

Projektiranje elektroenergetskih podmorskih kabela

Mandić, Lara

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:042990>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PROJEKTIRANJE ELEKTROENERGETSKIH PODMORSKIH
KABELA**

Rijeka, rujan 2023.

Lara Mandić

0069079357

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PROJEKTIRANJE ELEKTROENERGESTSKIH PODMORSKIH
KABELA**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2023.

Lara Mandić

0069079357

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Tehnika visokog napona**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Lara Mandić (0069079357)**
Studij: **Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike**
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **PROJEKTIRANJE I INSTALACIJA PODMORSKIH KABELSKIH VODOVA**

Opis zadatka:

Elementi podmorskih SN i VN kabelskih vodova. Kriteriji i metode za proračun i dimenzioniranje podmorskih kabelskih vodova. Tehnologije instalacije podmorskih kabelskih vodova. Razrada projekta na jednom realnom primjeru podmorskog kabelskog voda.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Lara Mandić

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

kojom ja, Lara Mandić, 0069079357: studentica Tehničkog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci, kao autorica diplomskog rada s naslovom: Projektiranje elektroenergetskih podmorskih kabela.

Izjavljujem da sam diplomski rad izradila samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Vitomira Komena poštujući načela akademske čestitosti i pravila za izradu diplomskog rada.

Studentica

Lara Mandić

Handwritten signature of Lara Mandić in blue ink.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Podmorski elektroenergetski kabeli	2
3. Proračun dopuštenog strujnog opterećenja visokonaponskih podmorskih kabela	7
3.1 Izmjenični trožilni podmorski kabeli.....	7
3.2 Izmjenični jednožilni podmorski kabeli	12
3.3 Primjer proračuna dopuštenog strujnog opterećenja izmjeničnog trožilnog kabela	18
4. Suglasnosti i dozvole za izgradnju podmorskih kabela	27
4.1. Procesi pridobivanja suglasnosti i dozvola.....	27
4.2. Procjena utjecaja podmorskog kabela na okoliš	29
5. Elementi projekta podmorskih visokonaponskih kabela.....	30
5.1 Modeli izrade projekata podmorskih kabela.....	30
5.2 Istraživanja i studije u fazi izrade projekta podmorskog kabela	35
5.3 Određivanje trase podmorskog kabela	39
5.4. Tehnička rješenja za zaštitu podmorskih kabela	41
5.5. Tehnička rješenja elemenata podmorskog i kopnenog dijela trase podmorskog kabela ..	48
5.6. Utjecaji konstrukcije podmorskog kabela i kablenskog pribora na projektna rješenja	50
5.7 Odabir tehnologije i mehanizacije za polaganje podmorskog kabela	51
6. Pregled, snimanje i istraživanje morskog dna i trase podmorskog kabela	53
6.1 Snimanje i istraživanje morskog dna	53
6.2 Snimanje i istraživanje kopnenog dijela trase i okoliša	55
6.3 Izvješća snimanja i istraživanja	55
6.4 Metode ispitivanja i pregled potrebne opreme	56
7. Mehanizacija i tehnologija za polaganje podmorskih kabela	57
7.1 Oprema za pripremu trase podmorskog kabela.....	57
7.2 Brod i oprema za polaganje podmorskih kabela.....	58
7.3 Mehanizacija za ukopavanje i zaštitu podmorskih kabela.....	60
8. Proces operativnog polaganja podmorskih kabela	68
8.1. Priprema za izvođenje polaganja.....	68
8.2. Priprema kablenske trase podmorskog kabela.....	70
8.3. Proces polaganja i ukopavanja podmorskog kabela.....	71
8.4. Tehnologija i postupci spajanja podmorskih kabela	73
8.5. Postupci završavanja podmorskih kabela na kopnenim dijelovima.....	74
8.6. Završna ispitivanja podmorskog kabela nakon završetka izgradnje	75

9. Proračun dopuštenog strujnog opterećenja realnog visokonaponskog izmjeničnog podmorskog kabela $U_n=110$ kV	77
10. Zaključak	86
Literatura	88
Sažetak i ključne riječi	89
Summary and key words	90
Popis slika	91
Popis tablica	93

1. Uvod

Projekti podmorskih kabela obuhvaćaju vrlo širok spektar primjena, po izmjeničnom sustavu (od kabela srednjeg napona (SN) do kabela vrlo visokog napona (VVN)) i istosmjernom sustavu. Područja primjene su od lokalne kratke riječne ili jezerske prijelaze kabela, napajanje otoka električnom energijom, instalacije kabela na dugim udaljenostima između zemalja i kontinenata, kabele među skupinama povezanih vjetroagregata s prikupnim platformama (fiksno dno ili plutajuće), izvozne kabele s priobalnim resursima poput platformi vjetroelektrana na moru i/ili priobalnih podstanica do kopnenih točaka povezivanja (POI) na mrežu, međupovezne kabele između priobalnih podstanica, kabele za napajanje od kopna do priobalnih objekata poput platformi za proizvodnju nafte i plina.

Projektiranje podmorskih kabela je temeljni korak u inženjeringu izgradnje podmorskih kabela. Ovaj proces uključuje detaljnu analizu i planiranje kako bi se osigurala optimalna trasa kabela, odabir odgovarajućih materijala i opreme, učinkovita organizacija postavljanja kabela te osiguranje sigurnosti i zaštite kabela tijekom i nakon instalacije.

Pri projektiranju podmorskih kabela, nekoliko ključnih faktora treba uzeti u obzir. To uključuje trasu kabela, kabelski dizajn, materijale i opremu, sigurnost i zaštitu kabela.

Projektiranje podmorskih kabela zahtijeva stručno znanje, suradnju različitih stručnjaka poput inženjera, geologa, pomoraca i ekologa te pridržavanje međunarodnih standarda i propisa.

O ovom radu obrađuju se detaljno sve faze projektiranja i instalacije podmorskih kabelskih vodova.

Posebno se razrađuju metode proračuna dozvoljenog strujnog opterećenja podmorskih kabelskih vodova.

2. Podmorski elektroenergetski kabeli

Visokonaponski elektroenergetski podmorski kabeli mogu biti:

1. prema električnom sustavu prijenosa:
 - istosmjerni
 - izmjenični,
2. prema broju vodiča u konstrukciji:
 - trožilni
 - jednožilni
3. prema vrsti konstrukcije (izolacije vodiča):
 - podmorski kabeli izolirani umreženim polietilenom (XLPE kabeli)
 - podmorski kabeli izolirani impregniranim papirom (MI kabeli – klasični) [1]

U ovisnosti o tome radi li se o istosmjernom ili izmjeničnom kabelu mogu se razmatrati različiti dizajni kabela. Kada je riječ o trožilnom izmjeničnom elektroenergetskom kabelu, neki od najčešćih tipova u uporabi su MVAC 3C XLPE za srednji napon i HVAC 3C XLPE za visoki napon, te HVAC 1C XLPE radi li se o jednožilnom kabelu. Kod istosmjernih kabela u ovisnosti o izolacijskom materijalu podjela je na HVDC XLPE i HVDC MI. [5] Građe spomenutih kabela prikazane su na slikama 2.1 i 2.2.

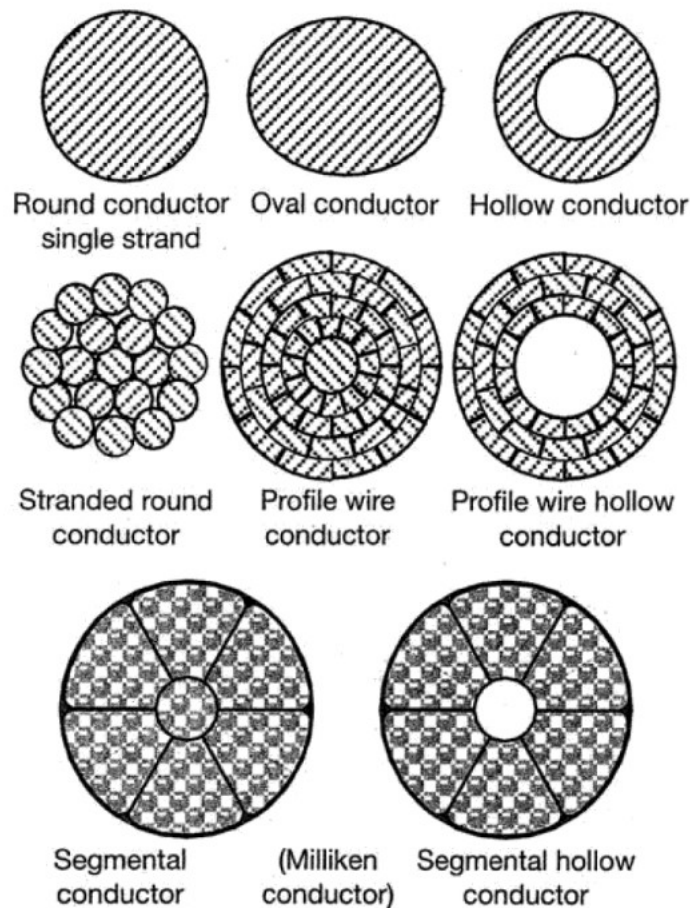


Slika 2.1: Građa izmjeničnih kabela (redom s lijeva na desno MVAC 3C XLPE, HVAC 3C XLPE, HVAC 1C XLPE) [5]



Slika 2.2: Građa istosmjernih elektroenergetskih kabela (redom s lijeva na desno HVDC XLPE, HVDC MI) [5]

Kao vodič u podvodnim kabelima koristi se bakar ili aluminij. Iako je bakar znatno skuplji od aluminija, njegova uporaba je masovnija zbog pogodnijih vodičkih svojstava. Također, koristi li se bakar, polumjer presjeka vodiča koji je potreban je manji pa je samim time manja potrebna količina ostalih materijala koji se koriste u daljnjim slojevima, ali naravno postoje i situacije u kojima se aluminij pokazuje kao bolja opcija. U nekim projektima se koristi vodič od aluminija na jednom dijelu rute, dok na drugom dijelu rute imamo vodič od bakra. Primjer HVDC kabela s kombinacijom vodiča je Estlink veza odnosno veza između Estonije i Finske u kojoj su bakreni vodiči korišteni u podmorskom dijelu, dok se aluminij koristio na kopnenom dijelu.[5]



Slika 2.3: Presjeci vodiča podmorskih kabela [2]

XLPE kabel bi trebao imati vodič s poprečnim presjekom koji je dovoljan da zadovolji zahtjeve sustava za potreban kapacitet prijenosa energije. Troškovi gubitaka energije mogu se smanjiti uporabom većeg presjeka vodiča. Gubici opterećenja u XLPE kabelima prvenstveno su posljedica ohmskih gubitaka u vodiču i metalnoj zaštiti. XLPE kabeli se mogu trajno opteretiti na temperaturu vodiča od 90°C.[1] Dielektrični gubici izolacije XLPE-a prisutni su i pri nultom opterećenju. Ti gubici ovise o primijenjenom radnom naponu i trebaju se uzeti u obzir iznad 100 kV. Dielektrični gubici u XLPE kabelima su niži nego kod EPR i kabela napunjenih fluidom. Proračun dopuštenog strujnog opterećenja podmorskih kabela slijedi ista pravila kao i za kopnene kabele, međutim, postoje neke razlike.

Trojezgreni podmorski kabeli obično imaju armaturni oplet od čeličnih žica. Jednojezgreni kabeli imaju nemagnetski oklop. Jednojezgreni kabeli se mogu polagati odvojeno ili blizu. Blisko

polaganje daje manje gubitke. Odvajanje eliminira međusobno zagrijavanje, ali znači veće gubitke u oklopu. Inducirana struja u oklopu može biti visoka, do iste vrijednosti kao i u vodiču.

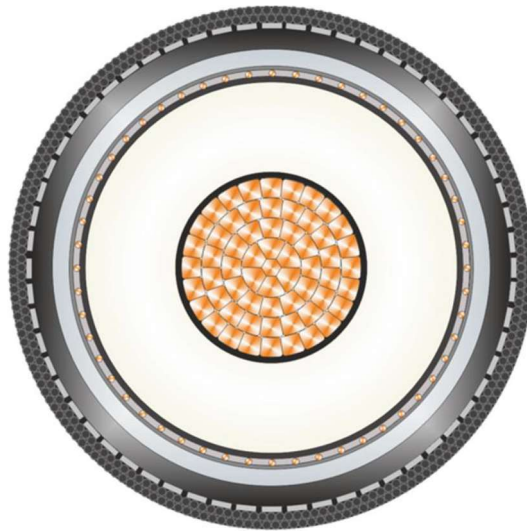
Uzdužna vodena nepropusnost često je zahtijevana od podmorskih električnih kabela kako bi spriječila migraciju vode u kabel u slučaju kvara kabela. Iz tog razloga sredstva za bubrenje u obliku pudera ili vune se postavljaju između slojeva vodiča. U slučaju kontakta s vodom, oni blokiraju njen daljnji protok, a za istu svrhu se može koristiti i vazelin.

