.
- **Visoki kapacitet prijenosa podataka:** Optički kabeli omogućuju prijenos velikih količina podataka brzo i pouzdano, što ih čini idealnim za široku primjenu u modernim telekomunikacijskim mrežama.
- **Imunost na elektromagnetske smetnje -** Budući da se podaci prenose putem svjetlosti umjesto električnih signala, optički kabeli imuni su na elektromagnetske smetnje koje mogu ometati prijenos signala električnih kabela.

Optički kabeli su važna sastavnica globalne telekomunikacijske infrastrukture zbog svoje visoke propusnosti, pouzdanosti i sposobnosti prijenosa podataka na velike udaljenosti. Imaju

[5] Ibidem
[6] Rezgui, H. (2022). An Overview of Optical Fibers. Global Journal of Science Frontier Research. 21. 14-20. https://www.researchgate.net/publication/357856211_An_Overview_of_Optical_Fibers

mnoge uloge od kojih su ključne za funkciju interneta, telefonskih mreža, televizije, digitalne komunikacije i mnogih drugih suvremenih tehnoloških sustava.

## 2.3. TEHNOLOŠKE KOMPONENTE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

Podvodni optički kabel sastoji se od nekoliko slojeva koji zajedno osiguravaju zaštitu i funkcionalnost optičkih vlakana u teškim uvjetima morskog okoliša. Glavne tehnološke komponente podvodnih optičkih kabela su:[7]

- **Optička vlakna (Optical Fibers) -** Jezgra (Core): Središnji dio vlakna, izrađen od čistog stakla ili plastike, kroz koji se prenose svjetlosni signali.
- **Omotač (Cladding) -** Materijal koji okružuje jezgru, ima niži indeks loma svjetlosti i reflektira svjetlosne signale natrag u jezgru.
- **Primarni zaštitni sloj (Primary Coating) -** Tanka plastična prevlaka koja štiti vlakna od vlage i fizičkih oštećenja.
- **Sekundarni zaštitni sloj (Secondary Coating) -** Dodatna zaštita koja povećava otpornost vlakana na mehanička oštećenja i stres.
- **Centralna žica za ojačanje (Central Strenght Member) -** Čelična ili aramidna vlakna (poput Kevlara) koja osiguravaju mehaničku čvrstoću i sprječavaju istezanje kabela.
- **Jastučni sloj (Buffer Tube) -**Cijevi koje sadrže optička vlakna i štite ih od fizičkih oštećenja i vlage.
- **Punilo (Filler Elements) -**Materijali koji popunjavaju praznine unutar kabela kako bi se spriječilo savijanje i dodatno zaštitila vlakna.
- **Vodootporni slojevi (Waterproofing Layers) -** Slojevi materijala, poput vazelina ili hidroizolacijskih traka, koji sprječavaju prodor vode u unutarnje dijelove kabela.
- **Aramidna vlakna (Aramid Yarn/Kevlar) -** Ojačanja koja dodaju čvrstoću i otpornost na istezanje kabela.
- **Bakarna ili aluminijska cijev (Copper or Aluminium Tube) -**Cijev koja može služiti kao električni vodič za napajanje pojačala signala duž kabela.
- **Čelične žice (Steel Wire Armor) -** Sloj čeličnih žica koje pružaju dodatnu mehaničku zaštitu i čvrstoću, štiteći kabel od vanjskih fizičkih sila, poput ribolovnih alata ili sidara.

[7] Ibidem

- **Vanjski omotač (Outer Jacket) -** Vanjski sloj izrađen od čvrste plastike, poput polietilena, koji štiti unutarnje komponente od kemikalija, abrazije i drugih vanjskih utjecaja.
- **Dodatna zaštita (Additional Protection) -** U nekim slučajevima, dodaju se dodatni slojevi, poput katodnih zaštitnih materijala, za zaštitu od korozije.

Podmorski optički kabeli dizajnirani su da izdrže ekstremne uvjete u dubokom moru, uključujući visoki tlak, koroziju i potencijalne fizičke opasnosti. Ova složena struktura osigurava pouzdan prijenos podataka na velikim udaljenostima između kontinenata, čineći ih vitalnim dijelom globalne komunikacijske infrastrukture.

## 2.4. TIPOVI PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

Postoji više tipova podmorskih optičkih kabela i to slijedom: podmorski električni kabel s optičkim vlaknima, s laganim optičkim vlaknima i oklopljenim podmorskim optičkim vlaknima.[8] U nastavku se daju tehničke karakteristike pojedinog tipa podmorskog optičkog kabela.

- Podmorski električni kabel s optičkim vlaknima (slika 2):
  - vodič: Bakar
  - izolacija: XLPE (umreženi polietilen)
  - vodootporni omotač: Poluvodljiva vodootporna traka
  - oklop: Bakrene žice i bakrena spirala
  - broj vlakana: 12/24/36/48/72
  - oklop: Pocinčane čelične žice

[8] Papapavlou, C., Paximadis, K., Uzunidis, D., Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015,

**Slika 2. Podmorski električni kabel s optičkim vlaknima**

Izvor: https://zmscable.es/en/cable-submarino/fibra-optica-submarino/

- Podmorski optički kabel s laganim optičkim vlaknima (slika 3):
  - broj vlakana: 12/24/36/48/72
  - zaštitni sloj: Cijev od nehrđajućeg čelika
  - unutarnji oklop: Čelične žice
  - vanjski sloj: PE (polietilen)

**Slika 3. Podmorski optički kabel s laganim optičkim vlaknima**

Izvor: https://zmscable.es/en/cable-submarino/fibra-optica-submarino/

- Podmorski optički kabel s oklopljenim podmorskim optičkim vlaknima (slika 4):
  - broj vlakana: 12/24/36/48/72
  - zaštitni sloj: Cijev od nehrđajućeg čelika
  - unutarnji oklop: Čelične žice
  - vanjski oklop: Jednoslojni/dvoslojni čelični žice
  - vanjski sloj: PE (polietilen)

**Slika 4. Podmorski optički kabel s oklopljenim podmorskim optičkim vlaknima**

Izvor:https://zmscable.es/en/cable-submarino/fibra-optica-submarino/

# 3. ZNAČAJ PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA ZA GLOBALNU KOMUNIKACIJU

U trećem poglavlju obrazlaže se značaj i uloga podmorskih optičkih kabela u globalnoj komunikaciji te se opisuje njihova pouzdanost i odabir ruta na koje se postavljaju. Značaj razvoja industrije podmorskih optičkih kabela u kontekstu razvoja tehnologije obrazlaže se u ovom poglavlju.

## 3.1. ULOGA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA U GLOBALNOJ KOMUNIKACIJI

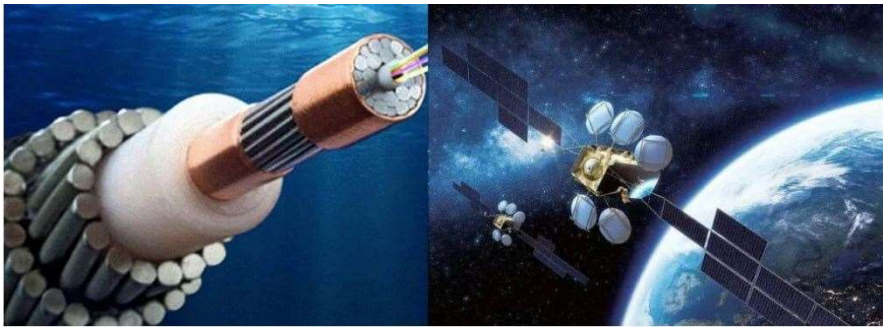
Podmorski optički kabeli igraju ključnu ulogu u globalnoj komunikaciji, omogućujući brz i pouzdan prijenos podataka između kontinenata. Osnova su za međunarodne telekomunikacijske mreže, internet, telefonske razgovore, video konferencije, financijske transakcije i druge važne i ostale komunikacijske usluge.

Podmorski optički kabeli omogućuju prijenos ogromnih količina podataka brže i efikasnije od tradicionalnih žičanih ili bežičnih veza.[9] Pouzdana komunikacija putem optičkih kabela ključna je za gospodarski razvoj, trgovinu, znanstvena istraživanja, medicinske usluge i mnoge druge sektore. Oštećenja ili prekidi optičkih kabela u moru, mogu imati ozbiljne posljedice za globalnu komunikaciju i ekonomiju, što naglašava važnost popravaka i održavanja ovih kabela. Pojavom i uporabom satelita podmorski optički kabeli nisu isključili telefonske kabele iz upotrebe (slika 5). Naime, nova tehnologija optičkih vlakana jednako je napredna kao i satelitski sustavi. Optički kabeli prenose glasovni i podatkovni promet s većom pouzdanošću i sigurnošću po nižim cijenama od satelita. Dok satelitski poziv mora putovati 35,784 km od zemlje do satelita, a zatim još 22,235 milja natrag, transpacifički poziv preko optičkog kabela mora prijeći samo oko 5.000 milja od točke A do točke B.[10] Pri tom brzina

[9] Nabih, A., Rashed, A. (2012). Submarine Optical Fiber Cable Systems for High Speed Growth Developments in Optical Communication Networks. International Journal of Information Engineering and Electronic Business. 4. 10.5815/ijieeb.2012.03.07. https://www.researchgate.net/publication/266342041_Submarine_Optical_Fiber_Cable_Systems_for_High_Speed_Growth_Developments_in_Optical_Communication_Networks

[10] Ibidem

svjetlosti pomaže u eliminaciji kašnjenja koja se javljaju tijekom telefonskog poziva preko satelita.



**Slika 5. Optički kabel i satelitska veza**

Izvor: https://zmscable.es/en/cable-submarino/fibra-optica-submarino/

## 3.2. POUZDANOST PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

Industrija podmorskih optičkih kabela desetljećima se bavi utjecajem prirodnih katastrofa, ljudskih aktivnosti i tehničkih kvarova, koje pojave značajno utječu na globalnu komunikaciju. Normalni sigurnosni čimbenici ugrađeni su u postojeće sustave, uključujući prijetnje od ljudskih aktivnosti ili prirodnih opasnosti. Postoje određena područja svijeta gdje su kabeli poznati kao podložniji rizicima zbog kretanja tektonskih ploča. Međutim, trošak osiguranja 100-postotne sigurnosti može biti nepremostiv zbog nepredvidive prirode tih relativno rijetkih događaja i činjenice da su vlasnici kabela obvezni djelovati u konkurenciji međusobno.[11]

Članovi ICPC-a (International Cable Protection Committee)[12] usko surađuju sa svojim nacionalnim vladama kako bi maksimizirali sigurnost podmorskih kabela, a taj se rad nastavlja kako se pojavljuju nove prijetnje. Internacionalno, ugovori poput Međunarodne konvencije o zaštiti podmorskih kabela i Konvencije UN-a o pravu mora (UNCLOS) nameću obaveze većini nacija da osiguraju i zaštite podmorske kabele izvan svojih teritorijalnih mora i omogućavaju pomorskim snagama da istraže i poduzmu odgovarajuće mjere protiv plovila koja su vjerojatno

[11] Asante, B., Hayford-Acquah, T. (2021). Fiber Cut Impacts and the Scientific Analysis of its Financial Losses. 16. 34-51. 10.9790/2834-1603023451. https://www.researchgate.net/publication/352568375_Fiber_Cut_Impacts_and_the_Scientific_Analysis_of_its_Financial_Losses

[12] https://www.iscpc.org/

oštetila podmorske kabele, bilo namjerno ili iz nepažnje. Jedan od nedavnih primjera je oštećenje još uvijek s tzv. nejasnim uzrokom.[13]

Sustavi podmorskih optičkih kabela dizajnirani su da budu vrlo pouzdani i imaju nekoliko redundantnih značajki.[14] Unatoč tome, operatori podmorskih kabela stalno prate performanse sustava i traže prilike za poboljšanje pouzdanosti mreže. Bilježe se podaci kako bi se vlasnicima i operatorima omogućile promjene u dizajnu i/ili operativne promjene po potrebi za zaštitu sustava. Tako je migracija ribolova u dublje vode prisilila industiju podmorskih optičkih kabela da razvije tehnike za zaštitu svojih sustava u dubljim vodama. Sve promjene u infrastrukturi treba pažljivo razmotriti s obzirom na troškove (za korisnika), utjecaj na performanse i kompatibilnost s tržištem. U drugim industrijama koje su reagirale na nove prijetnje (kao što su zrakoplovne kompanije/zračne luke, luke, brodarske kompanije, kemijske tvornice, itd.) često je postojao zajednički napor vlade i industrije kako bi se odredio prikladan smjer djelovanja.[15]

### 3.3. RAZNOLIKOST RUTA

Većina vlasnika podmorskih optičkih kabela smatra da postoji dovoljno raznolikosti u međunarodnoj podmorskoj kabelskoj mreži (slika 6). Nove rute moraju uzeti u obzir mnoge čimbenike, uključujući potražnju korisnika, postojeću infrastrukturu, okoliš, financiranje itd.[16] Dozvole također moraju biti dobivene od različitih vladinih agencija koje su odgovorne za operacije na lokacijama iskrcaja i u teritorijalnim morima. Na nekim rutama izdavanje dozvola bilo je značajna prepreka s velikim vremenskim i/ili troškovnim posljedicama. Takvi problemi ponekad su prisilili planere da preusmjere novi kabelski sustav na manje povoljna područja, a neke su zemlje uvele neprikladne, skupe i komplicirane zahtjeve za dozvolama za hitne popravke u međunarodnim i nacionalnim vodama. Takvi postupci ponekad otežavaju mogućnost vlasnika optičkog kabela da brzo reagira i otkloni kvar.