Izolacija kabela je dielektrično napregnuta električnim poljem oko vodiča kabela uslijed pogonskog napona kabela.. Od najveće je važnosti da je sustav izolacije u potpunosti čist i jednolik. Također, izolacija mora biti mehanički robusna i otporna na temperaturu i starenje. U periodu od preko 150 godina isprobavani su i razvijani razni izolacijski materijali, a danas se podmorski kabeli na srednjem i visokom naponu izrađuju od samo nekoliko različitih izolacijskih materijala.

Polietilen je nepolaran, polukristalni termoplastični materijal koji se teoretski može ponovno taliti. Za električnu instalaciju dostupan je u nekoliko oblika: niske gustoće, srednje gustoće i visoke gustoće. Zbog ograničenog iznosa temperature kabela, polietilen je naknadno zamijenjen umreženim polietilenom (XLPE) koji može podnijeti temperature do 90 °C i temperature kratkog spoja iznad 200 °C. Umreženi polietilen zbog svojih pogodnih svojstava je čest u primjeni, a njegova svojstva ovise o načinu proizvodnje, formacije materije, pripremi uzorka, temperaturi i još mnogo drugih faktora. U suvremenom kabelu poluprovodljivi zaslonski materijali predstavljaju efektivnu barijeru za ione bakra.

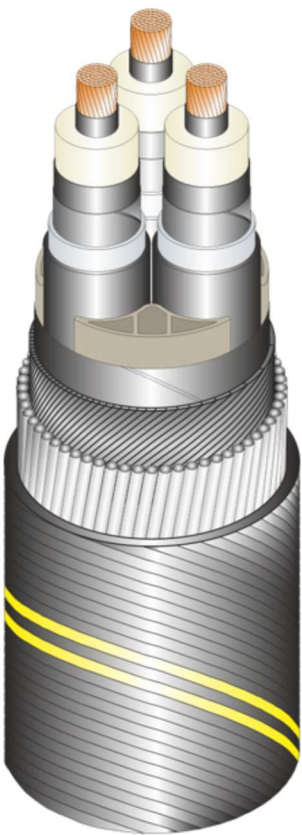
Predstavljena su dva primjera kabela pogodnog za polaganje.

Prvi primjer kabela pogodnog za polaganje je jednožilni ekstrudirani podmorski kabel s bakrenim okruglim presjekom vodiča, XLPE izolacija, ekran od bakrene žice, plašt od legure olova, poluvodički polietilenski omotač, oklop od čelične ravne žice i dva sloja polipropilenskih niti. Presjek kabela prikazan je na sljedećoj slici 2.4.



Slika 2.4: Presjek jednožilnog kabela [4]

Drugi primjer je trožilni podmorski kabel s bakrenim okruglim kompaktnim vodičima, XLPE izolacija, plašt od legure olova, plašt od poluvodičkog polietilena, podloga od trake, žica od nehrđajućeg čelika oklopne i polipropilenske niti (npr. 3x1000 mm² , 220 kV) .



Designation:	FXBLTV 3x1000 mm ²	
Rated voltage	220	kV
Impulse level	1050	kV
Conductor		
Type/material	round & compacted / Cooper	
Longitudinal water sealed	yes	
Cross-section	1000 mm ²	
Diameter	38.6	mm
Conductor tape		
Material	semi-conductive tape	
Thickness	0.2	mm
Conductor screen		
Material	semi-conductive PE	
Thickness	1.5	mm
Insulation		
Material	XLPE	
Thickness	23.0	
Insulation screen		
Material	semi-conductive PE	
Thickness	1.4	mm
Longitudinal water barrier		
Material	swelling tape	
Thickness	0.7	mm
Metallic sheath		
Material	lead alloy	
Thickness	3.6	mm
Protective sheath		
Material	semi-conductive PE	
Thickness	2.6	mm
Assembling		
Material 1	polymeric fillers	
Diameter	226	mm
Length of lay	2750 (left)	mm
Cable core binder		
Material	polymeric tapes	
Thickness	0.3	mm
Armour bedding		
Material	polymeric tapes	
Thickness	0.2	mm
Armour		
Material 1	stainless steel wires	
Material 2	bitumen	
Wire diameter	5.0	mm
Number of wires	133	
Length of lay	2900 (right)	mm
Outer cover		
Material 1	polypropylene yarns	
Material 2	bitumen	
Thickness	2 x 2	mm
Complete cable		
Diameter approx.	245	mm
Weight approx.	113	kg/m

Slika 2.5: Prikaz trožilnog kabela i njegova svojstva [4]

3. Proračun dopuštenog strujnog opterećenja visokonaponskih podmorskih kabela

3.1 Izmjenični trožilni podmorski kabeli

Proračun je prikazan za trožilni podmorski kabel s bakrenim kompaktnim vodičima, XLPE izolacijom, olovnim legiranim plaštom, polietilenskim omotačem s poluvodičkim svojstvima, trakastim slojem za posteljicu, oklopom od nehrđajućeg čelika i polipropilenskim nitima, (npr. Kabel 3x1000 mm², 220 kV). [4] Uvjeti polaganja:

- Kabel ukopan u morsko dno
- Dubina polaganja kabla 1 m
- Temperatura tla na morskom dnu 15°C
- Toplinska otpornost tla 0.7 K·m/W
- Jedan krug termalno neovisan

Izračun započinjemo izračunom faktora polaganja:

$$f_{layup} = \sqrt{1 + \left[\frac{\pi(1.29D_{core})}{L_{core}} \right]^2} \quad (3.1)$$

Zatim je potrebno izračunati otpor vodiča pri temperaturnom naprezanju:

DC otpor vodiča

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (\Omega/m) \quad (3.2)$$

Argument Besselove funkcije koji se koristi za izračunavanje skin efekta:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s \quad (3.3)$$

Za faktor skin efekta uzimamo $x_s^2 = 5.5995477246$

Argument Besselove funkcije koji se koristi za izračunavanje učinka blizine:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (3.4)$$

Faktor učinka blizine:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (3.5)$$

AC otpor vodiča po metru vodiča:

$$R_{core} = R'(1 + y_s + y_p) (\Omega/m) \quad (3.6)$$

Korekcija AC otpora zbog polaganja žila:

$$R = f_{layup} \cdot R_{core} (\Omega/m) \quad (3.7)$$

Dielektrički gubici:

Kapacitet:

$$C_{core} = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_{c_sc}}\right)} 10^{-1} F/m \quad (3.8)$$

Korekcija kapaciteta zbog polaganja jezgri:

$$C = f_{layup} \cdot C_{core} \quad (3.9)$$

Kutna frekvencija sustava:

$$\omega = 2\pi f \left(\frac{rad}{s}\right) \quad (3.10)$$

Dielektrični gubitak po jedinici duljine u svakoj fazi:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta (W/m) \quad (3.11)$$

Faktor gubitka za plašt

Izračun površine poprečnog presjeka plašta:

$$A_s = \pi \cdot t_s \cdot (D_s - t_s) \quad (3.12)$$

AC otpor ekrana na 20°C po jedinici duljine je:

$$R_{so} = \frac{\rho_s}{A_s} f_{layup} (\Omega/m) \quad (3.13)$$

AC otpor plašta na procijenjenoj temperaturi:

$$R_s = R_{s0}[1 + \alpha_s(\theta_{sc} - 20)] \quad (\Omega/m) \quad (3.14)$$

Izračun reaktancije po jediničnoj dužini ovojnice:

Srednji promjer ovojnice:

$$d = D_s - t_s \quad (m) \quad (3.15)$$

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) f_{layup} \quad (\Omega/m) \quad (3.16)$$

Faktor gubitaka za cirkulacijske gubitke plašta:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (3.17)$$

Gubici vrtložnih struja:

$$\lambda''_1 = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \quad (3.18)$$

gdje je:

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (3.19)$$

$$(3.20)$$

$$m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$$

$$\Delta_1 = (1.14m^{2.45} + 0.33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.92m+1.66)} \quad (3.21)$$

$$\rho_s = \rho(1 + \alpha_s(\theta_{sc} - 20)) \quad (3.22)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}} \quad (3.23)$$

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6) \quad (3.24)$$

Faktor učinka za vrtložne struje

$$M = N = \frac{R_s}{X} \quad (3.25)$$

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)^2(N^2 + 1)} \quad (3.26)$$

Uz gubitke u cirkulaciji i gubitke na vrtložne struje:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + F \cdot \lambda_1'' \quad (3.27)$$

Gubici u oklopu kabela sa oklopom od nemagnetskog žice mogu se zanemariti:

$$\lambda_2 = 0$$

Toplinsku otpornost trake za blokiranje vode preko vodiča:

$$T_{1_{condt}} = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{cndt}}{d_c}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.28)$$

Toplinski otpor ekrana vodiča:

$$T_{1_{csc}} = \frac{\rho_{sc}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{sc}}{d_{condt}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.29)$$

Toplinski otpor izolacije:

$$T_{1_i} = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln\left(\frac{D_i}{d_{sc}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.30)$$

Toplinski otpor izolacijskog ekrana:

$$T_{1_{isc}} = \frac{\rho_{sc}}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{si}}{D_i}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.31)$$

Toplinski otpor trake za blokiranje vode ispod olovnog omotača:

$$T_{1_{uwb}} = \frac{\rho_{wb}}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{uwb}}{D_{si}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.32)$$

Toplinski otpor između vodiča i zaslona čini zbroj gore definiranih toplinskih otpora:

$$T_{1_{core}} = T_{1_{condt}} + T_{1_{csc}} + T_{1_i} + T_{1_{isc}} + T_{1_{uwb}} (K \cdot m/W) \quad (3.33)$$

Toplinski otpor između vodiča i zaslona kompenziran za postavljanje jezgre:

$$T_1 = \frac{T_{1_{cor}}}{f_{layup}} (K \cdot m/W) \quad (3.34)$$

Toplinski otpor između olovnog plašta i oklopa:

Toplinski otpor oklopa oko svake jezgre:

$$T_{2scPE} = \frac{\rho_{scPE}}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{scPE}}{D_{pb}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.35)$$

$$X = \frac{\frac{D_{arm} - D_{cabl}}{2}}{D_s} \quad (3.36)$$

$$G = 2\pi(0.00022619 + 2.11429X - 20.4762X^2) \quad (3.37)$$

$$T_{2fi} = \frac{\rho_{fillbt}}{6\pi} G (K \cdot m/W) \quad (3.38)$$

Toplinski otpor između zaslona i oklopa:

$$T_2 = \frac{1}{nf_{layup}} T_{2scPE} + T_{2fill} \quad (3.39)$$

Toplinski otpor T_3 vanjskog pokrova:

$$T_3 = \frac{\rho_{Ti}}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{D_A}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.40)$$

Vanjski toplinski otpor:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (3.41)$$

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left[\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right] (K \cdot m/W) \quad (3.42)$$

Dopušteni iznos struje

Porast temperature vodiča iznad temperature okoline:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_{amb} \quad (3.43)$$

Vrijednost struje:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5 \cdot T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (3.44)$$

I na samom kraju, potrebno je napraviti proračune gubitaka, a njih čine:

Gubici u vodiču:

$$W_c = RI^2 \quad (3.44)$$

Gubitak olovnog omotača:

$$W_s = \lambda_1 RI^2 \quad (3.45)$$

Gubici oklopa vodiča:

$$W_a = \lambda_2 RI^2 \quad (3.46)$$

3.2 Izmjenični jednožilni podmorski kabeli

Odabrani tip kabela je jednožilni ekstrudirani podmorski kabel s bakrenim kompaktnim okruglim vodičem, XLPE izolacijom, bakrenim žičanim ekranom, olovnom legurom plašta, polietilenskim plaštom, armaturom od čelične ravne žice i dva sloja polipropilenskih niti. [4]

Nazivna struja opterećenja će se odrediti za sljedeću konfiguraciju polaganja:

- Dubina polaganja je 1 m od vrha kabela
- Ravan položaj kabela
- Temperatura tla: 15 °C
- Termalna otpornost tla: 0,7 K.m/W

Računamo radnu temperaturu svakog vodiča:

$$\theta_n = \left(I^2 R_n + \frac{1}{2} W_d \right) \cdot T_1 + \left(I^2 R_n (1 + \lambda_{1,n}) + W_d \right) \cdot T_2 + \left(I^2 R_n (1 + \lambda_{1,n} + \lambda_{2,n}) + W_d \right) (T_3 + T_{4,n}) + \theta_\alpha \quad (3.47)$$

Otpor vodiča pri radnoj temperaturi

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (\Omega/m) \quad (3.48)$$

Argument funkcije Bessela koja se koristi za izračunavanje skin efekta:

$$x_{s-n}^2 = \frac{8\pi f}{R'_n} 10^{-7} k_s \quad (3.49)$$

Faktor skin efekta:

$$\text{Za } 0 < x_s \leq 2.8 \quad y_{sn} = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (3.50)$$

Argument funkcije Bessela koji se koristi za izračunavanje efekta blizine

$$x_{pn}^2 = \frac{8\pi f}{R'_n} 10^{-7} k_p \quad (3.51)$$

Faktor učinka blizine:

$$y_{n.p} = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (3.52)$$

AC Otpor vodiča:

$$R_n = R'_n (1 + 1.5(y_s + y_p)) \quad [\Omega/m] \quad (3.53)$$

Dielektrični gubici:

$$\text{Kapacitet:} \quad C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9} \quad [F/m] \quad (3.54)$$

$$\text{Kutna frekvencija:} \quad \omega = 2\pi f \quad (\text{rad/s}) \quad (3.55)$$

Dielektrički gubitak po jedinici duljine u svakoj fazi:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad [W/m] \quad (3.56)$$

Otpor ekrana pri 20°C:

$$R_{so_sc}^* = \frac{\rho_{sc}}{N_{cws} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{cws}}{2}\right)^2} \quad [\Omega/m] \quad (3.57)$$

Korekcija AC otpora zaslona uzimajući u obzir faktor duljine polaganja:

$$R_{so_PB} = \frac{\rho_{PB}}{t_{PB} \cdot \pi (D_{PB} - t_{PB})} \quad [\Omega/m] \quad (3.58)$$

Otpornost plašta od legure olova pri 20°C:

$$R_A^* = \frac{\rho_A}{N_A \cdot (h \cdot w)} \quad [\Omega/m] \quad (3.59)$$

$$R_A = R_A^* \cdot f_{lay_A} \cdot 1.2466666667 \quad [\Omega/m] \quad (3.60)$$

Radna temperatura zaslona od bakrene žice dana je izrazom:

$$\theta_{sc,n} = \theta_n - (I^2 R_n + 0.5 W_d) T_1 \quad (3.61)$$

Radna temperatura plašta od legure olova dana je izrazom:

$$\theta_{PB,n} = \theta_n - \{ (I^2 R_n + 0.5 W_d) T_1 + [I^2 R_n (1 + \lambda'_1) + W_d] T_{2w} \} [^\circ\text{C}] \quad (3.62)$$

Radna temperatura oklopnih žica:

$$\theta_{ar,n} = \theta_n - \{ (I^2 R_n + 0.5 W_d) T_1 + [I^2 R_n (1 + \lambda_{1,n}) + W_d] n T_2 \} ^\circ\text{C} \quad (3.63)$$

Bakrene žice prikazuju AC otpor na radnoj temperaturi:

$$R_{s_{sc},n} = R_{so_{sc}} [1 + \alpha_{sc} (\theta_{sc,n} - 20)] \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (3.64)$$

AC otpornost olova na radnoj temperaturi:

$$R_{s_{PB},n} = R_{so_{PB}} [1 + \alpha_{PB} (\theta_{PB,n} - 20)] \quad (3.64)$$

Otpornost zaslona i legure olova na radnoj temperaturi:

$$R_{s_{PB},n} = \frac{R_{ssc_m} \cdot R_{s_{PB}_m}}{R_{ssc_m} + R_{s_{PB}_m}} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (3.65)$$

Otpor radne oklopne žice na radnoj temperaturi

$$R_{s_{A},n} = R_A [1 + \alpha_A (\theta_{ar,n} - 20)] \quad (3.66)$$

Ekvivalentna otpornost plašta i otpora paralelno

$$R_{e,n} = \frac{R_{s_{A},n} \cdot R_{s_n}}{R_{s_{A},n} + R_{s_n}} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (3.67)$$

Induktivitet zbog plašta izračunava se na sljedeći način

$$H_s = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2s_2}{d} \right) \quad (3.68)$$

$$s_2 = s \sqrt[3]{2} = 10 \cdot \sqrt[3]{2} = 12,5992104989 \text{ m} \quad (3.69)$$

$$d = \sqrt{\frac{d_{cws\ mean}^2 + d_{pb\ mean}^2}{2}} = 109.8557690793 \cdot 10^{-3} \quad (3.70)$$

Induktivitet čeličnih žica izračunava se na sljedeći način:

$$H_1 = \pi \mu_e \cdot \left(\frac{n_1 \cdot d_f^2}{p \cdot d_A} \right) \cdot 10^{-7} \cdot \sin \beta \cos \gamma \quad (3.71)$$

Ukupni gubitak u plaštu i oklopu je:

$$W_{(s+A),n} = I^2 \cdot R_{e,n} \cdot \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_{e,n} \cdot B_2}{(R_{e,n} + B_2)^2 + B_1^2} \right) \quad (3.72)$$

Gubici vodiča:

$$W_c = I^2 \cdot R \quad (3.73)$$

Može se pretpostaviti da je faktor gubitaka u ovojnici i oklopu uzrokovan cirkulirajućim strujama približno jednak:

$$\lambda'_1 = \lambda'_2 = \frac{W_{(s+A)}}{W_c} \quad (3.74)$$

Gubici vrtložnih struja:

$$m = \frac{\omega}{R_{s_{PB}}} 10^{-7} \quad (3.75)$$

$$\lambda_{0_m} = 6 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d_{pb_mean}}{2s} \right)^2 \quad (3.76)$$

$$\Delta_{1_m} = (0.86m^{3.08}) \left(\frac{d_{pb_mean}}{2s} \right)^{(1.4m+0.7)} \quad (3.77)$$

$$\Delta_2 = 0$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_{PB} \cdot [1 + \alpha_{PB}(\theta_{PB} - 20)]}} \quad (3.78)$$

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_{PB}}{D_{PB}} \right)^{1.74} (\beta_1 D_{PB} 10^{-3} - 1,6) \quad (3.79)$$

$$\lambda''_{1_m} = \frac{R_{s_{PB}}}{R} \left[g_s \lambda_{0m} (1 + \Delta_{1m} + \Delta_{2m}) + \frac{(\beta_1 t_{PB})^4}{12 \cdot 10^{12}} \right] \quad (3.80)$$

Izračun faktora F za plašt od legure olova

$$X_{PB} = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{2s}{d_{PB_mean}} \right) \quad (3.81)$$

$$X_m = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \ln(2) \quad (3.82)$$

$$M = \frac{R_{s_{PB}}}{X_{PB} + X_m} \quad (3.83)$$

$$N = \frac{R_{s_{PB}}}{X_{PB} - \frac{X_m}{3}} \quad (3.84)$$

$$F_m = \frac{4M^2N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)} \quad (3.85)$$

Može se pretpostaviti da je faktor gubitaka u plaštu i oklopu jednak:

$$\lambda_{1,n} = \lambda'_{1,n} + F_n \lambda''_{1,n} \quad (3.86)$$

$$\lambda_{2,n} = \lambda'_{2,n} + \lambda''_{2,n}$$

Toplinski otpor između vodiča i zaslona

$$T_{1_sct} = \frac{\rho_{wbc}}{2\pi} \ln \left(\frac{d_{sct}}{d_c} \right) (K \cdot m/W) \quad (3.87)$$

Toplinski otpor ekrana vodiča:

$$T_{1_csc} = \frac{\rho_{sc}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{sc}}{d_{sct}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.88)$$

Toplinski otpor izolacije:

$$T_{1_i} = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln\left(\frac{D_i}{d_{sc}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.89)$$

Toplinski otpor ekrana izolacije:

$$T_{1_isc} = \frac{\rho_{sc}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{sci}}{d_i}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.90)$$

Toplinski otpor trake za blokiranje vode ispod ekrana bakrenih žica:

$$T_{1_uwb} = \frac{\rho_{wb}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{uwb}}{d_{sci}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.91)$$

Toplinski otpor između vodiča i zaslona čini zbroj gore definiranih toplinskih otpora:

$$T_{1_cor} = T_{1_sci} + T_{1_csc} + T_{1_i} + T_{1_isc} + T_{1_uwb} (K \cdot m/W) \quad (3.92)$$

Toplinski otpor između olovnog plašta i oklopa:

$$T_{2_wb} = \frac{\rho_{wb}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{wbt}}{d_{sc}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.93)$$

Toplinski otpor PE oklopa:

$$T_{2_PE} = \frac{\rho_{sc}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{scPE}}{d_{PB}}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.94)$$

Toplinski otpor između zaslona i oklopa:

$$T_2 = T_{2_wb} + T_{2_PE} \quad (3.95)$$

Toplinski otpor T_3 vanjske usluge:

$$T_3 = \frac{\rho_{oc}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{oc}}{d_A}\right) (K \cdot m/W) \quad (3.96)$$

Vanjski toplinski otpor:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (3.97)$$

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left[\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{W_1}{W_m} \ln \left[\sqrt{\frac{s^2 + (2L)^2}{s}} \right] + \frac{W_2}{W_m} \ln \left[\sqrt{\frac{s^2 + (2L)^2}{s}} \right] \right] (K \cdot m/W) \quad (3.98)$$

Dopušteni iznos struje

Porast temperature vodiča iznad temperature okoline:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_{amb} \quad (3.99)$$

Vrijednost struje:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_m - W_d[0.5 \cdot T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R_m \cdot T_1 + nRR_m(1 + \lambda_{1,m})T_2 + nR_m(1 + \lambda_{1,m} + \lambda_{2,m})(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (3.100)$$

I na samom kraju, potrebno je napraviti proračune gubitaka, a njih čine:

Gubici u vodiču u srednjoj fazi:

$$P_c = R_m I^2 \quad (3.101)$$

Gubitak olovnog omotača u srednjoj fazi:

$$P_s = \lambda_{1,m} R_m I^2 \quad (3.102)$$

Gubici oklopa vodiča u srednjoj fazi:

$$P_{arm} = \lambda_{2,m} R_m I^2 \quad (3.103)$$

Gubici u vodiču u vodećoj fazi

$$P_c = R I^2 \quad (3.104)$$

Gubitak omota u vodećoj fazi

$$P_s = \lambda_{1,2} R I^2 \quad (3.105)$$

Gubici vodiča u fazi zaostajanja

$$P_{arm} = \lambda_{2,2} R I^2 \quad (3.106)$$

3.3 Primjer proračuna dopuštenog strujnog opterećenja izmjeničnog trožilnog kabela

Proračun je izrađen za trožilni podmorski kabel $U_n=220$ kV s bakrenim kompaktnim vodičima 3×1000 mm², XLPE izolacijom, olovnim legiranim plaštom, polietilenskim omotačem s poluvodičkim svojstvima, trakastim slojem za posteljicu, oklopom od nehrđajućeg čelika i polipropilenskim nitima, prikazan sa tehničkim podacima na slici 2.5 [4]

Uvjeti polaganja:

- Kabel ukopan u morsko dno
- Dubina polaganja kabela 1 m
- Temperatura tla na morskom dnu 15°C
- Toplinska otpornost tla 0.7 K·m/W
- Jedan krug termalno neovisan

Izračun počinje s faktorom polaganja koji iznosi:

$$f_{layup} = \sqrt{1 + \left[\frac{\pi(1.29D_{core})}{L_{core}} \right]^2} = \sqrt{1 + \left[\frac{\pi(1.29 \cdot 104.4)}{2750} \right]^2} = 1.011811089$$

Toplinski otpor na radnoj temperaturi je

$$\begin{aligned} R' &= R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \left(\frac{\Omega}{m} \right) = 0.0176 \times 10^{-3} [1 + 3.93 \times 10^{-3} - 20] \\ &= 2.244176 \times 10^{-5} \frac{\Omega}{m} \end{aligned}$$

Aproksimacija argumenta Besselove funkcije koji služi za izračun skin efekta

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p = \frac{8\pi \cdot 50}{2.244176 \times 10^{-5}} 10^{-7} \cdot 1 = 5.5995477246$$

Aproksimacija faktora skin efekta:

$$\begin{aligned}
y_p &= \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \\
&= \frac{5,5995477246}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{38,6}{104,6}\right)^2 \left[0.312 \left(\frac{38,6}{104,6}\right)^2 \right. \\
&\quad \left. + \frac{1.18}{\frac{5,5995477246}{192 + 0.8 \cdot 5,5995477246} + 0.27} \right] = 0,05683892091
\end{aligned}$$

Otpor vodiča po metru:

$$\begin{aligned}
R_{core} &= R'(1 + y_s + y_p) (\Omega/m) \\
&= 2,244176 \times 10^{-5} (1 + 0,1444369014 + 0,056838893091) \\
&= 2,6958744125 \times 10^{-5} \Omega/m
\end{aligned}$$

Podešavanje otpora izmjenične struje zbog položaja

$$\begin{aligned}
R &= f_{layup} \cdot R_{core} (\Omega/m) = 1,011811089 \cdot 2,6958744125 \times 10^{-5} \\
&= 2,7277165257 \times 10^{-5} \Omega/m
\end{aligned}$$

Kapacitet

$$C_{core} = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_{c_sc}}\right)} \cdot 10^{-9} (F/m) = \frac{2,5}{18 \ln\left(\frac{88}{42}\right)} \cdot 10^{-9} = 1,877721356 \times 10^{-10} F/m$$

Podešavanje kapaciteta zbog polaganja jezgri:

$$\begin{aligned}
C &= f_{layup} \cdot C_{core} (\Omega/m) = 1,0118110892 \cdot 1,877721356 \times 10^{-10} \\
&= 1,8998992881 \times 10^{-10} F/m
\end{aligned}$$