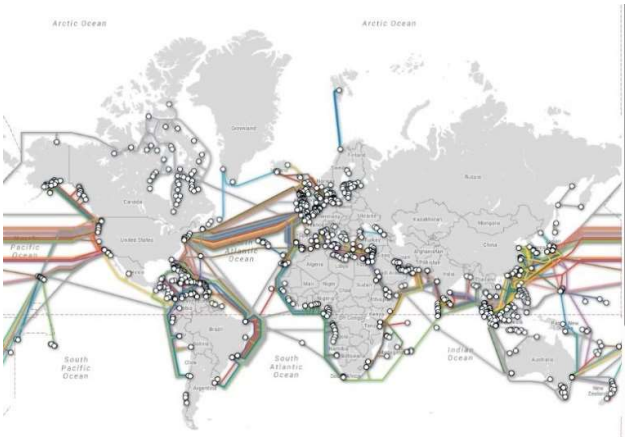
---

[13] „Dana 10. Listopada vlada Finske dala je izjavu koja je kontradiktorna: prirodni plinovod i komunikacijski kabel koji povezuju Finsku i Estoniju preko Baltičkog mora bili su oštećeni. Uzrok ovog oštećenja još uvijek je nejasan, ali su počele kružiti sumnje o namjernim radnjama. Estonski ministar obrane, istaknuo je da su, prema slikama koje su primile estonske vlasti, oštećenja na plinovodu rezultat mehaničkih i ljudskih uzroka. Očigledno je da su oštećenja bila značajnija nego što bi se očekivalo od uobičajenih nesreća. Finski predsjednik, također je izrazio svoje sumnje, navodeći da su oštećenja na plinovodu i komunikacijskom kabelu vjerojatno rezultat vanjskih aktivnosti. Obje vlade pokrenule su zajedničke istrage kako bi razotkrile misterij iza ovih incidenata."

[14] Papapavlou, C.; Paximadis, K.; Uzunidis, D.; Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15

[15] Ibidem

[16] Jurdana, I., Rukavina, B., Tominac Coslovich, S. (2021). Legal regime regulating the laying and protection of submarine cables in the Republic of Croatia. *Pomorstvo, 3*(1), 118-127. https://doi.org/10.31217/p.35.1.13




**Slika 6. Kabelske rute podvodnih optičkih kabela**

Izvor: https://abcgeografija.com/teme/podvodni-kablovi/

Zbog navedenog potrebna je promjena stava i regulativa u mnogim zemljama kako bi se dopustilo da se raznolikost ruta smatra čimbenikom jednakim ribolovnim pravima, rudarskim pravima i zaštitom morskog okoliša.[17] U tom kontekstu ICPC nastoji podići svijest (posebno među vladama) o strateškom značaju podmorskih kabela za globalnu ekonomiju.

## 3.4. IZAZOVI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA U RAZVOJU PODMORSKE KABELSKE INDUSTRIJE

Suvremena tehnologija donijela je nevjerojatne kapacitete, s jednim parom vlakana sada sposobnim prenositi digitalizirane informacije (uključujući video) koji odgovara 150,000,000 simultanih telefonskih poziva.[18] Budući da jedan kabel može primiti mnogo parova vlakana, potencijal za proširenje mreže ogroman je. Navedeno je veoma važno saznanje, koje upućuje na činjenicu da i dalje treba instalirati nekoliko kabela preko široke raznolikosti ruta. Također važnu ulogu ima sofisticirani upravljački sustav koji treba omogućiti gotovo trenutačno

[17]https://iscpc.org/publications/submarine-cable-protection-and-the-environment/ICPC_Public_EU_March%202022.pdf
[18] Nabih, A., Rashed, A. (2012). Submarine Optical Fiber Cable Systems for High Speed Growth Developments in Optical Communication Networks. International Journal of Information Engineering and Electronic Business. 4. 10.5815/ijieeb.2012.03.07.

prebacivanje prometa u slučaju kvara na kabelu. Nadalje niz je razloga koji upućuju na prednosti korištenja optičkih kabela i to kako slijedi:[19]

- ***Bakar je (gotovo) na kraju***

Era bakra za privatnu podatkovnu komunikaciju započela je s akustičnim spojnicama i oko 300 bit/s sredinom 80-ih godina. Od tada, bakrena tehnologija omogućila je sve veću propusnost. Razvoj s modemom završio je na 56.000 bit/s. Zahvaljujući grupiranju kanala, ISDN je omogućio 128.000 bit/s i to je već bilo čisto digitalno. Kasnije su se na tržištu pojavili DSL i VDSL s propusnostima do 50 Mbit/s. Svako povećanje propusnosti zahtijevalo je sve veće napore kako bi se izvuklo više iz bakrenih žica koje su izvorno bile dizajnirane za čistu telefoniju. Trenutna razina „super vektora“ omogućuje do 300 Mbit/s. Međutim, kabelski pravci moraju postajati sve kraći. Distributeri se, sve više približavaju korisnicima. Optička vlakna počinju tamo gdje bakar završava i duljina kabela nije presudan čimbenik, barem u urbanim područjima, odnosno zanemariv je. Sa FTTH, 100 Mbit/s simetrično (u oba smjera, u prijenosu i preuzimanju) je standard, a 1.000 Mbit/s je tehnički moguće dostići bez ikakvih problema, što je pitanje tarife.

- ***Optička vlakna su temelj interneta***

Dugi niz godina, okosnicu interneta činile su veze putem optičkih vlakana, bez čega globalne količine podataka ne bi bile dugoročno upravljive. Jedan od najmodernijih optičkih kabela je „Transatlantski telefonski kabel 14“ (TAT-14). Povezuje SAD s Europom i ima propusnost od 1.280 Gbit/s, tj. otprilike 1.280.000 Mbit/s. U međuvremenu, optička vlakna s FTTH stižu do krajnjeg korisnika i omogućuju brzine od 100 Mbit/s, 500 Mbit/s ili 1.000 Mbit/s bez ikakvih tehničkih trikova.

- ***Optička vlakna su održiva infrastruktura za sljedećih 50 godina***

FTTH zahtijeva potpuno novu infrastrukturu i stoga u početku značajno više rada i ulaganja, posebno u građevinarstvu. Potrebno je zakopati prazne cijevi i svako pojedino kućanstvo treba novu vezu. Prvo se moraju uzeti u obzir troškovi, nakon čega problem propusnosti može biti riješen za dugi niz godina. Čak su i sljedeće razine performansi (npr. do

[19] Winzer,P. Neilson,D., Chraplyvy,A.(2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Invited], Opt. Express 26, 24190-24239. https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-18-24190&id=396718

10 Gbit/s = 10.000 Mbit/s) izravno implementirane kod samih distributera. U tom slučaju potrebne su nove komponente. Pri tom optička vlakna ostaju u zemlji, dok, kućno ožičenje korisnika predstavlja moguću usko grlo. Trenutno se prelazi s optičkih vlakana na Gigabitni bakreni Ethernet. Optička vlakna za unutarnje ožičenje još su uvijek iznimka.

- ***Rad od kuće kao dio rješenja za prometne probleme***

Ukupno je 455.000 km zastoja bilo samo u Sjevernoj Rajni - Vestfaliji tijekom 2017. godine. Činjenica je da zastoji uzrokuju probleme za putnike i okoliš. Čak i ako se sredstva odmah stave na raspolaganje, planiranje prometa ostaje vrlo dugoročan problem. S druge strane, širenje širokopojasne mreže može se provesti gotovo u kratkom roku. U srednjem roku, nema zaobilaska optičkih vlakana. Aplikacije postaju sve više gladne podataka, tako da odgovarajuća propusnost mora biti dostupna i u kućnom uredu. No, ovdje se postavlja šire pitanje političke volje. Naime, nema pravog odgovora na vidljivu potrebu uvođenja obvezne regulacije rada od kuće ili barem jedne regulacije rada od kuće po tvrtki. Najbliže uvođenju zakonskog prava je Nizozemska.

- ***Razvoj propusnosti – FTTH je logičan razvoj***

Dobro poznati „Mooreov zakon“ kaže da se performanse procesora udvostručuju svakih 18 mjeseci. Autor Moore postavio je ovu teoriju davne 1965. godine i uglavnom se pokazala točnom do danas. Što se tiče propusnosti internetskih veza, postoji puno manje poznati „Nielsenov zakon“. Autor Nielsen iznio je usporedivu teoriju o razvoju propusnosti. Ovaj razvoj propusnosti traje oko 40 godina. Optička vlakna u obliku FTTH su samo sljedeći logičan korak u ovom razvoju.

- ***Sustavi za video konferencije zamjenjuju poslovna putovanja***

Profesionalni sustavi za video konferencije postaju sve popularniji posljednjih godina. Osobna razmjena je neophodna u većim projektima. No danas se ne mora putovati po cijelom svijetu da bi se razmijenile informacije. Veće tvrtke posebno su prepoznale prednosti video konferencija kroz veliki potencijal za uštede u putnim troškovima. Ekološki aspekt i povezano smanjenje CO2 otiska također su važni argumenti za korištenje video konferencija. Osnova za to je snažna internetska veza poput FTTH.

- ***Streaming usluge trebaju propusnost***

U Njemačkoj je 95% svih videoteka zatvoreno i zamijenjeno Netflixom, Amazon Primeom i Maxdomeom. Sa gledišta kupca to je očekivano, streaming usluge zapravo imaju samo prednosti: Nema putovanja za preuzimanje i vraćanje, udobnost i ušteda vremena vidljivi su istovremeno. U budućnosti u rezolucijama od 4K ili 8K i virtualnim putovanjima pomoću VR optike već su danas predvidljive. No, činjenica je da će sve ovo funkcionirati samo s dovoljno propusnosti.

- ***Optička vlakna su ekološki prihvatljiva***

Performanse optičkih vlakana su ogromne uz činjenicu da je tehnologija koja ih prati jednostavnija, posebno u usporedbi s bakrenom tehnologijom. Tehnički napori potrebni za povećanje podatkovne stope na bakru su se povećali. Za vektoring, distribucijske kutije na ulici sada također moraju biti opremljene aktivnom tehnologijom, što zahtijeva hlađenje komponenti. U prosjeku, svaki distributer troši 500 do 1.000 vati, koji trend je u porastu. Optička vlakna, s druge strane, imaju značajno manje aktivnih komponenti, što značajno smanjuje potrošnju energije.

- ***Nema više „do“ – puna propusnost za korisnika***

Ostvariva propusnost sa bakrom ovisi, između ostalog, o duljini linije do distributera i njegovoj iskorištenosti. Stoga se kao pravilo ne jamči propusnost, već se navodi maksimalna vrijednost koja nije uvijek ostvariva u praksi. U slučaju mobilnih komunikacija, ovisi o iskorištenosti pojedinih radio ćelija. Ovdje svi korisnici dijele kapacitet i performanse dotičnog radio stupa. Na primjer, ako mnogi kupci koriste streaming usluge istovremeno, brzina prijenosa drastično pada. Obećane vrijednosti često se mogu postići samo teoretski i pod idealnim uvjetima sa zajedničkim medijem. Optička vlakna u obliku FTTH završavaju ovo „do“ doba. Svaki korisnik dobiva vlastita optička vlakna u prostor, a ugovorom je dogovorena rezervirana propusnost.

# 4. POLAGANJE I TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

U ovom poglavlju opisuje se postupak pripreme i testiranje podmorskih optičkih kabela prije polaganja. Obrazlaže se postupak polaganja i testiranja pomoću optoelektroničkih instrumenata, daje opis tehničkih karakteristika instrumenata te uloga pojačala optičkog signala.

## 4.1. PRIPREMA I TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA PRIJE POLAGANJA

Polaganje podmorskih optičkih kabela obavlja se specijaliziranim brodovima koji postavljaju kabeli na morsko dno. Jedan od najučinkovitijih brodova za polaganje kabela koji je trenutno na tržištu je brod Livingstone (slika 7) koji ima mogućnost polaganja dvije trase istodobno i sa dva Vrtuljka (Carousela) u kojima se sprema kabel.

Ovi specijalizirani brodovi koriste precizne navigacijske sustave kako bi osigurali pravilno postavljanje. Kabeli se postavljaju na različitim dubinama, od nekoliko metara do nekoliko kilometara ispod površine oceana. Polaganje optičkog kabela s broda na lokaciji blizu obale u plitkoj vodi obavlja se u nekoliko faza:[20]

**Slika 7. Kabelopolagač Livingstone kompanije DEME**

Izvor: https://www.deme-group.com/news/living-stones-peak-production-levels-ensure-inter-array-cable-laying-works-seamade-are

[20].Papapavlou, C., Paximadis, K., Uzunidis, D., Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15

- **Planiranje rute -** Prije početka polaganja, planira se ruta kabela. To uključuje analizu morskog dna, geoloških karakteristika, ekoloških uvjeta i potreba korisnika. Ruta se određuje tako da minimizira rizike od oštećenja i osigura optimalnu komunikacijsku učinkovitost.
- **Priprema kabela -** Prije polaganja, optički kabel se priprema na kopnu. To uključuje pripremu i montažu kabela, uključujući optička vlakna, vanjsku zaštitu i druge potrebne komponente. Kabel se može omotati oko velikih bubnjeva kako bi se olakšao transport i rukovanje (slika 8).

**Slika 8. Cable Instalation Spread kabelopolagača Livingstone**

Izvor: Slikao student neposredno prije instalacije kabela na brod

Kabel se dostavlja s kopna preko niza valjaka (rollera) te uvlači na brod i sprema oko modificiranog valjkastog kvadranta u plovilu zvanog vrtuljak (Carousel) (slika 9).

**Slika 9. Presjek broda prikazuje pozicije dvaju vrtuljka u utrobi broda. Pogodnije od spremanja kabela na palubi radi vremenskih uvjeta.**

Izvor: https://www.ship-technology.com/projects/living-stone-multi-purpose-vessel/

Nakon što kabel dospije na brod na način da je uvučen u vrtuljak (slika 10) fizički se učvršćuje u centru vrtuljka te se mora pripremiti prije nego se namatanje cijelog kabela nastavi (slika 11).