Kutna frekvencija sustava:

$$\omega = 2\pi f \left(\frac{rad}{s}\right) = 2\pi \cdot 50 = 100\pi \frac{rad}{s}$$

Dielektrični gubitak po jedinici duljine u svakoj fazi:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta (W/m) = 100\pi \cdot 1,8998992881 \times 10^{-1} \cdot 2200000\sqrt{3} \cdot 1 \times 10^{-3}$$

$$= 0,9629518229 W/m$$

Proračun površine poprečnog presjeka plašta:

$$A = \pi \cdot t_s \cdot (D_s - t_s) = \pi \cdot 3,6 \cdot (99,4 - 3,6) = 1083,4724743701 \text{ mm}^2$$

Otpor ekrana na 20°C po jedinici duljine je:

$$R_{so} = \frac{\rho_s}{A_s} f_{layup} (\Omega/m) = \frac{21,4 \times 10^{-8}}{1083,4724743701} \cdot 1,0118110892 = 1,9984593814 \times 10^{-4} \Omega/m$$

Otpor plašta na procijenjenoj temperaturi:

$$R_s = R_{so} [1 + \alpha_s (\theta_{sc} - 20)] \left(\frac{\Omega}{m} \right) = 1,9984593814 \times 10^{-4} [1 + 4,0 \times 10^{-3} (70 - 20)]$$

$$= 2,3981512577 \frac{\Omega}{m}$$

Izračun reaktancije po jediničnoj duljini plašta

$$d = D_s - t_s (m) = 99,4 - 3,6 = 95,8 \text{ mm}$$

$$X = 2\omega 10^{-7} \left(\frac{2s}{d} \right) f_{layup} (\Omega/m) = 2 \cdot 100\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{2 \cdot 104,6}{95,8} \right) 1,0118110892 \Omega/m$$

Faktor gubitaka za cirkulacijske gubitke plašta:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2} = \frac{2,3981512577 \times 10^{-4}}{2,7277156275 \times 10^{-5}} \frac{1}{1 + \left(\frac{2,3981512577 \times 10^{-4}}{4,9653050279 \times 10^{-5}} \right)^2} = 0,3613987411$$

Faktor gubitaka za gubitke vrtložne struje:

$$m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7} = \frac{100\pi}{2,3981512577 \times 10^{-4}} 10^{-7} = 0,1310006049$$

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 = 3 \left(\frac{0,1310006049^2}{1 + 0,1310006049^2} \right) \left(\frac{95,8}{2 \cdot 104,6} \right)^2 = 0,01061416285$$

$$\Delta_1 = (1,14m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,92m+1,66)} =$$

$$= (1,14 \cdot 0,1310006049^{2,45} + 0,33) \left(\frac{95,8}{2 \cdot 104,6} \right)^{(0,92 \cdot 0,1310006049 + 1,66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

$$\rho_s = \rho(1 + \alpha_s(\theta_{sc} - 20)) = 21,4 \times 10^{-8}(1 + 4,0 \times 10^{-3}(70 - 20)) = 2,5680 \times 10^{-7}$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7\rho_s}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 100\pi}{10^7 \cdot 2,5680 \times 10^{-7}}} = 39,2086923756$$

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s}\right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1,6) = 1 + \left(\frac{3,6}{99,4}\right)^{1.74} (39,2086923756 \cdot 99,4 \cdot 10^{-3} - 1,6) \\ = 1,0071406883$$

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \\ = \frac{2,3981512577 \times 10^{-4}}{2,7277156257 \times 10^{-5}} \left[1,0071406883 \cdot 0,01061416285 \right. \\ \left. \cdot (1 + 0,08409364691 + 0) + \frac{39,2086923756 \cdot (3,6)^4}{12 \times 10^{12}} \right] = 0,1021781544$$

Faktor učinka za vrtložne struje:

$$M = N = \frac{R_s}{X} = \frac{2,3981512577 \times 10^{-4}}{4,9653050279 \times 10^{-5}} = 4,8298165857$$

$$F = \frac{4M^2 N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)} \\ = \frac{44,8298165857^2 4,8298165857^2 + (4,8298165857 + 4,8298165857)^2}{4(4,8298165857^2 + 1)(4,8298165857^2 + 1)} \\ = 0,9588936273$$

Dodavanja cirkulacijskih gubitaka i gubitaka vrtložnih struja

$$\lambda_1 = \lambda_1' + F \cdot \lambda_1'' = 0,3613987411 + 0,9588936273 \cdot 0,1021781544 = 0,4593767223$$

Gubici oklopa u kabelima s oklopom od ne magnetske žice mogu se zanemariti

$$\lambda_2 = 0$$

Toplinska otpornost provodne trake:

$$T_{1_{cond_t}} = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{cond_t}}{d_c}\right) (K \cdot m/W) = \frac{6,0}{2\pi} \ln\left(\frac{39,0}{38,6}\right) = 0,009844722848 K \cdot m/W$$

Toplinski otpor ekrana vodiča:

$$T_{1_csc} = \frac{\rho_{sc}}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{sc}}{d_{con\ t}}\right) \left(K \cdot \frac{m}{W}\right) = \frac{2,5}{2\pi} \ln\left(\frac{42}{39}\right) = 0,02948662523 K \cdot \frac{m}{W}$$

Toplinski otpor izolacije:

$$T_{1i} = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln\left(\frac{D_i}{d_{sc}}\right) \left(\frac{K m}{W}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln\left(\frac{88}{42}\right) = 0,4120259168 \frac{K m}{W}$$

Toplinski otpor izolacijskog zaslona:

$$T_{1isc} = \frac{\rho_{sc}}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{si}}{D_i}\right) \left(\frac{K m}{W}\right) = \frac{2,5}{2\pi} \ln\left(\frac{90,8}{88,0}\right) = 0,031246281528 K \cdot m/W$$

Toplinska otpornost trake za blokiranje vode ispod olovnog omotača:

$$T_{1uwb} = \frac{\rho_{wb}}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{uwb}}{D_{si}}\right) \left(\frac{K m}{W}\right) = \frac{12}{2\pi} \ln\left(\frac{92,2}{90,8}\right) = 0,02922246130 K \cdot m/W$$

Toplinski otpor između vodiča i zaslona:

$$\begin{aligned} T_{1_core} &= T_{1_cond\ t} + T_{1_csc} + T_{1_i} + T_{1_isc} + T_{1_uwb} \left(K \frac{m}{W}\right) \\ &= 0,009844722848 + 0,02948662523 + 0,4120259168 + 0,01246281528 \\ &\quad + 0,02922246130 = 0,4930425415 K \cdot m/W \end{aligned}$$

Toplinski otpor između vodiča i zaslona kompenziran za postavljanje jezgre

$$T_1 = \frac{T_{1_core}}{f_{layup}} \left(K \frac{m}{W}\right) = \frac{0,4930425415}{1,0118110892} = 0,48728714947 K \frac{m}{W}$$

Toplinska otpornost omotača oko svake jezgre:

$$T_{2_scPE} = \frac{\rho_{scPE}}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{sc_PE}}{D_{PB}}\right) \left(K \frac{m}{W}\right) = \frac{2,5}{2\pi} \ln\left(\frac{104,6}{99,4}\right) = 0,02028884852 K \frac{m}{W}$$

Geometrički faktor:

$$X = \frac{\frac{D_{arm} - D_{cabl}}{2}}{D_s} = \frac{\frac{227 - 226}{2}}{104,6} = 0,004780114723$$

$$\begin{aligned} G &= 2\pi(0,00022619 + 2,11429X - 20,4762X^2) \\ &= 2\pi(0,00022619 + 2,11429 \cdot 0,004780114723 - 20,4762 \\ &\quad \cdot 0,004780114723^2) = 0,06198279299 \end{aligned}$$

Toplinska otpornost između vanjskog omotača jezgre i oklopa:

$$T_{2_fill} = \frac{\rho_{fill_bt}}{6\pi} G \left(\frac{K \cdot m}{W} \right) = \frac{6}{6\pi} 0.06198279299 = 0,01972973578 \frac{K \cdot m}{W}$$

Toplinski otpor između zaslona i plašta:

$$T_2 = \frac{1}{n_{fayup}} T_{2_scpe} + T_{2_fill} = \frac{1}{3 \cdot 1,0118110892} 0.02028884852 + 0,01972973578$$

$$= 0,02641373992 \frac{K \cdot m}{W}$$

Toplinski otpor vanjskog pokrova:

$$T_3 = \frac{\rho_{Ti}}{2\pi} \ln \left(\frac{D_e}{D'_a} \right) (K \cdot m/W) = \frac{6}{2\pi} \ln \left(\frac{237}{245} \right) = 0,03170182109 \frac{K \cdot m}{W}$$

Vanjski toplinski otpor:

$$u = \frac{2L}{D_e} = \frac{2 \cdot 1000}{245} = 8,1632653061$$

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) (K \cdot \frac{m}{W})$$

$$= \frac{1}{2\pi} 0,7 \ln \left(8,1632653061 + \sqrt{8,1632653061^2 - 1} \right) = 0,3107202651 \frac{K \cdot m}{W}$$

Temperatura vodiča poraste iznad temperature okoline:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_{amb} = 90 - 15 = 75K$$

Iznos struje:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} =$$

$$\left[\frac{75 - 0,96295182288[0.5 \cdot 0,48728714947 + 3(0,02641373992 + 0,03170182109 + 0,3107202651)]}{2,7277156257 \times 10^{-5} \cdot 0,48728714947 + 3 \cdot 2,7277156257 \times 10^{-5} (1 + 0,4593767223) \cdot 0,02641373992 + 3 \cdot 2,7277156257 \times 10^{-5} (1 + 0,4593767223 + 0) \cdot (0,3107202651 + 0,3107202651)} \right]^{0.5} =$$

$$1133,7238746986 A$$

Iteracijska metoda:

Radna temperatura zaslona dana je kao

$$\theta_{sc} = \theta - (I^2 R + 0,5W_d)T_1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$= 90 - (1133,7238746986^2 \cdot 2,7277156257 \times 10^{-5} + 0.5 \cdot 0.96295182288) \cdot 0.48728714947 = 72,6810261001 \text{ }^\circ\text{C}$$

Otpor plašta na radnoj temperaturi

$$\begin{aligned}
R_s &= R'_{so}[1 + \alpha_s(\theta_{sc} - 20)] \left(\frac{\Omega}{m}\right) \\
&= 1,9984593814 \times 10^{-4}[1 + 4,0 \times 10^{-3}(72,6810251001 - 20)] \\
&= 2,4195829447 \frac{\Omega}{m}
\end{aligned}$$

Faktor gubitka za cirkulacijske gubitke plašta:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} = \frac{2,4195829447}{2,7277156257} \frac{1}{1 + \left(\frac{2,4195829447}{4,9653050279}\right)^2} = 0,3584574925$$

Faktor gubitaka za gubitke vrtložne struje, olovni omotač:

$$m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7} = \frac{100\pi}{2,4195829447} 10^{-7} = 0,1298402545$$

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2}\right) \left(\frac{d}{2s}\right)^2 = 3 \left(\frac{0,1298402545^2}{1 + 0,1298402545^2}\right) \left(\frac{95,8}{2 \cdot 104,6}\right)^2 = 0,01043006726$$

$$\begin{aligned}
\Delta_1 &= (1,14m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s}\right)^{(0,92m+1,66)} \\
&= (1,14 \cdot 0,1298402545^{2,45} + 0,33) \left(\frac{95,8}{2 \cdot 104,6}\right)^{(0,92 \cdot 0,1298402545 + 1,66)} \\
&= 0,08412168597
\end{aligned}$$

$$\Delta_2 = 0$$

$$\begin{aligned}
\rho_s &= \rho(1 + \alpha_s(\theta_{sc} - 20)) = 21,4 \times 10^{-8}(1 + 4,0 \times 10^{-3}(72,6810261001 - 20)) \\
&= 2,5909495834 \times 10^{-7} \Omega m
\end{aligned}$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7\rho_s}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 100\pi}{10^7 \cdot 2,5909495834 \times 10^{-7}}} = 39,0346587696$$

$$\begin{aligned}
g_s &= 1 + \left(\frac{t_s}{D_s}\right)^{1,74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1,6) = 1 + \left(\frac{3,6}{99,4}\right)^{1,74} (39,0346587696 \cdot 99,4 \cdot 10^{-3} - 1,6) \\
&= 1,0070869191
\end{aligned}$$

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

$$= \frac{2,4195829447 \times 10^{-4}}{2,7277156257 \times 10^{-5}} \left[1,0070869191 \cdot 0,01043006726 \right.$$

$$\left. \cdot (1 + 0,08412168597 + 0) + \frac{(39,0346587696 \cdot 3,6)^4}{12 \times 10^{12}} \right] = 0,1013003792$$

$$M = N = \frac{R_s}{X} = \frac{2,4195829447 \times 10^{-4}}{4,9653050279 \times 10^{-5}} = 4,8729794668$$

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)}$$

$$= \frac{4 \cdot 4,8729794668^2 \cdot 4,8729794668^2 + (4,8729794668 + 4,8729794668)^2}{4(4,8729794668^2 + 1)(4,8729794668^2 + 1)}$$

$$= 0,9595893125$$

Dodavanje cirkulacijskih gubitaka i gubitaka vrtložnih struja

$$\lambda_1 = \lambda_1' + F \cdot \lambda_1'' = 0,3584574925 + 0,9595893125 \cdot 0,1013003792 = 0,4556642538$$

Novi iznos dopuštene struje:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

$$= \left[\frac{75 - 0,96295182288[0,5 \cdot 0,48728714947 + 3 \cdot (0,02641373992 + 0,03170182109 + 0,3107202651)]}{2,7277156257 \cdot 0,48728714947 + 3 \cdot 2,7277156257 \cdot (1 + 0,4556642538)0,02641373992 + 3 \cdot 2,7277156257 \cdot (1 + 0,4556642538 + 0)(0,03170182109 + 0,3107202651)} \right]^{0,5}$$

$$= 1134,8196615454 \text{ A}$$

Nakon još jedne iteracije dobivene su vrijednosti:

Tablica 3.1. Rezultati iteracije[4]

θ_{sc}	72,6479847905125 °C
R_s	$2,4193188179 \times 10^{-4} \Omega/m$
λ_1'	0,3584934634
m	0,1298544297
λ_0	0,01043230700

Δ_1	0,08412134024
ρ_s	$2,5906667498 \times 10^{-7} \Omega m$
β_1	39,0367894976
g_s	1,0070875774
λ_1''	0,1013111067
F	0,9595808450
λ_0	0,4557096608

Analogno konačan iznos struje je $I = 1134,819661545 \text{ A}$

Potrebno je napraviti i proračun gubitaka.