**Slika 10. Uvlačenje kabela u vrtuljak te fiksiranje u središte**

Izvor: Slikao student

Slijedi postavljanje Reflektometra koji obavlja nadzor (core test) optičkih vlakana prilikom cijelog procesa namatanja (slika 11).[21]

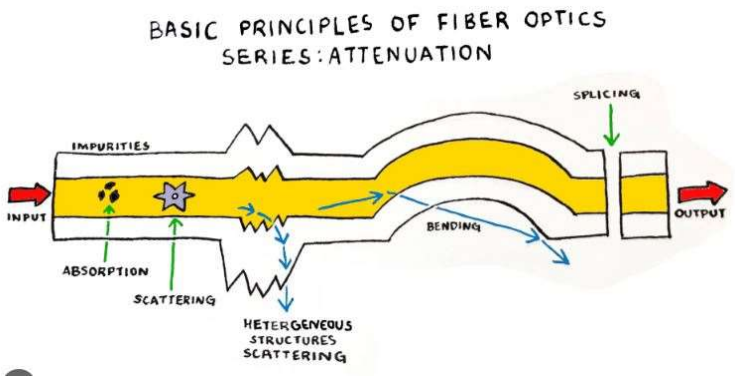
**Slika 11. Priprema vlakna za testiranje**

Izvor: Slikao student

- **Testiranje optičkog kabela tijekom namatanja na brod -** Prilikom namatanja podmorskog optičkog kabela s kopna na brod, kontroliraju se sljedeći elementi:

[21] Papapavlou, C., Paximadis, K., Uzunidis, D., Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15

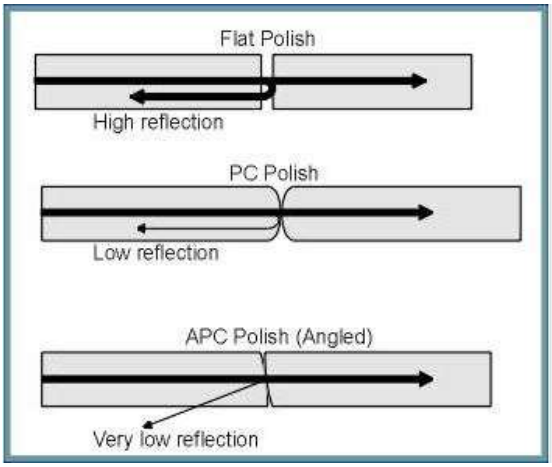
- **Integritet kabela**, pri čemu se provjeravaju mehanička i strukturna oštećenja. Provjerava se ma li kabel fizičkih oštećenja kao što su ogrebotine, pukotine ili lomovi koji su mogli nastati tijekom rukovanja ili transporta, te strukturni integritet koji osigurava da kabel nije previše savijen ili uvijen, što može uzrokovati unutarnje oštećenje vlakana.
- **Optičke performanse** uključuju provjeru slabljenje signala (attenuation) kada se mjeri koliko signal slabi dok prolazi kroz kabel (slika 12). Povećano slabljenje može ukazivati na probleme s kvalitetom vlakna ili spojnim točkama.




**Slika 12. Prikaz atenuacije optičkog kabela**

Izvor: https://www.truecable.com/blogs/cable-academy/basic-principles-of-fiber-optics-series-attenuation

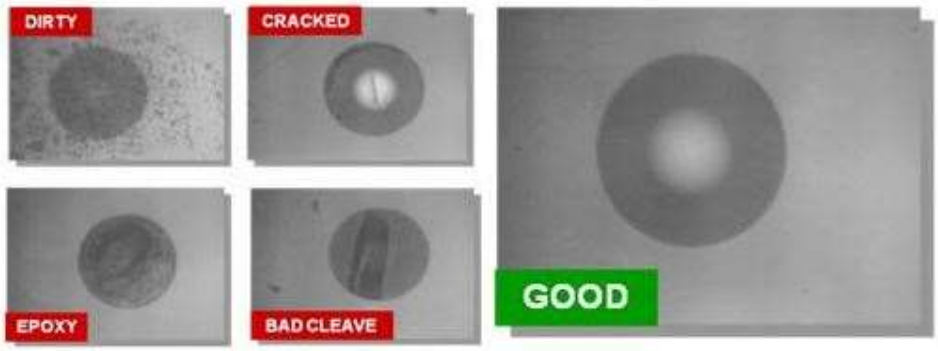
- **Povratni gubitak (return loss) -** provjerava se količina svjetlosti koja se vraća natrag prema izvoru zbog nesavršenosti ili oštećenja u vlaknu (slika 13).




**Slika 13. Prikaz refleksije - povratnog gubitka**

Izvor: http://www.fibrepulse.com/technical/return-loss-testing/

- **Kontinuitet vlakna** se ispituje na način da se otkrivaju prekidi ili lomovi u vlaknu koji mogu potpuno prekinuti signal, na način da se obavlaj lokacija problema pomoću optičkog reflektometra u vremenskoj domeni (eng. Optical Time Domain Reflectometer - OTDR)[22] identificira se točna lokacija bilo kakvih prekida ili oštećenja duž kabela.
- **Kvaliteta spojeva (splice)** ili gubitak na spojevima provjerava se između dijelova vlakna, jer loši spojevi mogu uzrokovati značajan gubitak signala. Učvršćivanjem spojeva osigurava se da su spojevi pravilno učvršćeni i zaštićeni od vanjskih utjecaja.
- **Funkcionalnost konektora** odnosi se na čistoću i kvalitetu konektora gdje se provjerava čistoća i stanje konektora, budući prljavština i oštećenja mogu uzrokovati gubitak signala i refleksije (slika 14). Slijedi priključivanje kada se testira pravilno spajanje i funkcionalnost konektora.




**Slika 14. Provjera čistoće na konektorima**

Izvor: https://www.datastrait.com/blog-news/5-facts-about-your-fiber-optic-cable-connection-cleanliness

- **Okolišna (Environmentalna) otpornost** podrazumijeva otpornost na uvjete okoline. Kabel se testira na otpornost prema uvjetima okoline, kao što su vlaga, temperatura i sol, koji se mogu očekivati tijekom uporabe na moru.
- **Korištenje** optičkog reflektometra (OTDR) - optički reflektometar u vremenskoj domeni (OTDR) je ključan alat u ovom procesu. OTDR šalje optičke impulse kroz kabel i mjeri reflektiranu svjetlost kako bi stvorio profil kabela, omogućujući detekciju i analizu gore

[22] Rao, Y., Wang, Z., Wu, H., Ran, Z., Han, B. (2021). Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR). Photonic Sensors. 11. 1-30. 10.1007/s13320-021-0619-4. https://www.researchgate.net/publication/348697893_Recent_Advances_in_Phase-Sensitive_Optical_Time_Domain_Reflectometry_F-OTDR

navedenih problema. OTDR omogućuje tehničarima da identificiraju točna mjesta problema i procijene ukupnu kvalitetu i spremnost kabela za instalaciju na brod.

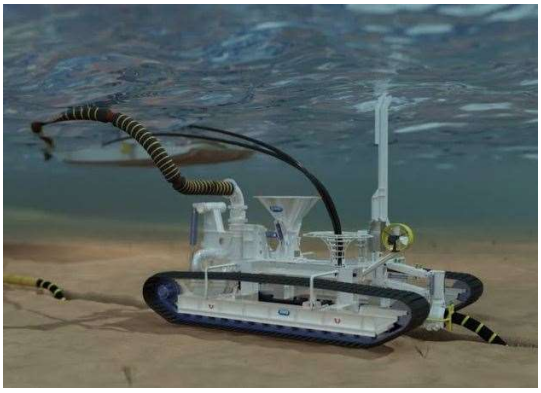
## 4.2. POLAGANJE I TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

Kabel se postavlja na brod ili posebno opremljenu platformu za polaganje. Način polaganja može varirati ovisno o dubini mora, morskom dnu i okolišnim uvjetima (slika 15, 16). Postoje različite metode polaganja, uključujući spuštanje kabela s broda, uporabu podmornica ili korištenje specijalizirane opreme poput kabela za polaganje na dno.[23]

**Slika 15. Trencher – kopač koji se koristi za iskope kanala prije samog polaganja kabela na morsko dno**

Izvor: https://www.smd.co.uk/ccc-ue-signs-contract-smd-hard-ground-subsea-trenching-machine/

[23] Papapavlou, C., Paximadis, K., Uzunidis, D., Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15



**Slika 16. Primjer podvodnog kopanja**

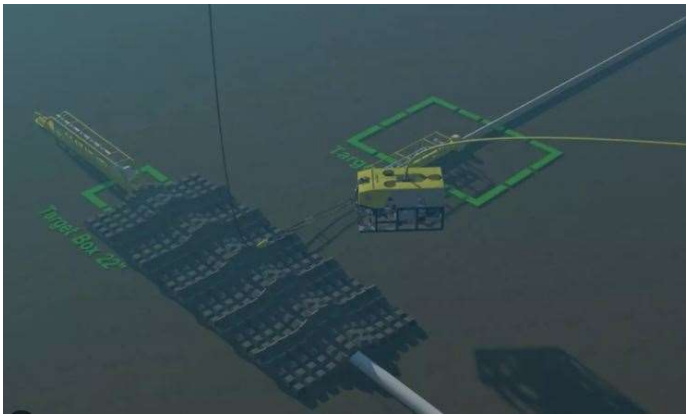
Izvor:https://www.youtube.com/watch?v=N_XT_raoSBo&ab_channel=SMD-SubseaTechnology

U situacijama kada se polaže više optičkih kabela na istu površinu ili već postoje optički kabeli, kako bi se izbjeglo križanje i spriječili kvarovi potrebna je dodatna zaštita. Tada se postavljaju tzv. podmorski madraci (slika 17, 18) koji osiguravaju i štite kabeli.[24]

**Slika 17. Podmorski madrac. Koristi se kada se podvodni kabeli križaju**

Izvor: https://pipeshield.com/products/geo-mat-and-anti-abrasion-solutions/

[24] https://pipeshield.com/sectors/special-projects/



**Slika 18. Podvodni madrac**

Izvor: https://pipeshield.com/products/geo-mat-and-anti-abrasion-solutions/

Nakon što je kabel položen na dno mora, obavlja se povezivanje krajeva kabela s kopnenim postrojenjem ili drugim kabelima, ovisno o potrebama mreže. Slijedi povezivanje, te se kabel testira kako bi se osigurala ispravnost i pouzdanost prijenosa podataka. Ako je testiranje uspješno, kabel se stavlja u pogon i postaje dio globalne komunikacijske infrastrukture. Nakon što je kabel stavljen u pogon, provodi se redovito održavanje i nadzor kako bi se osigurala njegova dugotrajnost i pouzdanost. To može uključivati inspekcije, popravke ili zamjene dijelova kabela prema potrebi. Svaki od ovih koraka zahtijeva pažljivo planiranje, suradnju različitih stručnjaka i upotrebu posebne opreme kako bi se osiguralo uspješno polaganje i funkcioniranje podvodnih kabela.

## 4.3. TESTIRANJE PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA POMOĆU OPTOELEKTRONIČKOG INSTRUMENTA

Testiranje je važan korak kako bi se osigurala ispravnost i pouzdanost prijenosa podataka. Uobičajeno se provode testiranja kako slijedi:

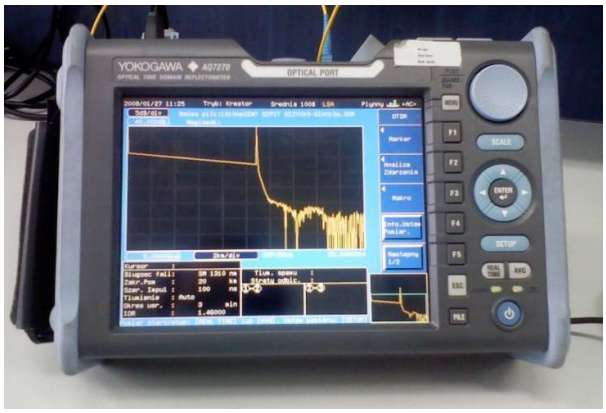
- **Optička propusnost -** provjerava se sposobnost podmorskog optičkog kabela da propusti svjetlost kroz optička vlakna bez gubitaka ili smetnji. Koriste se optički izvori svjetla i detektori za mjerenje gubitaka svjetlosti duž duljine podmorskog optičkog kabela.

- **Kontinuitet vlakana -** provjerava se cjelovitost optičkih vlakana u podmorskom optičkom kabelu. Posebna oprema koristi se za slanje svjetlosnih impulsa kroz svako optičko vlakno kako bi se provjerio kontinuitet i otkrilo bilo kakve prekide ili oštećenja.
- **Izolacija i prekid –** provjerava se izolacija između optičkih vlakana i otkriva moguće prekide u podmorskom optičkom kabelu. Mjerni uređaji koriste se za mjerenje otpora između vlakana i otkrivanje prekida uzrokovanih oštećenjima izolacije.
- **Električni kontinuitet -** provjerava se električni kontinuitet podmorskog optičkog kabela, posebno ako kabel sadrži i električne vodiče za napajanje dodatne opreme. Mjerni uređaji koriste se za provjeru kontinuiteta i izolacije električnih vodiča.
- **Testiranje pod opterećenjem** – provjerava se ispravnost podmorskog optičkog kabela pod stvarnim radnim uvjetima, uključujući opterećenje prometom podataka. Koriste se specijalizirani uređaji za simuliranje stvarnog opterećenja i provjeru performansi podmorskog optičkog kabela.
- **Testiranje pri prijemnom kraju** - nakon što je podmorski optički kabel položen i priključen na mrežu, obavlja se testiranje na prijemnom kraju kako bi se osigurala ispravnost prijenosa podataka do krajnjih korisnika.

Ovi testovi se obično provode prije puštanja kabela u pogon, kao i tijekom redovitog održavanja kako bi se osigurala njegova dugotrajnost i pouzdanost. Svaki test može se prilagoditi specifičnim potrebama i karakteristikama kabela i mreže.

Veoma važan instrument za testiranje podmorskih optičkih kabela je OTDR. Optički reflektometar u vremenskoj domeni je optoelektronički instrument koji se koristi za karakterizaciju optičkog vlakna (slika 19).[25] To je optički ekvivalent elektroničkog reflektometra u vremenskoj domeni koji mjeri impedanciju kabela ili prijenosne linije koja se testira. OTDR ubacuje seriju optičkih impulsa u vlakno koje se testira i iz istog kraja vlakna izvlači svjetlost koja je raspršena (Rayleighovo raspršenje) ili reflektirana natrag s točaka duž vlakna.

[25] Rao, Y., Wang, Z., Wu, H., Ran, Z., Han, B. (2021). Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR). Photonic Sensors. 11. 1-30. 10.1007/s13320-021-0619-4. https://www.researchgate.net/publication/348697893_Recent_Advances_in_Phase-Sensitive_Optical_Time_Domain_Reflectometry_F-OTDR




**Slika 19. Optički reflektometar u vremenskoj domeni**

Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_time-domain_reflectometer

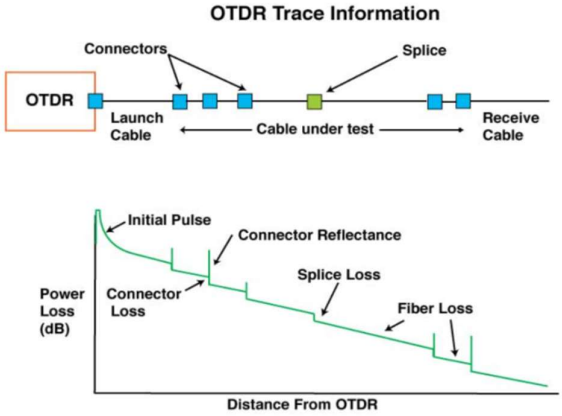
OTDR-a je izuzetno pouzdan i kvalitetan instrument obzirom na opseg mjerenja, i sposobnost da razluči i izmjeri blisko razmaknute događaje, brzini mjerenja, točnosti i činjenici da zadovoljavajuće funkcionira u raznim ekstremnim uvjetima i nakon različitih vrsta fizičkih oštećenja. Kvaliteta i pouzdanost instrumenta ocjenjuje se na temelju cijene, dostupnih funkcija, veličine, težine i jednostavnosti korištenja. Obilježja za specifikaciju kvalitete OTDR-a su:[26]

- **Točnost** - definirana kao ispravnost mjerenja, tj. razlika između izmjerene vrijednosti i stvarne vrijednosti mjerenog događaja.
- **Opseg mjerenja** – se definira kao maksimalno slabljenje koje može biti između instrumenta i mjerenog događaja, a da instrument još uvijek može izmjeriti događaj unutar prihvatljivih granica točnosti.
    - **Rezolucija instrumenta** - koliko blizu mogu biti dva događaja da bi se još uvijek prepoznala kao sasvim odvojena. Samo trajanje mjernog impulsa i interval uzorkovanja podataka pridonose ograničenju rezolucije za OTDR. Što je kraće, to je bolja rezolucija, ali tada je kraći opseg mjerenja. Rezolucija je ograničena kada se jake refleksije vrate do OTDR-a i tada se događa privremeno preopterećenje detektora. Tada je potrebno neko vrijeme da instrument razluči drugi

[26] Ibidem

događaj na vlaknu. Različiti su pristupi proizvođača OTDR-a, pojedini koriste postupak maskiranja za poboljšanje rezolucije.

Zahtjevi za pouzdanost i kvalitetu OTDR-a specificirani su u generičkim zahtjevima za OTDR tip opreme. Prikupljena raspršena ili reflektirana svjetlost koristi se za karakterizaciju optičkog vlakna. Jačina povratnih impulsa mjeri se i integrira kao funkcija vremena, te se prikazuje kao funkcija dužine vlakna (slika20).[27]




**Slika 20. Prikaz informacija sa optičkog reflektometra u vremenskoj domeni**

Izvor: https://www.thefoa.org/tech/ref/quickstart/OTDR.html

Funkcioniranje OTDR-a je veoma složeno, a u nastavku se daje obrazloženje najvažnijih funkcija i pojmova.[28]

- **Rayleighvo raspršenje -** U vlaknu se svjetlost raspršuje u svim smjerovima, uključujući nešto svjetlosti koja se vraća prema OTDR-u. OTDR koristi ovu natrag raspršenu svjetlost za uzorkovanje podataka duž raspona vlakna kako bi napravio trag i obavio izračune.

[27] Papapavlou, C., Paximadis, K., Uzunidis, D., Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15

[28] Rao, Y., Wang, Z., Wu, H., Ran, Z., Han, B. (2021). Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR). Photonic Sensors. 11. 1-30. 10.1007/s13320-021-0619-4. https://www.researchgate.net/publication/348697893_Recent_Advances_in_Phase-Sensitive_Optical_Time_Domain_Reflectometry_F-OTDR

- **Fresnelovo odbijanje -** Kada svjetlost putuje kroz jezgru optičkog vlakna i naiđe na materijal drukčije gustoće poput zraka, dio svjetlosti se odbija natrag prema OTDR-u dok ostatak svjetlosti nastavlja izlaziti iz materijala. Ove iznenadne promjene u gustoći materijala javljaju se na krajnjem mjestu, prekidima vlakna i određenim vrstama optičkih konektora (UPC) rezultirajući u Fresnelovom odbijanju. Količina odbijanja ovisi o veličini promjene na sučelju dva materijala. OTDR koristi Fresnelovo odbijanje kako bi precizno odredio položaj prekida vlakna.
- **Dinamički raspon -** Dinamički raspon OTDR-a je snaga laserskog izvora i naveden je u dB vrijednosti. Veliki dinamički raspon potreban je za testiranje duljih kabela kako bi se omogućio inherentni gubitak nazvan atenuacija. Tipične vrijednosti atenuacije za kabele jednog načina rada su 1310 = 0,35 dB/km, 1550 = 0,20 dB/km i 1625 = 0,22 dB/km. Ovo će varirati među različitim proizvođačima.
- **Valna duljina –** Postoje tri uobičajene valne duljine povezane s OTDR testiranjem vlaknastih optičkih kabela, to su 1310nm, 1550nm i 1625nm. Što su dulje valne duljine (1550-1625), ukazivat će na manji ukupni gubitak (dB/km) od kraćih valnih duljina (1310) budući da pokazuju manji raspršeni gubitak, što će se vidjeti kao postupniji nagib na trag. Međutim, dulje valne duljine su mnogo osjetljivije na savijanje. Valne duljine su korisne za pronalaženje grešaka pri kojima svjetlost istječe na mjestima pretjeranog savijanja. Ova savijanja nazivaju se makro savijanjima i uzrokovat će pretjerani gubitak; ako događaj ima veći gubitak na 1550 ili 1625 nego što pokazuje na 1310, vrlo je vjerojatno da ima makro savijanje koje prelazi minimalni radijus savijanja.
- **Mrtve zone -** su udaljenost nakon događaja gdje se signal oporavlja, pa se precizno mjerenje ne može uzeti. Zato je važno koristiti predpočetni ili lansirni kabel obično dužine oko jednog kilometra. To omogućuje da se prvi komad kabela pod testom precizno analizira.
- **Duhovi -** su događaji koji se pojavljuju na tragovima, a zapravo nisu prisutni. Čest uzrok tome je kontaminacija i ogrebotine na optičkim konektorima što uzrokuje visoku Fresnelovu refleksiju. Pokazatelj duha bit će visoki nagib refleksije na 1.000 m koji se odbija na 2.000 m, zatim na 3.000 m itd. Drugi uzrok duhova može biti kada se raspon udaljenosti nije postavio dovoljno visoko da se vidi kraj kabla. Budući da se Reflektometar se oslanja na vidljivost krajnjeg mjesta, što može uzrokovati nepravilna očitanja i duhove.

- **Širina impulsa** broji se u nanometrima, što je milijarditi dio metra. Trajanje laserskog impulsa se može promijeniti ovisno o kablu pod testom. Dulja širina impulsa ubacit će više optičke snage u vlakno i stoga će putovati dalje niz vlakno, no to može biti na štetu neke rezolucije na bliskom kraju i tako stvoriti veću mrtvu zonu. Kraća širina impulsa pružit će bolju rezoluciju na bliskom kraju i manje mrtve zone, ali može uzrokovati pretjeranu buku na dalekom kraju. Tada je potrebno ponovno isprobati kabel i utvrditi eventualne pogreške.
- **Prosječenje** je vrijeme tijekom kojeg OTDR uzorkuje podatke duž kabela na određenom testu. Što je duže prosječenje, to je više podataka bolja je rezolucija. Navedeno se nadovezuje na širinu impulsa. Primjerice, ako se prosječit kabel 15 sekundi koristeći 100 ns i doživljave visoka buka, može se povećati vrijeme prosječenja na 30 sekundi kako bi se smanjila razina buke. U suprotnom se može povećati impuls dok se ne dobije kvalitetan glatki trag.

## 4.4. TIPOVI OPTOELEKTRONIČKOG TESTNOG INSTRUMENTA

Uobičajeni tipovi OTDR testne opreme su slijedom:[29][30]

- OTDR sa punim funkcijama - Tradicionalni OTDR su veći, teži i time slabije prenosivi od ručnih OTDR-a. Karakteriziraju kao veliki, no oni su smo dio onih ranijih generacija OTDR-a. Često OTDR s punim funkcijama ima glavnu jedinicu koja može biti opremljena multifunkcionalnim jedinicama za mnoge zadatke mjerenja vlakana. Uobičajeni su veći zasloni u boji. OTDR s punim funkcijama često ima veći opseg mjerenja od drugih tipova OTDR opreme. Koristi se u laboratorijima i na terenu za teška mjerenja vlakana. Većina OTDR-a s punim funkcijama napaja se iz mreže i/ili baterije.
- Ručni OTDR i lokator prekida vlakna - Ručni (ranije mini) OTDR-i i lokatori prekida vlakna dizajnirani su za otklanjanje grešaka na optičkim mrežama u terenskim uvjetima, često koristeći baterijsko napajanje. Dva tipa instrumenata pokrivaju spektar pristupa optičkom vlaknu koje koriste pružatelji komunikacija. Ručni, jeftini OTDR-i zamišljeni su da budu laki za korištenje, lagani i sofisticirani OTDR-i. Oni mogu imati manje

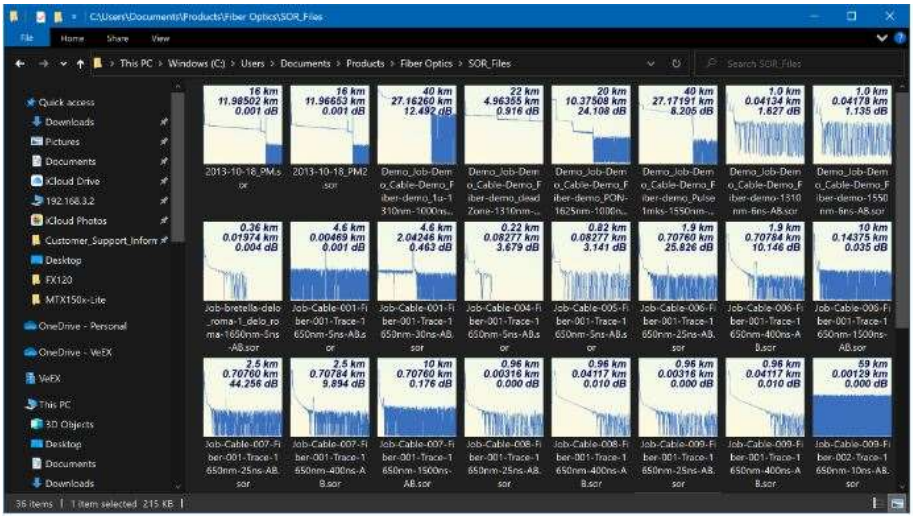
[29] https://www.genuinemodules.com/what-are-the-three-types-of-otdr_a4625
[30] Rao, Y., Wang, Z., Wu, H. et al. (2021). Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR). *Photonic Sens* **11**, 1–30. https://doi.org/10.1007/s13320-021-0619-4 https://link.springer.com/article/10.1007/s13320-021-0619-4#citeas

funkcija nego OTDR s punim funkcijama. Mogu se koristiti u kombinaciji s PC softverom za prikupljanje podataka i sofisticiranu analizu podataka. Ručni OTDR-i se uobičajeno koriste za mjerenje veza vlakana i lociranje prekida vlakana, točaka visokog gubitka i refleksije, od kraja do kraja gubitka i optičkog povratnog gubitka (ORL). Lokatori prekida vlakna zamišljeni su kao niskobudžetni instrumenti specifično dizajnirani da odrede lokaciju katastrofalnog događaja na vlaknu, npr., prekida vlakna, točke visoke refleksije ili visokog gubitka. Lokator prekida vlakna je optoelektronički mjerač udaljenosti dizajniran da mjeri samo udaljenost do katastrofalnih događaja na vlaknu. Namjera je da ručni OTDR-i i lokatori prekida vlakna budu dovoljno jeftini da bi tehničari na terenu mogli biti opremljeni jednim kao dijelom standardnog alata.

- C - OTDR – Koherentni OTDR je instrument koji omogućava da se točno izmjeri i okarakterizira optička podmorska mreža omogućujući precizno lociranje kvarova unutar 10 metara. Radi na način da koristi Rayleighovo povratno raspršenje uzrokovano nečistoćama inherentnim u optičkim vlaknima kako bi reflektirao svjetlost natrag do izvora, slično kao standardni OTDR. Kako se podmorska mreža ili podmorski dio mreže sastoji ne samo od optičkih vlakana, već i od EDFA (erbijev-dopirani optički pojačivač), standardna OTDR tehnologija nije izvediva opcija. EDFA pojačava samo u prednjem smjeru i koristi komponente koje su jednosmjerne, stoga povratno raspršena svjetlost ne može se vratiti putem svog originalnog puta. Većina instaliranih i planiranih sustava uključuje optički povratni put unutar EDFA kućišta, ovaj povratni put omogućuje povratno raspršenoj svjetlosti da se vrati do C-OTDR-a na drugom vlaknu para. C-OTDR radi na istim osnovnim principima kao i OTDR, tj. emitira svjetlost u vlakno, a zatim promatra refleksije (ili povratno raspršenje) iz testiranog vlakna. Također ima dodatnu mogućnost emitiranja na podesivoj uskoj valnoj duljini što omogućuje korištenje uređaja u aktivnoj mreži zajedno s prometom korisnika unutar DWDM mreže. Na prijemnoj strani OTDR-a postoje nekoliko poboljšanja u odnosu na standardni OTDR. Prva velika razlika je da je ulaz C-OTDR-a filtriran kako bi uklonio aktivne DWDM kanale kao i dodatnu buku. Druga i najvažnija razlika je koherentna detekcija. Koherentna detekcija je način ponovnog ubrizgavanja originalne emitirane valne duljine što omogućava prikaz informacija isključivo na toj valnoj duljini. Ova metoda uklanja svu ostalu buku omogućujući veliko poboljšanje omjera signala i buke, uključujući rekonstrukciju podataka ispod normalne razine šuma.