Gubici u vodiču:

$$W_c = RI^2 = 2,7277156257 \times 10^{-5} \cdot 1134,819661545^2 = 35,1279491032 \text{ W/m}$$

Gubici omotača:

$$\begin{aligned} W_s &= \lambda_1 RI^2 = 0,4557096608 \cdot 2,7277156257 \times 10^{-7} 1134,819661545^2 \\ &= 16,0081457714 \text{ W/m} \end{aligned}$$

Gubici oklopa:

$$W_a = \lambda_2 RI^2 = 0 \cdot 2,7277156257 \times 10^{-7} 1134,819661545^2 = 0 \text{ W/m}$$

4. Suglasnosti i dozvole za izgradnju podmorskih kabela

4.1. Procesi pridobivanja suglasnosti i dozvola

Treba napomenuti da određene vrste ribolovnih aktivnosti iznad električnih kabela u ekstremnim slučajevima mogu dovesti do opasnih situacija kao i potencijalno opasnih situacija po život. Za mnoge projekte, dobivanje suglasnosti i odobrenja predstavlja zadatak koji se odvija paralelno s inženjerskim radom i drugim projektima koji su u tijeku. Dobivanje dozvola i suglasnosti može se smatrati sporednom aktivnošću, moguće je da tom aktivnošću upravlja poseban tim, ovisno o organizaciji projekta odnosno tvrtke. Za pozitivne rezultate projekta, ovakav pristup može potencijalno biti problematičan, jer komunikacija između tima koji podnosi zahtjeve za dozvole, odnosno suglasnosti i vlasti tj. zainteresirane strane nehotice može ograničiti mogućnosti inženjerskih ili instalacijskih timova da se nose s neočekivanim problemima ili uvjetima instalacije. Dobar interni proces komunikacije projektanata je ključan tijekom faze projekta dobivanja suglasnosti i odobrenja kako bi se osigurala potpuna usklađenost između različitih timova koji su uključeni u projekt.

Podnošenje zahtjeva za dozvole i dobivanje suglasnosti obično se temelji na preliminarnoj fazi i idejnom projektu. [1] Važno je istaknuti da svi detaljni aspekti projekta možda nisu poznati timu projektanata u ovoj ranoj fazi projekta. Stoga se u zadatku dobivanja suglasnosti i odobrenja treba uzeti u obzir dovoljan kontingent kako bi se omogućile buduće promjene u fazama detaljnog inženjerskog projektiranja i tijekom aktivnosti instalacije. Primjer može biti sljedeći; stvarne karakteristike morskog dna mogu biti nespojive s predviđenim alatima za ukopavanje instalacija, a sami alati možda nisu u potpunosti poznati u vrijeme podnošenja zahtjeva za dozvolu odnosno suglasnost pa će možda tako na kraju biti potrebne druge strategije ili sredstva instalacije. Lako može doći do situacije u kojoj se opisi instalacija projekta korišteni u ranoj fazi projekta za komunikaciju s vlastima ili zainteresiranim stranama možda neće biti tako sigurni kao što se čine. Idealno bi bilo da takva neizvjesnost bude razumljiva svim stranama u interakciji između tima projekta i vlasti tj. zainteresiranih strana, međutim, to možda neće uvijek biti slučaj. Na temelju navedenih razmatranja jasno je da bi raniji opisi instalacija projekta i pripadajuće procjene utjecaja na okoliš trebali ostaviti prostor za optimizaciju tijekom kasnijih faza projekta. Također bi trebali razmotriti aktivnosti potrebne tijekom operativne faze kablenskog sustava kao što su održavanje, popravci i dekomisija.

Povećanje znanja o stanju morskog dna, alatima i njihovoj interakciji s morskim dnom i brodovima može dovesti do promjena u plovilima i alatima u opisu instalacije projekta i pružiti optimalna

rješenja. Važno je napomenuti da bi detaljne rasprave o projektu s odgovarajućim opisima zahtijevale puno znanja i iskustva. Razina stručnosti možda neće biti dostupna odobravajućim tijelima i tim projektanata tada mora pažljivo, ali odlučno nastaviti s raspravama. U konačnici, dovoljno smjernica i napora ključni su za dugoročni uspjeh projekta. Za omogućavanje preliminarnе faze i pripreme tehničke dokumentacije za natječaj obično je potrebno provesti ispitivanja morskog dna na moru i pokriti kopneni dio. Prije početka takvih ispitivanja morskog dna, potrebno je dobiti dozvole za te aktivnosti od relevantnih agencija ili vlasti u ranim fazama projekta, što izbjegava potencijalna kašnjenja povezana s postupcima suglasnosti i odobrenja.

Dobivanje suglasnosti i dozvola može biti izazovan zadatak za projekt instalacije podmorskog kabela, ovisno o razmjerima projekta, lokaciji i osjetljivosti okoliša. Zahtjevi za suglasnost i dozvolu utječu na način na koji se podmorski kabel dizajnira, instalira i upravlja. Informacije o projektu, uključujući opis instalacije projekta i ciljeve, tehnički dizajn i inženjerske informacije, pristup i razmatranja izgradnje i instalacije, kao i informacije o radu i održavanju, obično su potrebne za prijavu dozvola i suglasnosti. Temeljito planiranje projekta i proaktivno surađivanje s tijelima za suglasnost i dozvole ključni su za uspješno postizanje zadovoljavajućih suglasnosti i dozvola. [1] Tim zaposlen na projektu treba razumjeti zahtjeve različitih agencija za dozvolu i suglasnost te započeti proces što je prije moguće kako bi se izbjegla nepotrebna kašnjenja projekta. Unutar ovlasti stranaka za dozvole i suglasnosti je pregled, prihvaćanje, modificiranje ili odbijanje lokacije za podmorski kabel, uključujući i kopnene veze. Predlagači projekta trebaju proaktivno osigurati da se pruži sva potrebna informacija kako bi se ispunili zahtjevi za suglasnost i dozvole. Za projekte podmorskih kabela koji se prostiru između više zemalja, postupak suglasnosti i dozvola može biti vrlo složen, s različitim agencijama koje imaju različite postupke, pristupe i propise. Za prijavu potrebnih suglasnosti bit će potrebno preliminarno opisati rutu ili rute kabela i predložene operacije instalacije. Idealno bi bilo da postupak suglasnosti omogućuje više opcija za rutu i koridore umjesto točkastih linija za kabel odnosno kabele, kako bi se omogućila optimizacija i mikrorutiranje ruta te alternativna rješenja za instalaciju. Takve optimizacije mogu rezultirati značajnim smanjenjem troškova i utjecaja na okoliš, kao i poboljšanjem vremenskog izvršenja projekta. Broj opcija i prikaza rute kabela ovisi o propisima za dozvole na morskom području svake zemlje. Za procjenu utjecaja na okoliš i društvo potrebno je imati dobar pregled o predviđenom opsegu instalacijskih aktivnosti. U tu svrhu potrebno je znati koje aktivnosti će se planirati i provoditi, kao i kakve su moguće kontingencije, kako bi se razumno procijenili utjecaji različitih vrsta korištene opreme. Za rutu kabela i općenito za instalaciju, potrebno je identificirati metode održavanja i popravka, što zahtijeva preliminarnu studiju prije konceptualnog projektiranja

i dizajna. Lokalni zahtjevi za suglasnost određuju koji elementi zahtijevaju daljnje pojedinosti. Oni će odrediti koja razina detalja je potrebna za procjenu utjecaja radova instalacije i njenog rada na okoliš te na druge aktivnosti u blizini sustava podmorskog kabela. Na primjer, može se zatražiti procjena i ograničavanje emisija.

4.2.Procjena utjecaja podmorskog kabela na okoliš

Utjecaj podmorskog kabla na okoliš može varirati ovisno o različitim čimbenicima, uključujući lokaciju polaganja, dubinu morskog dna, vrstu kabela i tehničke specifikacije. Potencijalni aspekt utjecaja podmorskog kabela na okoliš je fizički utjecaj jer proces polaganja kabela može utjecati na morsko dno stvarajući privremene promjene u sedimentima i ekosustavu. Moguće su promjene na morskom dnu prilikom izvođenja radova, ali se morsko dno postepeno i oporavlja. Postavljanje podmorskog kabela može utjecati na staništa morskog života i ekosustave. Pogotovo tijekom izgradnje, buke i vibracije mogu utjecati na lokalne organizme. Međutim, podmorski kabeli obično ne uzrokuju dugotrajni utjecaj na morski život i ekosustav nakon što su instalirani. Također, prisutan je i kemijski utjecaj, naime materijali koji se koriste za izradu kabela, kao što su izolacija, omotači i premazi, mogu otpuštati tvari u okoliš što može utjecati na kvalitetu vode i tla u blizini kabela. Većina modernih kabela izrađena je od materijala koji su dizajnirani da budu okolišno prihvatljivi i minimiziraju ovakav utjecaj.

Prilikom polaganja podmorskog kabla, posebno u područjima bogatim arheološkim nalazištima ili kulturnim vrijednostima, postoji potencijalni rizik od oštećenja ili poremećaja stoga se morsko dno prethodno istražuje. Pri ocjenjivanju utjecaja podmorskih kabela na okoliš, važno je provesti temeljne studije utjecaja i pridržavati se regulativa i smjernica za očuvanje okoliša. Tehnološki napredak i inženjerske metode su se razvile kako bi se smanjio negativan utjecaj podmorskih kabela na okoliš.

5. Elementi projekta podmorskih visokonaponskih kabela

5.1 Modeli izrade projekata podmorskih kabela

Svrha inženjerskih aktivnosti u projektu instalacije podmorskog kabela je osigurati dobro planiranu i usklađenu instalaciju kabela. [1] Osim toga, cilj je osigurati da se kabelski sustavi instaliraju ispravno i bez oštećenja, da su kabeli zaštićeni koliko je razumno moguće te da, s aspekta instalacije, mogu raditi s minimalnim prekidima tijekom svog vijeka trajanja. Inženjering također treba uzeti u obzir tehničke, troškovne i aspekte javne sigurnosti, zajedno s vanjskim ograničenjima koja nameću vlasti, zainteresirane strane te smanjenje utjecaja na okoliš.

Delegiranje odgovornosti za izvođenje pojedinih dijelova inženjerskog posla tijekom projekta podmorskog kabela ovisi o pristupu ugovaranja.

Prepoznaje se da projekti podmorskih kabela obuhvaćaju širok spektar primjena, od kabela srednjeg napona (SN) do kabela vrlo visokog napona (VVN), uključujući, na primjer: lokalne kratke riječne ili jezerske prijelaze kabela, instalaciju kabela na dugim udaljenostima između zemalja i kontinenata, kabele među skupinama povezanih vjetroagregata s prikupnim platformama (fiksno dno ili plutajuće), izvozne kabele s priobalnim resursima poput platformi vjetroelektrana na moru i/ili priobalnih podstanica do kopnenih točaka povezivanja (POI) na mrežu, međupovezne kabele između priobalnih podstanica, kabele između vjetroagregata i priobalne podstanice (ako je primjenjivo), kabele za napajanje od kopna do priobalnih objekata, poput platformi za proizvodnju nafte i plina.