- RTU u RFTS-ovima (RTU – Remote Test Unit) - je modul za testiranje RFTS-a (Remote Fiber Test System) opisan u generičkim zahtjevima za daljinske sustave za testiranje vlakana (RFTSS). RFTS omogućuje automatsko testiranje vlakana s centralne lokacije. Centralno računalo koristi se za kontrolu rada OTDR sličnih testnih komponenti smještenih na ključnim točkama mreže vlakana. Testne komponente skeniraju vlakna kako bi locirale probleme. Ako se pronađe problem, bilježi se njegova lokacija i obavještava osoblje za započinjanje procesa popravka. RFTS također omogućuje izravan pristup bazi podataka koja sadrži zapise o vlaknima. Budući da OTDR-i i OTDR slična oprema imaju mnogo primjena u komunikacijskoj industriji, radna okruženja uvelike se razlikuju, u zatvorenim i na otvorenim prostorima. Najčešće se, međutim, koriste u kontroliranim okruženjima. Unutarnja okruženja uključuju kontrolirana područja kao što su centralne kancelarije (CO), opremne kolibe ili kontrolirani okviri za okoliš (CEV). Upotreba u vanjskim okruženjima je rjeđa.
- OTDR format podataka - Krajem 1990-ih, predstavnici OTDR industrije i korisnici OTDR-a razvili su jedinstveni format podataka za pohranu i analizu podataka o vlaknima. Ovaj format temelji se na specifikacijama u GR-196, Generički zahtjevi za OTDR tip opreme. Kako su napredovala istraživanja, identificirana su neslaganja u formatu, zajedno s područjima nesporazuma među korisnicima. Od 1997. do 2000. godine, posebna grupa specijalista za softver OTDR dobavljača pokušala je riješiti probleme u tadašnjem Bellcore OTDR formatu podataka SOR (slika 21). Definiran od strane Belcore/Telcordia SR-4731, standardni OTDR zapisni format datoteke koristi se kao otvoreni industrijski standardni format za pohranu rezultata testiranja OTDR (tzv. trase), koji je uobičajeno korišten od strane svih dobavljača za međusobnu kompatibilnost platformi.[31] Sadrži podatke o trasi vlakna, koji uključuju udaljenosti, refleksiju, gubitak i mjerenja prigušenja vlakna, zabilježene od strane OTDR instrumenta tijekom testiranja optičkog kabela.

[31] Potpuna kompatibilnost među svim dobavljačima ne može biti zajamčena, ako/kada drugi dobavljači odluče prilagoditi svoje SOR datoteke vlasničkim podacima Uz zadani Windows File Explorer, SOR datoteke se ne prepoznaju i moraju se otvoriti pomoću aplikacije za analizu OTDR-a (kao što je Fiberizer) kako bi se konačno vidio njihov sadržaj i identificirala ona prava.



**Slika 21. SOR datoteke (Fiberizer)**

Izvor: https://kb.veexinc.com/en/knowledge/is-it-possible-to-preview-otdr-sor-files-as-windows-thumbnails

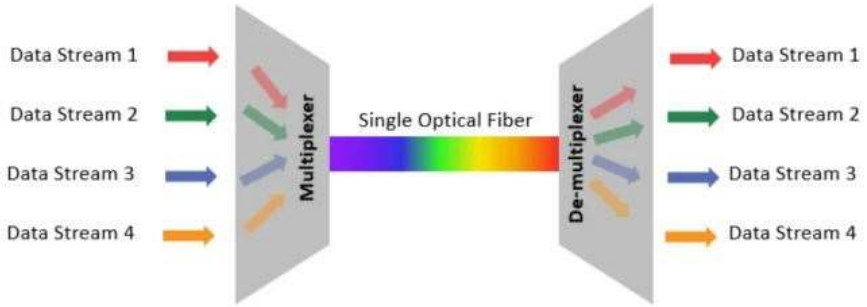
## 4.5. POJAČALO PODMORSKOG OPTIČKOG KABELA

Podmorski optički kabeli koji prenose internetski promet diljem svijeta izrađeni su od vlakana od silicijevog stakla,[32] koja su poznata većini mrežnih inženjera. Međutim, podmorski optički kabeli moraju omogućiti svjetlosti putovanje na vrlo velike udaljenosti uz minimalno slabljenje, pa se za podmorske primjene koristi G.654 podskup vlakana.

Podmorski optički kabeli koriste tehnologiju gustog multipleksiranja valnih duljina (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM) za prijenos velike količine podataka dopuštajući različitim tokovima podataka u obliku više valnih duljina svjetlosti da se istovremeno prenose preko jedne vlaknaste infrastrukture.

Na slici (slika 22) daje se prikaz DWDM tehnologije gdje uzima više tokova podataka koji rade na različitim valnim duljinama i kombinira ih za prijenos preko jednog optičkog vlakna.

[32] Daigond, A., Rani.K.R.U. & Aski, A. (2021). A Review on Importance of DWDM Technology in Optical Networking. Journal of University of Shanghai for Science and Technology. 23. https://www.researchgate.net/publication/352503163_A_Review_on_Importance_of_DWDM_Technology_in_Optical_Networking




**Slika 22. Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)**

Izvor: https://www.ufispace.com/company/blog/what-is-dwdm-its-uses-benefits-components

Podmorska optička vlakna obično su tipa G.654A-D, što znači da su jednomodna i imaju bolje prigušenje od većine uobičajenih optičkih kabela koji se koriste na kopnu.[33] Vlakna G.654E pripadaju istoj obitelji vlakana, ali se obično koriste za specifičnije kopnene primjene koje zahtijevaju još manji gubitak signala.

Nisko prigušenje ili mali gubitak signala važan je, budući prelazak oceana znači da će svjetlost putovati znatne udaljenosti. Vlakna usklađena sa standardom G.654 imaju valnu duljinu nulte disperzije na oko 1.300 nm i optimizirana su za uporabu u rasponu od 1.500 nm do 1.600 nm. Prigušenje je u rasponu od 0,15 dB/km do 0,17 dB/km, što znači da je gubitak signala vrlo mali na dugim udaljenostima. Međutim, prigušenje nije nula, pa se signal mora ponoviti ili pojačati na određenim točkama na putu vrlo dugih kabela.[34]

Pojačala se postavljaju otprilike svakih 70 km kako bi omogućila signalu da putuje na velike udaljenosti uz održavanje integriteta signala. Većina podmorskih kabela napaja se s oko 20 kV s oba kraja. Svaki izvor napajanja napaja polovicu pojačala u liniji. Ako se izgubi napajanje s jednog kraja, drugi izvor napajanja može napajati pojačala duž cijelog kabela dok se problem s napajanjem ne riješi. Pojačala ili repetitori (slika 23), instalirana su u liniji kao dio kabela kako bi obnovili signal.

[33] Papapavlou, C., Paximadis, K., Uzunidis, D., Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15
[34] Ibidem

**Slika 23. Tipično pojačalo podmorskog kabela**

Izvor: https://www.kentik.com/blog/diving-deep-into-submarine-cables-undersea-lifelines-of-internet-connectivity/

Osnovne funkcije pojačala su:

- **Položaj** - Pojačala su instalirana unutar podmorskog optičkog kabela, otprilike svakih 70 kilometara, kako bi se osiguralo da signal ostane jak i kvalitetan tijekom cijelog puta.
- **Napajanje -** Većina podmorskih optičkih kabela napaja se naponom od oko 20 kilovolta s oba kraja kabela. Svaki izvor napajanja napaja polovicu pojačala. Ako jedan izvor napajanja zakaže, drugi izvor može preuzeti napajanje svih pojačala dok se problem ne riješi.

Ključne karakteristike pojačala su:

- **Niska disperzija -** 654 vlakna imaju nisku disperziju na valnim duljinama oko 1300 nm i optimizirana su za rad u rasponu od 1500 nm do 1.600 nm (slika 24)
- **Nizak gubitak signala** - Attenuacija je u rasponu od 0,15 dB/km do 0,17 dB/km, što znači vrlo malo gubitka signala na velikim udaljenostima
- **Obnova signala** Pojačala unutar kabela služe za obnavljanje i pojačavanje signala, omogućujući prijenos podataka preko oceana bez gubitka kvalitete.

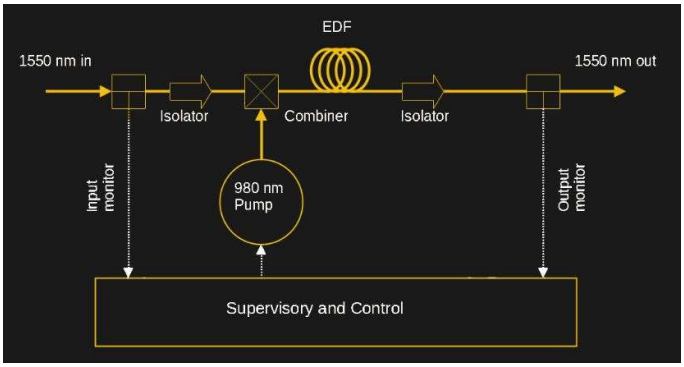
Dijelovi pojačala su:[35]

- optički pojačivač koji predstavlja glavnu komponentu koja pojačava optički signal

[35] Ibidem

- napajanje koje osigurava električnu energiju potrebnu za rad pojačivača i
- kućište koje ima funkciju zaštite i koje štiti osjetljive komponente od vanjskih utjecaja, poput visokog pritiska vode i korozije

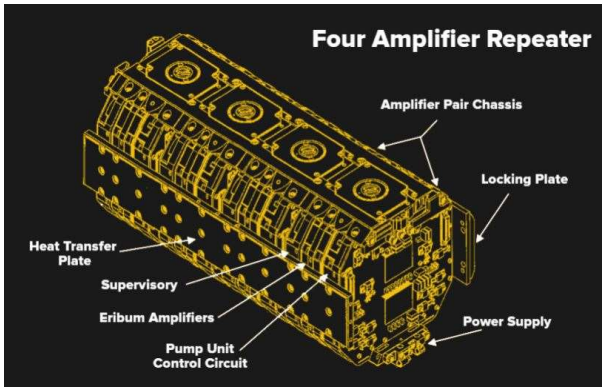
Pojačala su ključna za globalnu komunikaciju budući omogućuju prijenos podataka na velikim udaljenostima, povezuju kontinente i omogućujući brz i pouzdan internet te ostale komunikacijske usluge. Ova tehnologija je od vitalne važnosti za suvremeni svijet budući omogućava neprekidan protok informacija i podržava međunarodne komunikacijske mreže koje su temelj globalne ekonomije i povezivanja ljudi diljem svijeta.




**Slika 24. EDFA shema. Ulazni signal na 1.550 nm spojen je sa svjetlom od 980 nm iz lasera pumpe u petlji doziranoj erbijem, koji pojačava signal stimuliranom emisijom**

Izvor: https://hackaday.com/2023/08/08/under-the-sea-optical-repeaters-for-submarine-cables/

Kod podmorničkih repetitora, redundancija je naziv igre. Pojedinačne komponente su, naravno, odabrane za visoku pouzdanost. Ali na kraju nešto neće uspjeti, stoga je ključno imati sigurnosnu kopiju odmah dostupnu. To je najočitije kod rasporeda pumpnih dioda, koje su očito najvjerojatnije komponente koje će se istrošiti. Rani podmorski EDFA koristili su „2×2“ redundancijsku shemu, gdje je svaki modul pojačala koji je opsluživao par vlakana za prijenos i prijem imao dva lasera pumpe koji su dijelili zajednički pogonski krug (slika 25). Ovo je pružilo barem neku rezervu; u slučaju kvara jednog lasera pumpe, kabelski operateri mogli su se prebaciti na pomoćnu pumpu.




**Slika 25. Redudancijsko pojačalo 2X2**

Izvor: https://hackaday.com/2023/08/08/under-the-sea-optical-repeaters-for-submarine-cables/

Kvalitetnija shema je „4×2“ redundantnost, gdje svaki par pojačala dijeli četiri pumpna lasera povezana zajedno optičkim spojnikom. Budući da jedna pumpa može pokrenuti i prijenosna i prijamna vlakna, pojačalo može raditi i ako tri pumpe zakažu. Još bolje je koristit „uzgoj pumpi“, u kojem je dostupno do 16 pumpi za usmjeravanje do čak 16 parova vlakana kroz složenu komutirajuću mrežu optičkih vlakana. Pump farming pruža veliku količinu redundancije, kao i fleksibilnost rekonfiguracije podmorskog optičkog kabela u hodu.

# 5. KVAROVI I METODE POPRAVAKA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

Poglavlje pet opisuje procedure u postupku analize i popravka kvara, opisuje tehniku lociranja kvara te metode popravaka kvara. U ovom poglavlju daje se praktičan primjer mjerenja optičke snage tijekom testiranja podmorskog optičkog kabela tijekom popravka.

## 5.1. PROCEDURE U POSTUPKU ANALIZE I POPRAVKA KVARA

Kvarovi i metode popravaka podmorskih optičkih kabela mogu biti veoma složene ako se kvar ne otkrije na vrijeme i zahtijeva specijaliziranu opremu i stručnost. Slijedi prikaz postupka otkrivanja i popravka kvara koji obuhvaća nekoliko faza.[36]

- **Otkrivanje kvara -** Prvi korak je otkriti lokaciju kvara na podmorskom optičkom kabelu. To se može postići pomoću sonarnih uređaja, robotskih podvodnih vozila ili specijalizirane opreme za snimanje slika i videozapisa pod morom.
- **Izolacija kvara -** Nakon što je kvar otkriven, područje oko oštećenja mora biti izolirano kako bi se spriječilo daljnje oštećenje podmorskog optičkog kabela i olakšao pristup popravku.
- **Priprema za popravak -** Specijalizirani brodovi ili podmornice opremljeni su opremom i alatima potrebnim za popravak podmorskih optičkih kabela. Pripremna faza uključuje postavljanje sigurnosnih mjera, pripremu alata i opreme te organizaciju tima za popravak.
- **Izvođenje popravka** - Nakon što je podmorski optički kabel izoliran i pripremljen, tim za popravak može započeti s popravkom oštećenja. To može uključivati rezanje oštećenog dijela podmorskog optičkog kabela, uklanjanje oštećenog optičkog vlakna, spajanje novog optičkog vlakna na mjesto oštećenja i zatvaranje podmorskog optičkog kabela.
- **Testiranje** - Nakon popravka, podmorski optički kabel se ponovno testira, kako bi se utvrdilo da li je popravak uspješno obavljen. To može uključivati testiranje optičke propusnosti, električne kontinuitete, izolacije i drugih ključnih parametara.

[36] Papapavlou, C.; Paximadis, K.; Uzunidis, D.; Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15

- **Ponovno puštanje u pogon** - Ako su testovi uspješni, podmorski optički kabel se ponovno stavlja u pogon i vraća u operativno stanje. To može uključivati ponovno povezivanje s mrežom i ponovno uspostavljanje komunikacijskih veza.

Važno je napomenuti da popravak podmorskih optičkih kabela zahtijeva pažljivo planiranje, stručnost i suradnju između različitih organizacija i stručnjaka kako bi se osiguralo uspješno i sigurno izvođenje popravka (slika 26). Ovisno o složenosti kvara i uvjetima na terenu, popravak podvodnih kabela može potrajati nekoliko dana ili čak tjedana.

**Slika 26. Popravak oštećenog podvodnog kabela koji spaja Maltu i Siciliju**

Izvor: https://www.vesselfinder.com/news/18154-Nexans-completes-repair-of-Malta-Sicily-subsea-interconnector

Oštećenja kabela mogu nastati uslijed raznih događaja, bilo prirodnih ili uzrokovanih ljudskim djelovanjem. Na dubinama većim od 1.000 metara, puknuća su gotovo uvijek rezultat prirodnih pojava poput podvodne seizmičke aktivnosti, podmorskih klizišta, abrazije uzrokovane strujama i slično. Na dubinama manjim od 200 metara, puknuća su gotovo uvijek posljedica ljudskih aktivnosti kao što su ribolov i sidrenje. Iako su podmorski kabeli vrlo pouzdani, postoje situacije kada se dogode kvarovi. Tada je potrebno pravovremeno reagirati i otkloniti kvar.

## 5.2. UTVRĐIVANJE I LOCIRANJE KVARA

Utvrđivanje kvara na podmorskim optičkim kabelima obuhvaća mjere koje uključuju postupanje i lociranje kvara te postupak izvlačenja i popravak.[37] Operatori zaprimaju alarme o oštećenju podmorskog optičkog kabela, a zaštitni uređaji signaliziraju na kojem kabelu je došlo do oštećenja. Prvi korak u planu otklanjanja kvara odnosi se na preporuku potvrde da je signalizacija kvara stvarna i da se ne radi o lažnoj aktivaciji. Pritom, operater treba koristiti dostupne alate za detekciju kvara, i to uređaja za zapisivanje podataka i drugo.

Nakon što se potvrdi informacija o stvarnom kvaru, provodi se tzv. orijentacijsko lociranje kako bi se vlasniku kabela naznačilo je li kvar na kopnenom ili morskom dijelu kabela. Zatim se obavlja precizno lociranje kvara i provede detaljno ispitivanje. Osoblje u kabelskim stanicama na svakom kraju kabelskog sustava tada započinje niz testova kako bi precizno lociralo kvar. Lociranje kvara važan je korak u popravku, budući netočno određivanje lokacije kvara zahtijeva veću količinu zamjenskog podmorskog optičkog kabela. Lociranje kvara obično se provodi u dvije faze:[38]

- određivanje lokacije i to sa terminala na obali i
- precizno lociranje uz pomoć broda.

Lociranje kvara s obalnih terminala daje mogućnost da se utvrdi približna udaljenost između kvara i mjesta mjerenja. Radi se o fazi koja je od velikog značaja važnosti jer pomaže u lociranja kvara i omogućuje popravak uz korištenje odgovarajuće tehnike i opreme. Naime u plitkim vodama koriste se drugačija plovila nego u dubljim vodama. Posebno vrijednim i pouzdanim su se pokazale elektroničke tehnike mjerenja pulsa i odjeka (eng. Time Domain Reflectometer - TDR). Lociranje kvara s obalne terminalne stanice može se izvršiti na način da se koristi optički kabel, ako je dostupan OTDR. Ovaj uređaj šalje svjetlosni puls u vlakno i mjeri vrijeme potrebno da se svjetlost reflektira natrag. Ako dođe do prekida ili bilo kakvog oštećenja na kabelu, reflektirana svjetlost će pokazati značajnu promjenu u signalu, otkrivajući mjesto i opseg oštećenja. Osim toga, prekid optičkog kabela može uzrokovati gubitak signala

[37] Ibidem
[38] Baoping, C., Di, Y., Feng, Q. (2021). Optical Fiber Cables. DOI:10.1002/9783527822263.ch13.https://www.researchgate.net/publication/351269486_Optical_Fiber_Cables citations, Pristupljeno 21. lipnja 2024.

ili probleme s povezivanjem. To se može primijetiti provjerom nedostatka prijenosa podataka ili padom performansi mreže.

### 5.3. MJERENJE I ISPITIVANJE SNAGE SIGNALA

Ispitivanje s optičkim mjeračem snage jedan je od najučinkovitijih načina za provjeru gubitka signala i otkrivanje prekida u podmorskom optičkom kabelu.[39] Mjerač optičke snage mjeri količinu svjetlosti koja se prenosi kroz kabel te može identificirati svaki značajan gubitak snage signala. Za početak testiranja, važno je prvo provjeriti ispravno spajanje podmorskog optičkog kabela na mjerač optičke snage te nastaviti kako slijedi:

1. Postavljanje mjerača optičke snage – Kalibrira se uređaj prema uputama proizvođača i odabere odgovarajuća valnu duljinu za testirani kabel.
2. Mjerenje snage – Spoji se jedan kraj podmorskog optičkog kabela na mjerač optičke snage, a drugi kraj na izvor svjetla. Mjeri se razina snage koja se prikazuje na mjeraču. Ovo početno mjerenje služi kao referenca.
3. Vizualni pregled kabela - Pažljivo se pregledava podmorski optički kabel kako bi se utvrdila moguća fizička oštećenja poput posjekotina ili savijanja, što može ukazivati na prekid podmorskog optičkog kabela.
4. Ponovno mjerenje snage - Ponavlja se postupak mjerenja snage na različitim točkama duž kabela. Značajan pad snage u usporedbi s početnim mjerenjem sugerira mogući prekid ili veliki gubitak signala u podmorskom optičkom kabelu.

Važno je napomenuti da mjerač optičke snage može otkriti gubitak signala ili prekid u kabelu, ali ne može precizno odrediti točno mjesto oštećenja. Za detaljniju analizu može biti potrebna dodatna oprema poput OTDR-a. Napredak u tehnologiji ispitivanja optičkih vlakana omogućio je razvoj sofisticiranijih alata i tehnika.[40] Pojedini mjerači optičke snage danas nude automatizirane opcije testiranja, što omogućuje brže i preciznije otkrivanje problema u kabelu. Također su dostupni ručni OTDR uređaji koji pružaju detaljne informacije o lokaciji i prirodi oštećenja na optičkom kabelu.

Da bi se utvrdilo je li optički kabel prekinut, može se koristiti OTDR za detaljnu analizu. OTDR je moćan alat koji se koristi za detaljnu analizu optičkih kabela kako bi se utvrdilo

[39] [39]Papapavlou, C.; Paximadis, K.; Uzunidis, D.; Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15
[40]Ibidem

postojanje prekida ili drugih problema. Ovaj uređaj šalje svjetlosne impulse kroz vlakno i mjeri refleksije koje se pojavljuju duž duljine kabela. Tehničar spaja OTDR na jedan kraj optičkog kabela i pokreće test. Svjetlosni impuls putuje kroz kabel, a OTDR analizira vrijeme i intenzitet refleksija kako bi odredio udaljenost do svakog loma ili greške.

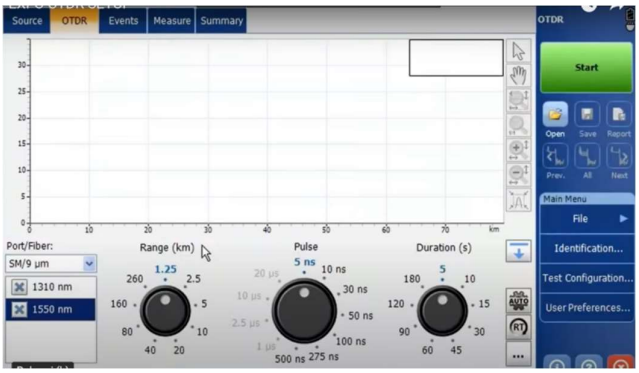
OTDR pruža važne informacije o stanju optičkog kabela, uključujući preciznu lokaciju i vrstu oštećenja. Može otkriti lomove, savijanja, spojeve i druge probleme koji mogu utjecati na performanse kabela. Također može mjeriti gubitak snage signala na različitim točkama duž kabela, što pomaže u identifikaciji problematičnih područja.

Najnoviji napredak u tehnologiji OTDR-a rezultirao je kompaktnijim uređajima koji su jednostavniji za korištenje, ali istovremeno sposobniji za analizu većih brzina prijenosa podataka. Neki moderni OTDR uređaji nude automatizirane značajke za analizu i izvješćivanje, olakšavajući tehničarima tumačenje rezultata. Korištenje OTDR-a za detaljnu analizu je najučinkovitiji način da se utvrdi je li optički kabel prekinut.[41] Pruža precizne informacije o lokaciji i ozbiljnosti bilo kojeg kvara, omogućujući tehničarima brzo otkrivanje i rješavanje problema. OTDR se koristi u kombinaciji s testnim vlaknom i, naravno, testno vlakno mora biti iste vrste vlakna kao i sustav koji se testira. Slijedi primjer mjerenja pomoću OTDR instrumenta.

Za jednomodni sustav (engl. Single Mode) optičko vlakno treba biti najmanje 200 m.[42] Testna kutija sa vlaknom sadrži oko 300-500 m. Tipičan OTDR ekran ima X-os i Y-os (slika 27). X-os mjeri udaljenost, a Y-os mjeri prigušenje i refleksiju, u jedinicama decibela (dB). Uz to, postoji mogućnost odabrati vrstu sustava koji se testira. U ovom slučaju to je jednomodni sustav, a mogu se birati valne duljine pod kojima će se testirati sustav. Također može se odabrati duljina sustava, snaga signala odabirom različitih širina impulsa i vrijeme akvizicije. Uvijek je dobro provjeriti testnu kutiju vlakana prije spajanja na sustav.

[41] Rao, Y., Wang, Z., Wu, H., Ran, Z., Han, B. (2021). Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR). Photonic Sensors. 11. 1-30. 10.1007/s13320-021-0

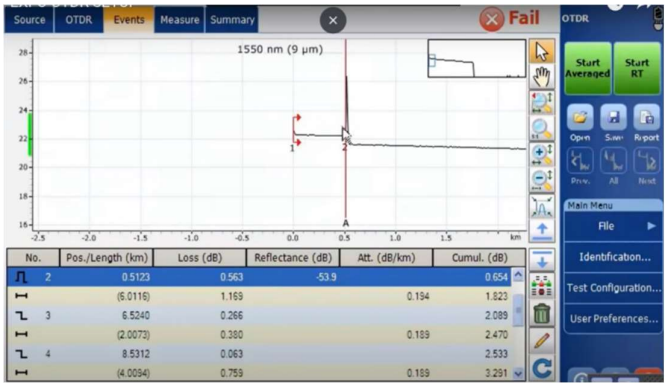
[42] https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.




**Slika 27. Klasičan prikaz OTDR sučelja**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

Duljina testne kutije vlakana je oko 500 m kao što se može vidjeti na slici (slika 28). Evidentno je da je sve spremno za spajanje ostatka optičkog sustava, no prethodno treba očistiti konektore.




**Slika 28. Prikaz spoja testnog vlakna i ostatka sustava**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

Po obavljenom spajanju testnog vlakna i ostatka sustava signal se može poslati kroz cijeli sustav (slika 28). Po isteku unaprijed postavljenog vremena akvizicije, moguće je vidjeti da je trag dugačak oko 19 km (slika 29).

**Slika 29. Prikaz mjerenja cijelog optičkog vlakna**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

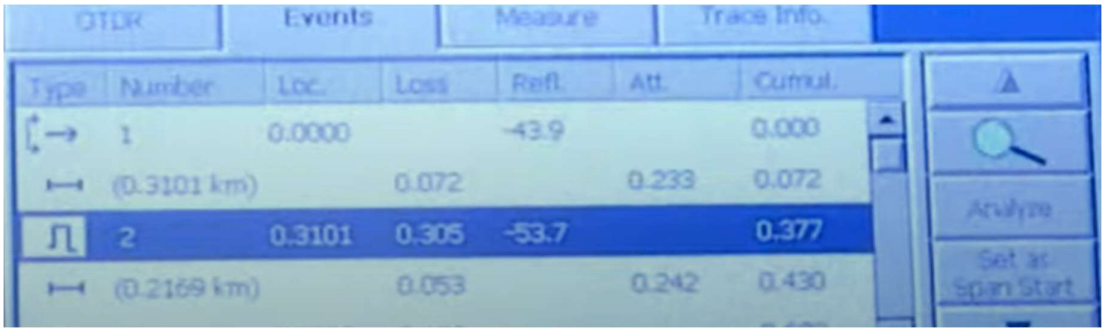
Većina događaja ovog mjerenja je koncentrirana oko početka (slika 30)

**Slika 30. Prikaz dvaju događaja na početku mjerenja**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

Događaj broj 1, je točka gdje je testna kutija vlakana spojena na OTDR. Na toj točki nema vrijednosti ni refleksije ni prigušenja, i zato se koristi testna kutija vlakana. Ovo područje se zove mrtva zona. Testna kutija omogućuje da se prevlada mrtva zona s ovom duljinom vlakna. Tako se može vidjeti prvi par konektora koji je spojen na sustav i koji ima određenu

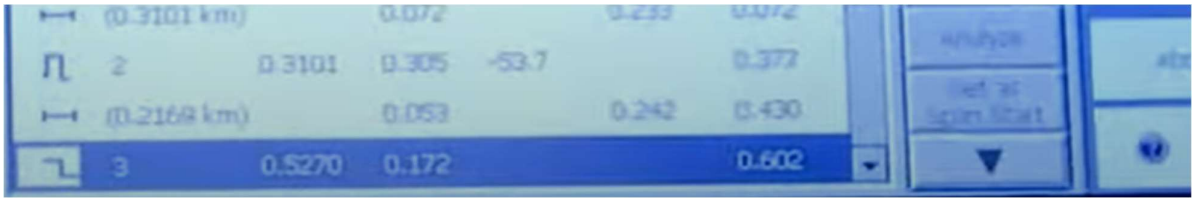
vrijednost. Ako se pogleda tablica događaja na slici (slika 31), vidi se da je vrijednost oko 0,305 dB, što je u redu, a refleksija je oko -53,7 dB, što su dobre vrijednosti.