Ciljevi koji su prepoznati i definirani za inženjering određenog projekta ovise o kontekstu projekta, karakteristikama uključenih organizacija te o povijesti i iskustvu tih organizacija. Ciljevi tijekom faza inženjeringa mogu uključivati, ali nisu ograničeni na učinkovitu primjenu dostupnog znanja i iskustvo kako bi se olakšao siguran dizajn i povećala vjerojatnost prvotnog pristupa projektu uz smanjene rizike na razinu "koliko je razumno praktično" tijekom izvršenja projekta, kao i za operativno trajanje kabelskog sustava te pružio uvid u rizike povezane s projektom i kategorizirali rizici, omogućili proces upravljanja rizicima, optimizirali troškovi životnog ciklusa instalacije kabela, pripremila mjerenja ublažavanja i/ili izbjegavanja, primijenile lekcije naučene iz prethodnih projekata, pružili vrijednu povratnu informaciju za aktivnosti dobivanja suglasnosti i dozvola, olakšali i doprinijeli procjeni troškova izvođenja projekta. [1] Potrebno je uzeti u obzir

smanjenje rizika tijekom izvršenja projekta, troškove za ostale faze životnog ciklusa, uključujući rad i održavanje, doprinos sigurnosti, brzini izvedbe i održivosti za životni ciklus projekta.

Važno je shvatiti da inženjerski aspekt instalacije podmorskog kabela može značajno ovisiti o njegovoj upotrebi i perspektivi budućeg operatora i sustava održavanja. Različite perspektive vjerojatno će rezultirati različitim odlukama u vezi s inženjerskim aspektom instalacije. Radi postizanja učinkovitih rezultata, preporučuje da se inženjerski proces započne s razumijevanjem perspektiva sponzora projekta i svih početnih i budućih dionika.

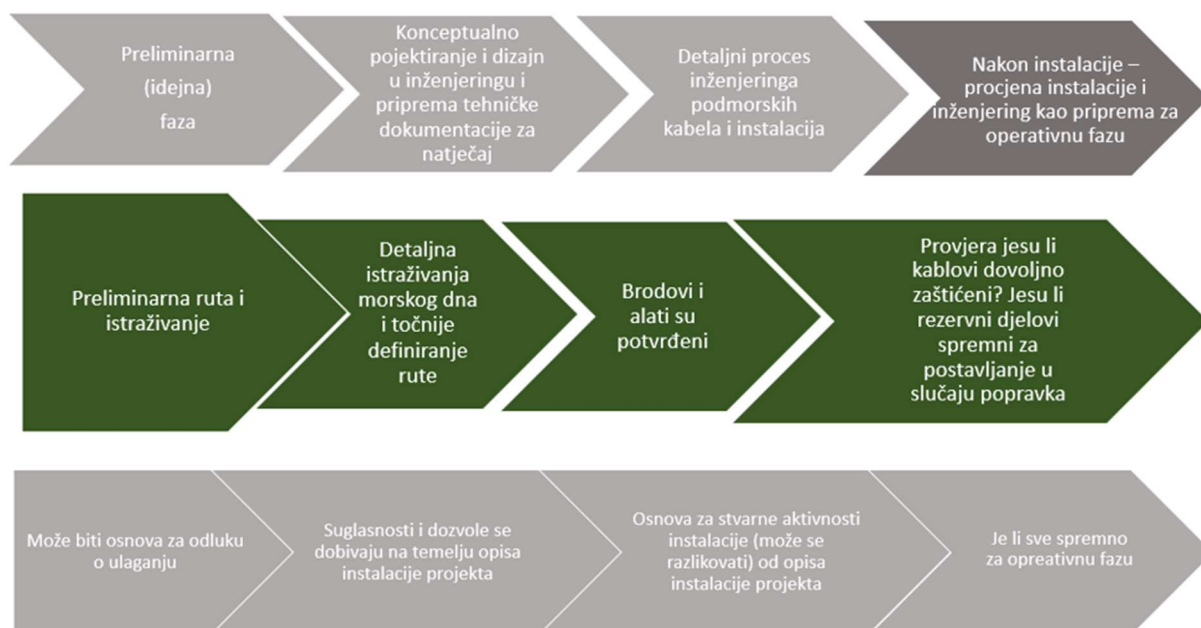
Perspektiva operatora prijenosnog sustava (OPS) ili operatora distribucijskog sustava (ODS) obično je usmjerena na dugoročni pristup minimiziranju rizika u prijenosu i distribuciji energije. Tipično, OPS ili ODS teže vijeku trajanja podmorskog kablenskog sustava od otprilike 50 godina. Operatori prijenosnog i distribucijskog sustava obično uzimaju u obzir vjerojatnost kvara ne samo s gledišta troškova i gubitka prihoda, već i s gledišta sigurnosti opskrbe energijom i s gledišta vanjskih odnosa i reputacije. [1] Također, mogu biti izloženi javnoj kritici zbog svoje monopolne pozicije. Iz ove perspektive važno je pažljivo procijeniti posljedice operacija i održavanja inženjerskih odluka koje se trebaju donijeti za projekt instalacije podmorskog kabela. Ovisno o lokalnim propisima, operator prijenosnog sustava ili operator distribucijskog sustava možda neće biti suočeni samo s gubitkom prihoda, već će čak morati nadoknaditi gubitak proizvodnje energije vjetroelektrana.

Perspektiva komercijalne strane koja razvija priobalni izvor energije ili komercijalni međuspojnički sustav može se razlikovati od perspektive operatora prijenosnog i operatora distribucijskog sustava, budući da se fokus komercijalne strane više usmjerava na financijski povrat ulaganja nego na smanjenje rizika od mogućih energetske nestašice u mreži. [1] Za operatore prijenosnog i operatore distribucijskog sustava posljedice opskrbe energijom na kopnenim mrežama su značajan i glavni problem. Stoga, u nekim okolnostima može biti financijski korisno dopustiti veće rizike u pogledu operacija i održavanja prilikom inženjeringa komercijalno razvijenog podmorskog kablenskog sustava. Ova komercijalna perspektiva može rezultirati prilično različitim inženjerskim odlukama u usporedbi s perspektivom OPS-a i ODS-a.

Pristup životnom ciklusu pruža inženjersku perspektivu koja ima za cilj svjesno razmatranje posljedica inženjerskih odluka na različite faze životnog ciklusa podmorskog kablenskog sustava. [1] Primjer je uzimanje u obzir odlaganja i uklanjanja podmorskog kablenskog sustava prilikom inženjeringa njegove instalacije. Drugi primjer je predstavljen inženjerskim razmatranjima koja uspoređuju troškove i koristi dubljeg ukopavanja kabela. Cilj je smanjiti rizike povezane s

vanjskim, posebno antropogenim prijetnjama (ribarskom opremom, sidrima itd.) s kompleksnošću popravaka koji se javljaju pri dubljoj instalaciji u slučaju unutarnjeg kvara.

Sigurnost dizajnom pruža inženjersku perspektivu koja ima za cilj optimizaciju sigurnosti sustava kroz njegove različite faze razmatranjem inženjerskih mogućnosti i izbora s aspekta sigurnosti od samog početka projekta. [1] To uključuje sigurnost osoba uključenih u projekt, kao i sigurnost kabluskog sustava i okoliša. Na primjer, ako se smatra da montaža sustava za zaštitu kabela (CPS) na kabel tijekom njegove instalacije na moru predstavlja značajne rizike za ručno rukovanje i dizanje, tada se može razviti sofisticiraniji sustav za montažu CPS-a. Cilj je smanjiti potrebno ručno rukovanje za montažu CPS-a i time smanjiti rizik od povezanih incidenata ručnog rukovanja. Esencijalno, inženjerska perspektiva sigurnosti dizajnom doprinosi uspjehu projekta, što je visok prioritet za pregled inženjerskog procesa. Postoji mnogo drugih inženjerskih perspektiva osim onih prethodno spomenutih. Preporučuje se biti svjestan različitih inženjerskih perspektiva na početku projekata instalacije podmorskog kabela, budući da rano osvješćivanje može značajno doprinijeti ispunjenju očekivanja sponzora projekta i svih početnih i budućih dionika.



Slika 5.1: Faze inženjerskog projekta [1]

Cjelokupni proces inženjeringa može se podijeliti u faze projekta u kojima su određene ključne aktivnosti provedene. Slika 5.1 prikazuje prijedlog relevantnih inženjerskih faza i aktivnosti za projekt postavljanja podmorskog kabela. Međutim, to se naravno može riješiti na druge načine, pod uvjetom da su isti aspekti jednako dobro pokriveni. Faze prikazane na slici 5.1 dane su

kronološki od faze pokretanja projekta do faze planiranja/definiranja i izvođenja/provedbe projekta. Kada je aktivnost postavljanja podmorskog kabela dovršena, preporučuje se ponovna procjena inženjeringa u vezi s ključnim aspektima koji su doveli do odabranih instalacijskih koncepata i implementiranja. U ovom modelu važno je priznati da se inženjerstvo koje se ovdje razmatra usredotočuje samo na aktivnosti postavljanja kabela. Inženjering cjelokupnog kabelskog sustava nije zasebno razmatrana aktivnost osim kada su u pitanju mehanički aspekti gdje mehanički dizajn kabela i odabranu instalaciju treba uskladiti, oznake kabela gdje željene zahtjeve treba omogućiti instalacijski koncept i projektiranje sustava za zaštitu kabela gdje moraju postojati ograničenja u pogledu instalacije kako bi dizajn bio izvediv i funkcionalan. Preporuča se usporediti inženjering kabelske instalacije s projektom kabela tijekom faza inženjeringa kako bi se potvrdila prikladnost inženjeringa instalacije u odnosu na dizajn kabela. Proces inženjeringa trebao bi biti izveden na način koji pridonosi procesu usmjeravanja razmatrane instalacije. [1] Ove studije trebale bi suziti broj opcija i rješenja tako da se slijedeći detaljni inženjerski koraci mogu izvršiti samo za ograničeni broj ruta i sustava.

Preliminarna (idejna) faza (Pre-FEED) nakon pokretanja projekta je faza u kojoj se razmatraju cjelokupna tehnička rješenja na temelju široko definirane projektne ideje. Tijekom ove faze poznato je vrlo malo detalja projekta. Međutim, mogućnosti za kabele mogu se razmotriti zajedno s mogućim rutama i konceptima instalacije. Rani jednostavni proračuni mogu se uspostaviti s odgovarajućim poboljšanjima margine za nepoznate nepredviđene slučajeve. Kada postoji nesigurnost u vezi s morskim dnom, mogu se provesti neka rana istraživanja morskog dna, sve ovisno o prirodi i opsegu nesigurnosti. [1]

Na temelju preliminarne faze nakon pokretanja projekta može se odlučiti o nastavljanju s projektom odnosno njegovom implementacijom tj. izvršenjem. Međutim, konačna odluka o ulaganju može biti odgođena do trenutka kada budu stvarni troškovi točnije poznati na temelju sljedećih inženjerskih faza i aktivnosti nadmetanja. Kao dio preliminarne faze za aktivnosti postavljanja podmorskih kabela izrađuje se „Izješće o osnovi projekta“ koje se odnosi na potrebnu pripremu instalacije. [1] Ovaj dokument se razvija kroz projekt kako nove informacije postaju dostupne o zahtjevima izvedbe i prije velikih odluka o dizajnu su napravljeni.

Konceptualno projektiranje i dizajn u inženjeringu i priprema tehničke dokumentacije za natječaj (FEED i Tender Engineering) obuhvaća aktivnosti inženjeringa i projektiranja koje se odvijaju prije faze detaljnog inženjeringa. Osnova za rad je rezultat preliminarne faze. Konceptualno projektiranje i dizajn u inženjeringu i priprema tehničke dokumentacije za natječaj pruža inženjerski okvir za projekt, ali nije ograničen na planiranje i podnošenje dozvola/suglasnosti, kontinuirana financijska razmatranja, prve zahtjeve za izdavanje dozvola i ostalo. [1] Inženjering

kao dio konceptualnog projektiranja i dizajna u inženjeringu i priprema tehničke dokumentacije za natječaj može uključivati radove koje izvodi za vlasnika kabelskog sustava koji bi mogao imati posebne ciljeve, poput pružanja točnih informacija u fazi natječaja ili za smanjenje troškova rada i održavanja tijekom životnog vijek kabelskog sustava. Istraživanja morskog dna i izvođenje detaljnog istraživanja morskog dna obično su poduzeti od strane vlasnika kabela ili razvojnog inženjera u ovoj fazi kako bi se osigurala osnova za dokumentaciju natječaja. U isto vrijeme, mogu se uspostaviti sveobuhvatni opisi instalacije projekta pružanje temelja za podnošenje zahtjeva za dopuštenja i suglasnosti od nadležnih tijela i sudionika. Osnova za opise instalacije projekta također ovisi o ostatku inženjerskih aspekata. Opisi instalacije projekta trebaju minimalno uključivati opis kabela koji će biti instalirani, opis kako se podmorski kabeli namjeravaju postaviti, koncept instalacije uključujući sredstva za zaštitu, raspored projekta, jasno definirana razmatranja o tome što je poznato, a što nije poznato, procjenu trase kabela. Opisi instalacija projekta poslužit će kao osnova za provedbu procjene ekoloških posljedica i ažurirati „Izvješće o osnovi dizajna“.