**Slika 31. Prikaz tablice događaja za prvi i drugi događaj**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

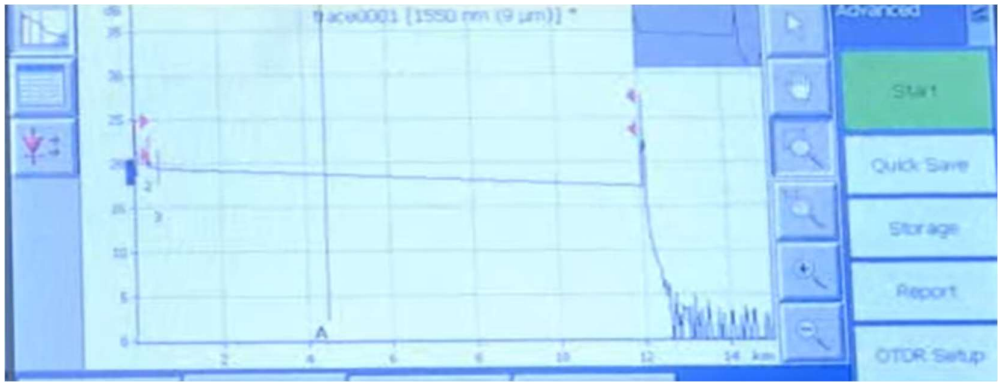
Treći događaj je spoj koji povezuje dva koluta i ta vrijednost je 0,72 dB, što nije loše iako se preferira da vrijednosti budu oko 0,01 dB (slika 32).




**Slika 32. Prikaz tablice događaja za treći događaj**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

Ostatak duljine je treći kolut i zatim kraj sustava s visokim reflektivnim vrhom, a zatim pada u šum (slika 33).

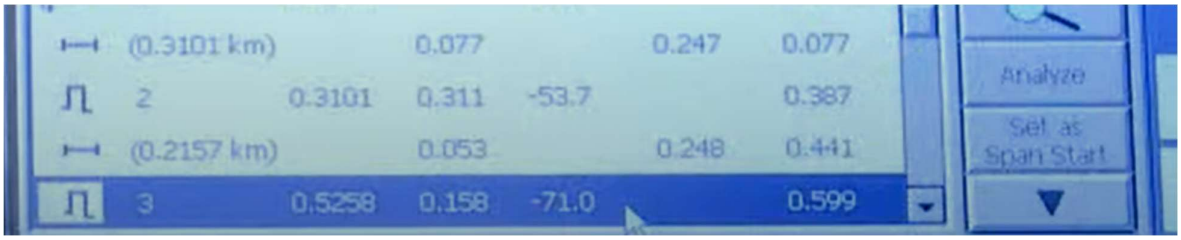


**Slika 33. Prikaz ostatka duljine i mjerenje šuma**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

Razlog za reflektivne vrhove je diskontinuitet koji postoji između para konektora, odnosno razmak između konektora koji je mali. Spoj nema diskontinuitet i zato ima samo pridruženo prigušenje. Nakon zamjene spojne točke s brjegastim spojem, trag izgleda malo drugačije.

Događaj broj 3, gdje je bio spoj, sada je malo reflektivan ako se pogleda tablica događaja. Prigušenje je 0,158 dB, a reflektivna vrijednost -71 dB (slika 34).




**Slika 34. Prikaz mjerenja nakon što smo popravili spoj na konektoru**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=GP39QVYwmNU&ab_channel=FiberOpticsForSaleCo.

Spoj je bolji od para konektora budući postoji gel za indeksno usklađivanje između dva kraja vlakna koji smanjuje refleksiju. Ostale informacije dostupne iz tablice događaja uključuju duljinu raspona i lokaciju kraja sustava.

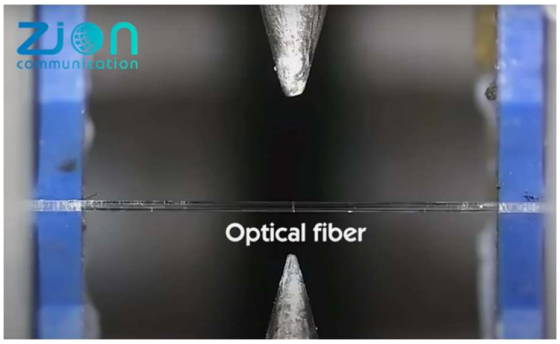
## 5.4. TEHNIKE POPRAVAKA PODMORSKIH OPTIČKIH KABELA

Nakon što je utvrđeno i pregledano oštećenje na kabelu, može se započeti s izvlačenjem podmorskog optičkog kabela**.** Informacije se prosljeđuju brodu kako bi se izradili konačni planovi za popravak. Brod ukrcava potreban rezervni kabel i podvodnu opremu potrebnu za izvođenje popravka. Kada brod uplovi na mjesto popravka, započinje operaciju izvlačenja kabela. Ako je kabel zakopan, prilikom iskopavanja s obje strane kvara mora se uzeti u obzir dubina vode i obilježja kabela na lokaciji. To znači da se kabel treba iskopati minimalno dva do tri puta dubine vode kako bi se osigurala dovoljna duljina kabela za izvođenje spojnih operacija na krajevima. Ovisno o preciznosti lokacije kvara i očekivanom prodoru vode uzduž kabela, navedeno može varirati. Radovi na iskopavanju su sporiji i zahtjevniji na područjima s

kamenjem ili čvrstim tlom. Također ako je kabel zaštićen betonskim madracima ili kamenim nasipom, potrebna je dodatna oprema za čišćenje zaštite (za kratke dionice može biti ekonomičnije preskočiti i zaobići oštećeni dio ispod stijena ili madraca). Slijedi podizanje kabela na palubu broda. Kabel se hvata pomoću velike hvataljke (kuke) i vuče po morskom dnu dok se ne uhvati. Kada se kabel podigne s morskog dna, reže se na određenim mjestima. U dijelovima gdje je kabel zakopan, može se koristiti ROV za lociranje i rezanje kabela na morskom dnu. Nakon što se kabel prereže, hvataljka se vraća na brod i zamjenjuje se novom. Nova hvataljka se spušta pomoću užeta na morsko dno i vuče duž morskog dna dok se ne uhvati jedan kraj prethodno prerezanog kabela. Zatim se kabel podiže na površinu i izvlači na brod. Kabel se testira i uklanjaju se oštećeni dijelovi i to kako slijedi[43]

- Smanjenje štete - Prvi korak je ukloniti oštećeni dio kabela. Koristi se baterijska rezalica za optički kabel kako bi se napravio ravni i čisti rez koji uklanja sve znakove oštećenja. Važno je da rez bude precizan s obje strane kako bi se osigurao čvrsti spoj kad dođe vrijeme za spajanje krajeva.
- Oguliti odrezane vrhove - Nakon rezanja, koristi se alat za skidanje vanjskog premaza kako bi se otkrila optička vlakna. Postavlja se skidač na željeno mjesto, stišće se ručka i povlači prema odsječenom kraju kabela kako bi se uklonio vanjski premaz. Ako se planira koristiti mehanički spoj, procjenjuje se koliko treba podmorski optički kabel oguliti kako bi metalni terminal dosegao kraj kabela. Važno je ukloniti dovoljno premaza tako da kraj kabela doseže vrh terminala. Sličan postupak koristi se i za fuzijski spoj, obavljajući isti proces na oba kraja kabela.
- Čišćenje optičkog kabela - Temeljito čišćenje podmorskog optičkog kabela ključno je prije spajanja. Za čišćenje vlakana koristimo alkohol i krpu bez dlačica. Sitna vlakna na površini jezgre mogu negativno utjecati na performanse, stoga je važno očistiti ih bez dodira s krajevima vlakana kako bi se sačuvao integritet
- Spajanje optičkog kabela - Postoji dva načina za spajanje optičkog kabela i to:
    - mehanički spoj koji koristi metalne terminale i spajalicu za poravnavanje te povezivanje dvaju krajeva (slika 35). Ovaj spoj osigurava trajno pričvršćivanje na liniju.

[43] https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/



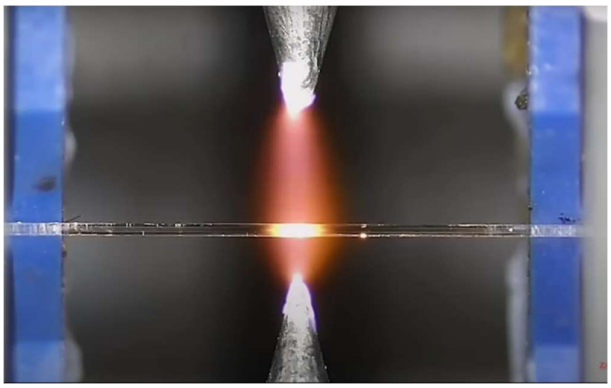

**Slika 35. Prikaz spoja vlakna nakon poravnavanja**

Izvor: https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/

- fuzijski spoj (slika 36, 37). Spajanje fuzijom koristi alat za poravnavanje krajeva, koji se zatim zagrijavaju kako bi spojili izložene krajeve. Nakon spajanja, može se ukloniti spojnica. Fuzija stvara izdržljivu, dugotrajnu vezu uz proizvodnju jasnog signala i smanjenje gubitaka u prijenosu.

**Slika 36. Prikaz spajalice na fuziju**

Izvor: https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/



**Slika 37. Prikaz trenutka fuzije**

Izvor: https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/

Ponovno spajanje podmorskog optičkog kabela mora biti obavljeno kvalitetno i precizno. Univerzalni spoj (Joint) omogućuje stvaranje spoja s minimalnim gubicima (<0,1 dB), ključno je vratiti mehaničku čvrstoću kabla (>8 tona minimalne sile loma, ovisno o tipu kabela) i osigurati visokonaponsku električnu izolaciju (do 12 kV jednosmjerne struje), što zahtijeva izuzetno specijalizirane vještine (slika 33). Dodatni izazov je što svaki dobavljač kao što su ASN ili SubCom koristi vlastitu metodu za spajanje kabela. Zbog toga su dobavljači uspostavili Konzorcij za univerzalne spojeve. Univerzalni spojni (UJ) kit omogućuje spajanje gotovo svakog tipa kabela s bilo kojim drugim, neovisno o dobavljaču. Slike u nastavku prikazuju univerzalni spoj te model spoja 450 BS. Slike 38, 39, 40, 41, 42, 43).

**Slika 38. Dio postupka univerzalnog spoja**

Izvor: https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/

**Slika 39. Dio postupka univerzalnog spoja**

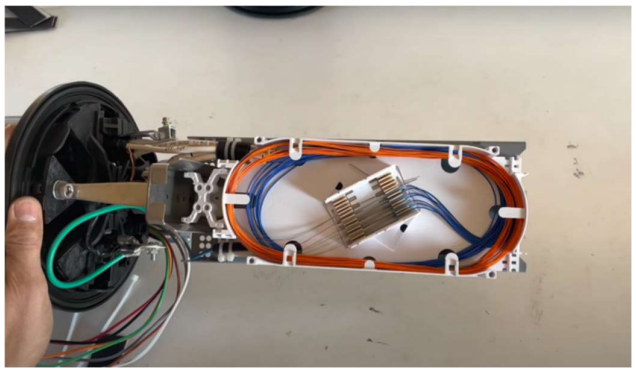
Izvor: https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/

**Slika 40. Dio postupka univerzalnog spoja**

Izvor: https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/

**Slika 41. Prikaz početka sastavljanja spoja modela 450BS**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=Qvfq9OsYJI0&ab_channel=FiberSpliceGod



**Slika 42. Prikaz pravilno položenih optičkih vlakana prije samog zatvaranja glave**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=Qvfq9OsYJI0&ab_channel=FiberSpliceGod

**Slika 43. Prikaz poklopca glave modela 450BS**

Izvor: https://www.youtube.com/watch?v=Qvfq9OsYJI0&ab_channel=FiberSpliceGod

Nakon što se uklone svi oštećeni dijelovi i identificira izvorni kvar, rezervni kabel koji se nalazi na brodu se spaja, i to u dovoljnoj duljini da zamijeni izrezani dio kabela. Slijedi spajanje dva kraja kabela u završnom spoju. Završni spoj se spušta natrag na morsko dno i provode se završni testovi kako bi se osiguralo da kabel ispravno funkcionira. Gdje god je popravak izvršen u zakopanom dijelu kabela, tada se kabel ponovno zakopava pomoću ROV-a, na način da se vraća mlazom vode u morsko dno do originalne dubine ukopa. Operacija popravka može potrajati nekoliko dana.

Završni spoj predstavlja dodatni rizik za ribolovnu opremu budući je to u osnovi žica koja vodi od morskog dna do broda. Na brodu se drži čepovima od užeta, a proces uključuje jednostavno povlačenje oba čepa i spuštanje kabela natrag na morsko dno. Ukopavanje kabela

u ovoj fazi često nije potpuno uspješno zbog oštrih zavoja u kabelu i loših uvjeta vidljivosti, pa se stoga preporučuje izbjegavanje završnih spojeva. Završne spojnice postavljaju se na morsko dno pod pravim kutom u odnosu na kabelsku liniju.

- Testiranje - Nakon što je spoj napravljen, važno je provesti nekoliko testova kako bi se osigurala pouzdana veza. Za mehanički spoj može se izvesti test vuče, lagano povlačeći oba kraja spoja kako bi se provjerila čvrstoća. Također može se koristiti OTDR za detaljnu analizu snage signala i identifikaciju eventualnih problema koje treba riješiti.

Završetkom popravaka i testiranja, podmorski optički kabelski sustav službeno se predaje operativnom osoblju. Svi sudionici u popravku trebaju se pridržavati uputa operativnog osoblja i ne smiju raditi na podmorskom optičkom kabelu bez odobrenja. Puštanje u rad tretira se kao standardna procedura koju provodi operativno osoblje.

# ZAKLJUČAK

Posljednjih nekoliko desetljeća i dulje, svijet je postao bliži. Putovanja, globalizacija gospodarstava i financijskih tržišta te rast komunikacijske tehnologije koja povezuje više zemalja i kontinente, oblikuje živote kakve poznajemo danas i kakvi će biti u budućnosti. Važnost komunikacijske infrastrukture i interneta raste s krizama, uključujući podmorske optičke kabele. Podmorski optički kabeli, s naprednom tehnologijom prijenosa, dio su opsežnih, i inteligentnih mreža koje se križaju regionalno i međunarodno.

Podmorski optički kabeli doprinose socio-ekonomskom razvoju, zbog čega je zaštita podmorskih optičkih kabela i njihove primarne namjene za telekomunikacije od ključne važnosti. Primarna upotreba komercijalnih optičkih kabela je osiguranje učinkovitog i stabilnog prijenosa digitalnih podataka i komunikacija te se koriste dodatni senzori. Veliku većinu kabela financiraju i grade komercijalne tvrtke. Rute komercijalnih podmorskih optičkih kabela sustavno su planirane i dizajnirane kako bi se što je više moguće izbjegla opasna područja morskog dna, i negativni utjecaji prirodnih opasnosti. Prednost senzora optičkih vlakana je da se može koristiti na bilo kojem standardnom modernom uređaju te obaviti mjerenja u stvarnom vremenu i u isto vrijeme obavljati prijenos podataka.

Kvarove kabela uzrokuju mnogi događaji, kako ljudski tako i prirodni. U dubinama vode većim od 1.000 metara rasjede gotovo uvijek uzrokuju prirodni događaji kao što su podvodna seizmička aktivnost, podvodna klizišta, strujna abrazija itd. Na dubinama vode manje od 200 metara rasjede gotovo uvijek uzrokuju aktivnosti koje je izveo čovjek kao što su ribolov i sidrenje. Otprilike 70% svih kvarova na kabelima uzrokovano je ribolovom i aktivnostima sidrenja, a oko 12% uzrokuju prirodne opasnosti, npr. strujna abrazija ili potresi.

Kabelski sustavi se kontinuirano nadziru tako da se odmah može znati da li se radi o kvaru. Osoblje u kabelskim stanicama na svakom kraju kabelskog sustava provode testove kako bi lociralo grešku. Nakon što je mjesto kvara poznato, ta se lokacija prosljeđuje specijaliziranom brodu za popravak kako bi se izradili konačni planovi za popravak. Specijalizirani brod po ukrcaju rezervnog kabela i podvodnog postrojenja otplovi do mjesta kvara. Popravak kvara složen je postupak zbog čega se prate određene procedure, od ispitivanja s optičkim mjeračem snage radi provjere gubitka signala i otkrivanje prekida u podmorskom optičkom kabelu, vađenja kabela na površinu, uklanjanja oštećenih dijelova i testiranja pomoću optičkih instrumenata poput OTDR-a. Postupak se ponavlja za svaki kraj kabela. Nakon što su svi oštećeni kabeli uklonjeni i izvorna greška identificirana i izrezana, slijedi ponovno testiranje

prije izrade završnog spoja i vraćanja kabela u more. Završni spoj se zatim spušta natrag na morsko dno i provode se završni testovi kako bi se osiguralo da kabel ispravno radi. Operacija popravka može potrajati nekoliko dana. Instrumenti i oprema, te metode koje se koriste prilikom utvrđivanja, lociranja i popravaka kontinuirano se razvijaju te se time pridonosi učinkovitosti pravovremenog otkrivanja i popravaka kvarova. Ne manje važna je stručnost i kontinuirano osposobljavanje ljudi koji obavljaju složene poslove ispitivanja i popravaka kvarova.

## LITERATURA


[1] Asante, B., Hayford-Acquah, T. (2021). Fiber Cut Impacts and the Scientific Analysis of its Financial Losses. 16. 34-51. 10.9790/2834-1603023451. https://www.researchgate.net/publication/352568375_Fiber_Cut_Impacts_and_the_Scientific_Analysis_of_its_Financial_Losses, Pristupljeno 21. lipnja 2024.

[2] Baoping, C., Di, Y., Feng, Q. (2021). Optical Fiber Cables. DOI: 10.1002/9783527822263.ch13. https://www.researchgate.net/publication/351269486_Optical_Fiber_Cables/citations Pristupljeno 21. lipnja 2024.

[3] Daigond, A., Rani.K.R.U. & Aski, A. (2021). A Review on Importance of DWDM Technology in Optical Networking. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology. 23*. https://www.researchgate.net/publication/352503163_A_Review_on_Importance_of_DWDM_Technology_in_Optical_Networking, Pristupljeno 22. lipnja 2024.

[4] https://abcgeografija.com/teme/podvodni-kablovi/, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[5] https://acacia-inc.com/blog/undersea-fiber-cables-are-connecting-our-world/, Pristupljeno 25. lipnja 2024.

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_time-domain_reflectometer, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[7] https://hackaday.com/2023/08/08/under-the-sea-optical-repeaters-for-submarine-cables/, Pristupljeno 25. lipnja 2024.

[8] https://iscpc.org/publications/submarine-cable-protection-and-the-environment/ICPC_Public_EU_March%202022.pdf, Pristupljeno 26. lipnja 2024.

[9] https://kb.veexinc.com/en/knowledge/is-it-possible-to-preview-otdr-sor-files-as-windows-thumbnails, Pristupljeno 25. lipnja 2024.

[10] https://pipeshield.com/sectors/special-projects/, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[11] https://www.datastrait.com/blog-news/5-facts-about-your-fiber-optic-cable-connection-cleanliness, Pristupljeno 25. lipnja 2024.

[12] https://www.deme-group.com/news/living-stones-peak-production-levels-ensure-inter-array-cable-laying-works-seamade-are, Pristupljeno 25. lipnja 2024.

[13] http://www.fibrepulse.com/technical/return-loss-testing/, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[14] https://www.genuinemodules.com/what-are-the-three-types-of-otdr_a4625 Pristupljeno 25. lipnja 2024.

[15] https://www.iscpc.org/, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[16] https://www.kentik.com/blog/diving-deep-into-submarine-cables-undersea-lifelines-of-internet-connectivity/, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[17] https://www.powerandcables.com/jointing-connecting-submarine-cables/, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[18] https://www.ship-technology.com/projects/living-stone-multi-purpose-vessel/, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[19] https://www.smd.co.uk/ccc-ue-signs-contract-smd-hard-ground-subsea-trenching-machine/, Pristupljeno 26. lipnja 2024.

[20] https://www.thefoa.org/tech/ref/quickstart/OTDR.html, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[21] https://www.truecable.com/blogs/cable-academy/basic-principles-of-fiber-optics-series-attenuation, Pristupljeno 26. lipnja 2024.

[22] https://www.ufispace.com/company/blog/what-is-dwdm-its-uses-benefits-components, Pristupljeno 26. lipnja 2024.

[23] https://www.vesselfinder.com/news/18154-Nexans-completes-repair-of-Malta-Sicily-subsea-interconnector, Pristupljeno 26. lipnja 2024.

[24] https://www.youtube.com/watch?v=N_XT_raoSBo&ab_channel=SMD-SubseaTechnology, Pristupljeno 26. lipnja 2024.

[25] How to Read an OTDR Trace - from Corning Cable Systems - YouTube Pristupljeno 27. lipnja 2024.

[26] https://www.youtube.com/watch?v=Qvfq9OsYJI0&ab_channel=FiberSpliceGod, Pristupljeno 27. lipnja 2024.

[27] Jurdana, I., Rukavina, B. i Tominac Coslovich, S. (2021). Legal regime regulating the laying and protection of submarine cables in the Republic of Croatia. *Pomorstvo, 3*(1), 118-127. https://doi.org/10.31217/p.35.1.13, https://hrcak.srce.hr/259322, Pristupljeno 25. lipnja 2024.

[28] Nabih, A., Rashed, A. (2012). Submarine Optical Fiber Cable Systems for High Speed Growth Developments in Optical Communication Networks. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business. 4.* 10.5815/ijieeb.2012.03.07. https://www.researchgate.net/publication/266342041_Submarine_Optical_Fiber_Cable_

Systems_for_High_Speed_Growth_Developments_in_Optical_Communication_Networks, Pristupljeno 22. lipnja 2024.

[29] Papapavlou, C.; Paximadis, K.; Uzunidis, D.; Tomkos, I. (2022). Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends *Telecom 3*, 234-280. https://doi.org/10.3390/telecom3020015, https://www.mdpi.com/2673-4001/3/2/15, Pristupljeno 23. lipnja 2024.

[30] Rao, Y., Wang, Z., Wu, H., Ran, Z., Han, B. (2021). Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR). Photonic Sensors. 11. 1-30. 10.1007/s13320-021-0619-4. https://www.researchgate.net/publication/348697893_Recent_Advances_in_Phase-Sensitive_Optical_Time_Domain_Reflectometry_F-OTDR, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

[31] Winzer,P. Neilson,D., Chraplyvy,A.(2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Invited], Opt. Express 26, 24190-24239. https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-18-24190&id=396718, Pristupljeno 24. lipnja 2024.

## POPIS KRATICA

ASN (Alcatel Submarine Networks) – Tvrtka za dobavu kabela

CEV (Environmental control valuation) - Kontrolni okvir za okoliš

CO (Central office) - Centralna kancelarija

COTDR (Coherent Optical time domain reflectometer) - Koherentni OTDR

DWDM (Dense Wave length division multiplexing) - Multipleksiranje guste valne duljine

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) - Optički pojačivač dopiran Erbijem

FTTH (Fiber to home) - Vlakna do doma

G 654 (Fiber subset - Single-mode optical fiber) - Podskup vlakna - Jednomodno optičko vlakno

ICPC (International Cable Protection Committee) - Međunarodni odbor za zaštitu kabela

ORL (Optical Return Loss) - Optički povratni gubitak

OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) – Optički reflektometar u vremenskoj domeni

PE (Polyethylene sheathed cable) - Kabel obložen polietilenom

RFTS (Remote fibre test system) - Sustav za daljinsko testiranje vlakna

ROV (Remote operating vehicle) - Vozilo na daljinsko upravljanje

RTU (Remote test unit) - Daljinska testna jedinica

TAT-14 (Transatlantic telecommunication cable) - Transatlantski telefonski kabel

TDR (Time domain reflectometer) - Reflektometar u vremenskoj domeni

UJ (Universal joint) - Univerzalni spoj

UN (United Nation) - Ujedinjeni Narodi

UNCLOS (United Nation Convention of the Law of the Sea) - Međunarodna Konvencija o zaštiti podmorskih kabela

UPC (Ultra Physical contact) - Vrsta optičkog konektora

VR (Virtual reality) - Virtualna stvarnost

XLPE (Cross link polyethylene cable) - Unakrsni polietilenski kabel

## POPIS SLIKA

Slika 1. Podmorski optički kabel ..... 4
Slika 2. Podmorski električni kabel s optičkim vlaknima ..... 8
Slika 3. Podmorski optički kabel s laganim optičkim vlaknima ..... 8
Slika 4. Podmorski optički kabel s oklopljenim podmorskim optičkim vlaknima ..... 9
Slika 5. Optički kabel i satelitska veza ..... 11
Slika 6. Kabelske rute podvodnih optičkih kabela ..... 13
Slika 7. Kabelopolagač Livingstone kompanije DEME ..... 17
Slika 8. Cable Instalation Spread kabelopolagača Livingstone ..... 18
Slika 9. Presjek broda prikazuje pozicije dvaju vrtuljka u utrobi broda. Pogodnije od spremanja kabela na palubi radi vremenskih uvjeta ..... 18
Slika 10. Uvlačenje kabela u vrtuljak te fiksiranje u središte ..... 19
Slika 11. Priprema vlakna za testiranje ..... 19
Slika 12. Prikaz atenuacije optičkog kabela ..... 20
Slika 13. Prikaz refleksije - povratnog gubitka ..... 20
Slika 14. Provjera čistoće na konektorima ..... 21
Slika 15. Trencher – kopač koji se koristi za iskope kanala prije samog polaganja kabela na morsko dno ..... 22
Slika 16. Primjer podvodnog kopanja ..... 23
Slika 17. Podmorski madrac. Koristi se kada se podvodni kabeli križaju ..... 23
Slika 18. Podvodni madrac ..... 24
Slika 19. Optički reflektometar u vremenskoj domeni ..... 26
Slika 20. Prikaz informacija sa optičkog reflektometra u vremenskoj domeni ..... 27
Slika 21. SOR datoteke (Fiberizer) ..... 32
Slika 22. Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) ..... 33
Slika 23. Tipično pojačalo podmorskog kabela ..... 34
Slika 24. EDFA shema. Ulazni signal na 1.550 nm spojen je sa svjetlom od 980 nm iz lasera pumpe u petlji doziranoj erbijem, koji pojačava signal stimuliranom emisijom ..... 35
Slika 25. Redudancijsko pojačalo 2X2 ..... 36
Slika 26. Popravak oštećenog podvodnog kabela koji spaja Maltu i Siciliju ..... 38
Slika 27. Klasičan prikaz OTDR sučelja ..... 42
Slika 28. Prikaz spoja testnog vlakna i ostatka sustava ..... 42
Slika 29. Prikaz mjerenja cijelog optičkog vlakna ..... 43

Slika 30. Prikaz dvaju događaja na početku mjerenja ..... 43
Slika 31. Prikaz tablice događaja za prvi i drugi događaj ..... 44
Slika 32. Prikaz tablice događaja za treći događaj ..... 44
Slika 33. Prikaz ostatka duljine i mjerenje šuma ..... 45
Slika 34. Prikaz mjerenja nakon što smo popravili spoj na konektoru ..... 45
Slika 35. Prikaz spoja vlakna nakon poravnavanja ..... 47
Slika 36. Prikaz spajalice na fuziju ..... 47
Slika 37. Prikaz trenutka fuzije ..... 48
Slika 38. Dio postupka univerzalnog spoja ..... 48
Slika 39. Dio postupka univerzalnog spoja ..... 49
Slika 40. Dio postupka univerzalnog spoja ..... 49
Slika 41. Prikaz početka sastavljanja spoja modela 450BS ..... 50
Slika 42. Prikaz pravilno položenih optičkih vlakana prije samog zatvaranja glave ..... 50
Slika 43. Prikaz poklopca glave modela 450BS ..... 50