Ciljevi detaljnog procesa inženjeringa su razviti i finalizirati izvedbu i dizajn kabelske instalacije. Ovaj rad može biti moguć samo ako je poznat dobavljač kabela, poznat je izvođač montaže kao i stvarni instalacijski brodovi i alati te su ishođene sve dozvole odnosno suglasnosti. Produkt detaljnog inženjerskog procesa su svi isporučeni materijali potrebni za izvođenje ugradnje kabela u skladu s tehničkim specifikacijama i zahtjevima, dozvolama i uvjetima uređenja, uvjetima okoline i karakteristikama proizvoda koji se ugrađuje. Sve informacije koje dolaze iz ove faze moraju biti dostupne, integrirane i konsolidirane uz dodatne podatke. Sve te informacije i podatke treba organizirati i obraditi tijekom faze detaljnog inženjeringa, koja uključuje razvoj dolje zadataka. Detaljni inženjerski projekt mora biti sveobuhvatniji od ranijih faza i natječaja.

Slijedi popis zadataka koji bi se mogli razmotriti tijekom detaljnog pregleda faza projektiranja u mnogim projektima podmorskih kabela. Popis zadataka treba izraditi tijekom konceptualnog projektiranja i dizajna, a potrebno ih je ažurirati tijekom trajanja projekta. Neki od zadataka su ažuriranje izvješća o osnovi dizajna u vezi s instalacijom, planiranje kompletnog rada i koordinacija s drugim stranama, dobivanje odobrenja i certifikacija nadležnog tijela za poduzimanje radova na gradilištu, završavanje projektiranja trase uključujući izmjene početne trase ukoliko je potrebno, priprema nacrt križanja za podmorske kabele i usluge trećih strana, izrada metodologije za ugradnju na kopnu do prijelaznih spojnih polja, priprema strategije održavanja kako bi se potvrdila instalaciju kabela – posebno instalaciju dubina uvjeta i položaj kabela tijekom životnog vijeka instalacije i mnogi drugi.

Gdje nema dovoljno podataka ili su proturječni podaci dostupni za projektiranje instalacije, a oni ne mogu biti opravdano pretpostavljeni ili pojašnjeni raspoloživim informacijama, izvedba

dodatnog podmorja treba uzeti u obzir aktivnost istraživanja. [1] Cilj je postići prihvatljivu razinu jasnoće i povjerenje u podatke koji će se koristiti za detaljni dizajn. Dodatna anketna istraga mogla bi biti potrebna ne samo zbog nedovoljno dostupnih podataka nego i zato što bi se modifikacija okoline koja utječe na kabelsku instalaciju mogla dogoditi između faze konceptualnog projektiranja i dizajna i pripreme tehničke dokumentacije i faze detaljnog inženjeringa. To bi moglo biti uzrokovati devijaciju koridora trase zbog planskih i dozvolnih uvjeta, prohodnošću podmorja, novim komunalnim priključcima u blizini trase kabela i sl.

Preporuka je da se instalacijski inženjering ponovno procijeni kada su postavljani podmorski kabela u potpunosti instalirani. Tada su u mogućnosti pružiti ažurirane zapise u izvješćima. Ovo je priprema za fazu rada i održavanja koja slijedi. Tijekom projekta neizbježno je prikupljanje novih informacija i stjecanje iskustva. Ova nova perspektiva može pružiti znanje koje bi bilo korisno imati u ranijoj fazi, jer daje primjer o stvarnoj razini zaštite zbog poboljšanog znanja o morskom dnu, o optimalnoj ugradnji u morsko dno na određenim dionicama trase kabela, novim prijetnjama od trećih strana itd. [1] Novo znanje može utjecati na sve inženjerske discipline.

5.2 Istraživanja i studije u fazi izrade projekta podmorskog kabela

Planiranje elektroenergetskog sustava obično provode elektroprivreda, regionalni operateri prijenosnog sustava i neovisni operateri sustava u suradnji s institutima vlade, specijaliziranim inženjerskim konzultantima i vladinim agencijama. [1] Općenito, planiranje elektroenergetskog sustava obuhvaća studije i prognoze mreže za proizvodnju, prijenos i distribucijske sustave, ovisno o opsegu projekta. Prije početka projekta instalacije podmorskog kabela potrebno je provesti planiranje elektroenergetskog sustava kako bi se razumjeli utjecaji nove instalacije podmorskog kabela na elektroenergetsku mrežu, optimizirala upotreba kapaciteta proizvodnje električne energije, osigurala reaktivna kompenzacija prema potrebi, razvili novi sustavi zaštite od kvarova ili poboljšala pouzdanost i stabilnost postojeće elektroenergetske mreže. Studije tokova snage ili opterećenja ključan su element planiranja sustava. Koriste se analitičke i numeričke metode analize kako bi se proučavao protok električne energije te procjenjivali naponi, struje, stvarna i reaktivna snaga unutar elektroenergetske mreže na temelju zadanih uvjeta generacije i opterećenja. Također, u okviru planiranja sustava obično se provode i druge povezane studije elektroenergetskog sustava, uključujući analizu kratkog spoja, prolaznu stabilnost i studije uvjeta stabilnosti u stacionarnom stanju. Osim studija protoka snage ili opterećenja, može biti potrebna i studija kabelskog sustava kako bi se odredio tip dizajna kabela (izmjenična struja, istosmjerna

struja, jednojezgreni, trojezgreni itd.) i zahtjevi za instalaciju kabela. Ove studije kabelskog sustava imaju izravan utjecaj na izvršenje projekta, uključujući troškove i raspored projekta.

Izvođenje desktop studije ključan je korak prema uspješnom projektu instalacije podmorskog kabela. Obično se provodi kao aktivnost preliminarnе faze nakon faze inicijacije projekta kao dio faze planiranja odnosno definiranja projekta. [1]

Morska istraživanja uspostavljaju osnovu za odabir trase. Tipično se najprije provode geofizička istraživanja za unaprijed određeni koridor, koristeći samo površinski brod bez kontakta s morskim dnom. Geofizički i geotehnički podaci se zatim obrađuju, integriraju (provjeravaju na terenu), analiziraju, izrađuju se karte, i unutar ovog koridora odabire se optimalna preliminarna detaljna ruta za kabel, uzimajući u obzir faktore poput dubine vode i temperature (ako nisu dobiveni na drugi način), termalne otpornosti morskog dna na različitim odgovarajućim lokacijama duž rute, podvodnih prepreka, tvrdih stijenskih materijala, mekanog i tvrdog tla, tresavice i plitkih džepova plina na morskom dnu, stanja tla duž rute do potrebne dubine ukopavanja, uključujući termalna svojstva, izložene i potopljene stijena te neeksplozirana ubojita sredstva, nagiba/strme padine i litice, visoke struje vode, visoke energije valova, pokretne mega nabrekle dine i pjeskovite valove, habanje ledenjaka, potresne nestabilnost sedimentnih nagiba i padova stijena, podvodne vulkanske aktivnosti i izvora tople vode, područja odlaganja, morskih prometnih koridora i lokacije sidrenja, područja s aktivnim ribolovom, arheoloških nalazišta, zaštićenih morskih života i slično. [1] Svi navedeni faktori doprinose postupku detaljnog odabira rute i pomažu u određivanju približne duljine kabela.

Nakon navedenog, obično je potrebno provesti geotehničko istraživanje kako bi se preciznije opisala priroda materijala na morskom dnu u pripremi za moguće operacije ukopavanja kabela i konačno projektiranje kabela (termalna svojstva). Geotehnička istraživanja trebaju se koristiti kako bi se provjerili geofizički podaci i obično se provode na točkama odabranim pomoću geofizičkih podataka.

Kombiniranjem informacija iz geofizičkih i geotehničkih istraživanja, može se odabrati konačna ruta. Za dijelove rute na kojima je potrebna zaštita kabela, mogu se razmotriti sljedeće metode zaštite:

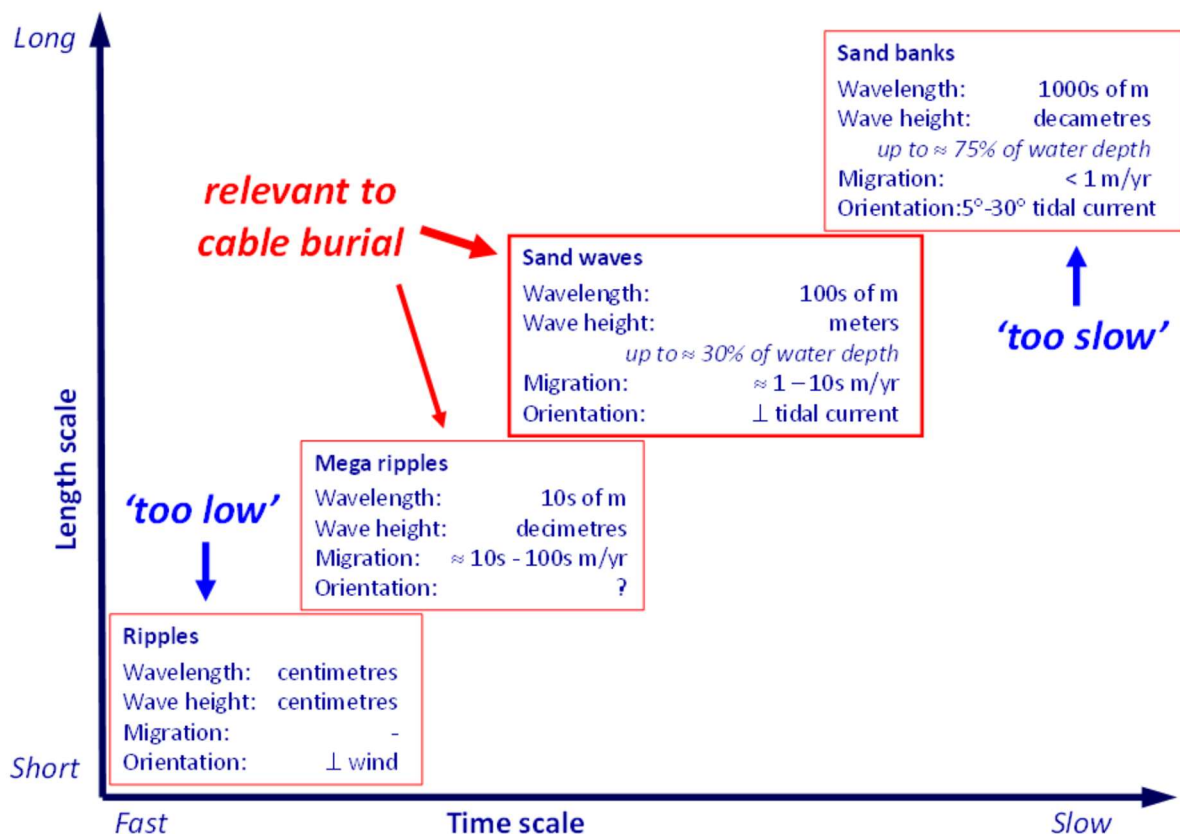
- Izravno ukopavanje (iskopavanje, rezanje, usisavanje ili plugovanje)
- Stavljanje kamenja
- Betonski madraci
- Lijeване željezne ljske

- Cijevi i kanali

Možda nije potrebno pružiti dodatnu zaštitu kabelima kada dubine vode prelaze dosegnute dubine sidara i ribolovne opreme. Ribolovna oprema može doseći dubine vode veće od 1000 metara. Za neke udaljene i primjene srednjeg napona, rezultati studija rizika odnosno korisnosti također mogu pokazati da bi troškovi popravka mogli biti manji od troškova ukopavanja kabela u morsko dno, pa zaštita možda nije troškovno opravdana.

Kao primjer relativnih rizika u odnosu na troškove ukopavanja, dvosmjerni 525 kV AC podmorski kabelski sustavi snage od 2 x 1200 MW između kopna Britanske Kolumbije i otoka Vancouver ukopali su šest kabela od obale do dubine od 20 metara vode. [1] Maksimalna dubina vode u prelasku od 38 km iznosi 400 metara. Od puštanja u rad 1983./1984. godine nije zabilježen nijedan kvar podvodnog kabela ovog podmorskog kabelskog sustava uzrokovan vanjskom agresijom.

Prije skupih geofizičkih i geotehničkih istraživanja koridora, obično se provodi desktop studija fizičkih svojstava morskog dna koja se mogu očekivati duž rute, na temelju informacija već dostupnih u javnoj domeni. Ukoliko se mogu pronaći izvori za procjenu pokretljivosti morskog dna duž rute kabela. Pokretni sedimenti mogu stvarati različite vrste i oblike valovitosti na morskom dnu, što otežava instalaciju podmorskih kabela. Također mogu predstavljati prijetnju za zaštitu kabela smanjenjem dubine pokriva tijekom vremena. Migracija morskih sedimenata također može rezultirati povećanjem pokriva na podmorskom kabelu, što može promijeniti termalna svojstva pokriva na kabelu. Za instalaciju i zaštitu podmorskih kabela korisno je razlikovati pješčane bankine, pješčane valove, mega bradavice i bradavice. [1] Ove pokretne značajke morskog dna imaju vlastite raspone duljine i vremenske skale, kako je prikazano na slici. Na slici 5.2 dana je opća klasifikacija, pri čemu treba napomenuti da mogu postojati značajna odstupanja u vezi s pokretljivošću spomenutih valovitosti morskog dna.



Slika 5.2: Opća klasifikacija vrsta pokretnog morskog dna [1]

U posljednjih nekoliko desetljeća napredak je postignut u matematičkom modeliranju pokretnih pješčanih valova. Ako su lokalni uvjeti valova, struja i tla poznati s dovoljno visokom razlučivošću i ako su dostupna višestruka batimetrijska istraživanja za odjeljak rute s nekoliko godina razmaka između istraživanja, tada se mogu odrediti potrebni parametri za matematičko modeliranje morskog dna. [1] S tim dobivenim parametrima moguće su predikcije pokretljivosti morskog dna.

Tijekom faze rada i održavanja podmorskog kabelskog sustava koji prolazi kroz područja s pokretnim morskim dnom, obično se izvode periodička batimetrijska istraživanja radi procjene zaštite kabela koju pruža njegovo pokrivanje tlom. [1] Sukcesivna batimetrijska istraživanja mogu se unijeti u model pokretljivosti morskog dna, koji bi zatim mogao predvidjeti buduće promjene morskog dna. Predviđene promjene morskog dna mogu se koristiti za raspored operacija održavanja na zaštitnom pokrovu kabela.

Matematički modeli i općenito proračuni za podršku procjeni pokretljivosti morskog dna općenito se primjenjuju u slučaju očekivane erozije morskog dna ili nakupljanja tla. U slučaju pokretnih pješčanih valova, primjena matematičkog modela može se izbjeći osim ako erozija ili nakupljanje tla također ne čine dio opće pokretljivosti morskog dna.

5.3 Određivanje trase podmorskog kabela

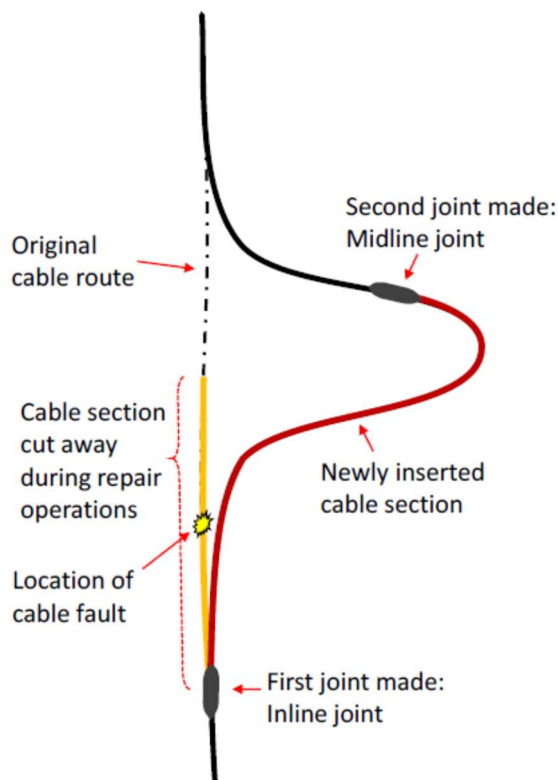
U ranoj fazi moguće je više opcija rute kabela, iako neke od njih često budu isključivo teoretske. Studije u fazi prije započinjanja projekta trebale bi suziti broj opcija ruta fokusirajući projekt na izglednije i vjerojatnije opcije. U fazi inicijalnog koncepta projekta trebao bi se steći uvid u prednosti i mane opcija rute kablinskih instalacija kao i gledišta održavanja kablinskog voda. Argumente za i argumente protiv svake postojeće opcije potrebno je pažljivo istražiti i zabilježiti u odgovarajućim tablicama jer i trenutno isključene mogućnosti mogu postati privlačnije tijekom faze detaljnog inženjeringa zbog potencijalnih novih otkrića problema te tada se mogu ponovno razmotriti. Kako bi se omogućilo razmatranje drugih opcija u daljnjim fazama projekta, projektni tim bi trebao imati pristup tablici opcija za buduće korištenje. U preliminarnoj fazi moguće je izbjeći potrebu za novim ili dodatnim pregledom rute kao i postaviti jasne zahtjeve za dodatna istraživanja. Ako se odabere opcija dodatnog istraživanja rute, potrebno je jasno dati preliminarne zahtjeve u pogledu napora istraživanja i njegovih ciljeva. Kako bi se usporedile rute, najbolje ih je iscrtati na navigacijskim kartama jer se većina potencijalne interakcije ili smetnje može identificirati. Prilikom iscrtavanja, važna preporuka je da se ne započinje ravnim linijama kako bi se grubo označilo usmjeravanje kabela, već da se odmah započne dobro promišljenim usmjeravanjem u odnosu na sve elemente koji su vidljivi na navigacijskoj karti poput sustava za razdvajanje prometa, sidrišta i druga podmorska imovina. [1] Također, svaka iscrtana linija stvara očekivanja i izaziva reakcije pa je stoga najbolje da se odmah započne s pažljivo osmišljenim početnim rutama uz pomoć pomorskih karti kao izvora informacija o okolici rute. U sljedećim koracima je moguće dodavanje više informacija korištenjem geografskog informacijskog sustava (GIS). Preporučljivo je odmah iscrtati onoliko pojedinačnih trasa koliko je potrebno za postaviti sustav umjesto samo središnje linije za pojedinačne kabele koji čine sustav pa tako dva kablinska sustava koja se instaliraju ne bi trebala biti iscrtana kao jedna središnja linija već kao dvije linije jer razdvajanje sustava izravno utječe na korišteni prostor. Nadalje, preporučljivo je iscrtavanje koridora za kabel od samog početka, a ne samo linija ili vodova kablinskih sustava. Iako je zona održavanja od 500 metara sa svake strane poželjna, često nije moguća kad se mnogo sredstava nalazi u istom području. [1] Odabir kablinskog koridora ne podrazumijeva samo postavljanje kabela u moru, nego i dugoročni rad, održavanje i planiranje istraživanja, interventne radove i razmatranja pravaca na mjestima gdje su potrebni. Vlasniku imovine također se savjetuje da razmotri popravak i održavanje susjednih kabela i rizik povezan uz lokaciju kvara, oporavak i popravak. U nekim slučajevima može biti prihvatljivo rasporediti popravak preko susjednih kabela, ali morat će biti komercijalni i tehnički rizici povezani s takvom strategijom u potpunosti

usuglašeni. Konačna duljina utora odnosno odmaka od izvorne kabela je funkcija dubine vode, fizičkih karakteristika kabela i samog spoja, ograničenja rasporeda broda za popravak i prevladavajući vremenski uvjeti u vrijeme operacije polaganja. Prostor potreban za postavljanje završne spojnice vidljiv je na slici 5.3 i sastoji se od prostora za sam otvor za spajanje i dodatnog prostora uz njega, kako bi se osiguralo da popravak neće ometati susjedna podmorska sredstva ili područja. Minimalni prostor potreban na morskom dnu za postavljanje omega zgloba mora biti veličine najmanje kao:

- lokalna dubina vode plus
- nadvodni bok broda za popravke plus
- duljina kabela koji se drži na palubi tijekom popravka plus
- duljina "krune", koja je zavoj kabela na vrhu omega spoja koji će se obično rasporediti na morskom dnu pomoću kvadranta

Obzirom na prostor potreban na morskom dnu za polaganje omega zgloba, pored navedenoga treba uzeti u obzir minimalnu udaljenost do susjednih podmorskih sredstava, kao što su drugi kabeli. Praktične radne tolerancije također je potrebno uzeti u obzir, gdje će uže dopuštene tolerancije biti povećane vrijeme potrebno za polaganje omega zgloba.

Iako je uobičajeno križati plovne putove što je moguće okomitije, to se ne smije smatrati apsolutnim zahtjevom. [1] Ako su križanja pod kutom manjim od približno 70° , a ne 90° , tada su potrebna daljnja detaljna razmatranja. Treba imati na umu da je vjerojatnost oštećenja kabela uzrokovanog transportom je velika u korelaciji s količinom brodova koji prolaze preko kabela rute.

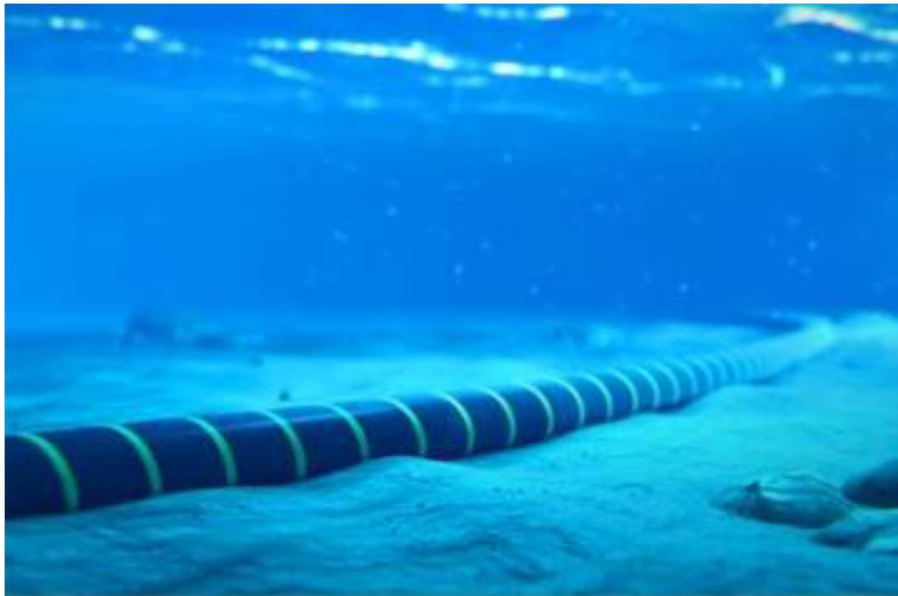


Slika 5.3: Završni spoj kabela u obliku omega [1]

Kut križanja kabela s brodskim putem ne utječe na broj brodova koji prolaze preko trase kabela. Stoga, kut križanja manji od okomice ne rezultira značajno većom vjerojatnošću oštećenja kabela transportom pod uvjetom da kut križanja nije plitak do te mjere da je značajna količina kabela instalirana u plovnom putu. [1] Međutim, manji kut križanja rezultira duljim vremenom postavljanja kabela u plovnom putu. Utjecaj dulje instalacije u plovnom putu treba procijeniti u odnosu na dodatne životne troškove i utjecaj na okomito križanje. Iz tog razloga se preporučuje savjetovanje s nautičkim vlastima u ranoj fazi.

5.4. Tehnička rješenja za zaštitu podmorskih kabela

U područjima bez pomorskih aktivnosti i bez rizika od mogućnosti oštećenja kabela koji se očekuje kao rezultat vanjskih prijetnji uz dopuštenje pomoću važećih dozvola, može se postaviti podmorski kabel na morsko dno i ostaviti tamo nezaštićen. Uvjet je da kabel ima dovoljno stabilnosti na dnu da izdrži hidrodinamička opterećenja valovima i strujama koja djeluju na njega.



Slika 5.4: Nezaštićeni kabel položen na morskom dnu [1]

Međutim, u područjima s rizikom od oštećenja kabela zbog vanjskih prijetnji kao što su brodski putovi, zone između plima, područja s koćarskim ribolovom i svako područje s čestim pomorskim aktivnostima koje moglo dovesti do poremećaja morskog dna, mjere zaštite moraju se uzeti u obzir kao dio instalacija podmorskog kabela, kako bi se smanjio rizik od vanjskih oštećenja tijekom životnog vijeka i smanjio troškovi rada i održavanja kablenskog sustava. [1]

Bez obzira što podmorski kabel sadrži armaturne žice, dobra zaštita kabela od velikog sidra se ne može provesti na taj način jer na kabel djeluju prevelike sile. Dizajn kabela kao i njegova armatura nisu izvedeni na način da izdrže vanjske prijetnje koje za njih predstavljaju vučeni ribolovni alati, sidra i ostalo stoga je na takvim mjestima potrebno dodatno zaštititi kabel drugim metodama.

Zahtjevi za zaštitu podmorskih kablenskih sustava postaju sve veći, dok s druge strane zaštita kabela nije uvijek izvediva kao na primjer kada su u pitanju srednjenaponski kabeli na kratkim dionicama gdje bi troškovi ukopa mogli biti i dvostruko veći od troškova kabela, a popravci se mogu obaviti brzo i ekonomično uz minimalan utjecaj na kupce ukoliko su tijekom popravaka dostupni alternativni izvori opskrbe. Isto tako, ukopavanje neće biti potrebno za dubine vode veće od dubina dosega sidra ili gdje su opasnosti od minimalnog pribora minimalne. Upravo iz ovakvih razloga potrebno je zaštitu temeljiti na rizicima koji prijete kabele. Ako se donese odluka o ukopavanju kabela određuje se optimalna dubina za ukop kabela kako bi se osigurala dovoljna mehanička zaštita od prepoznatih rizika. “Dubina ukopa” može se shvatiti kao debljina pokrova tla na vrhu kabela ili kao udaljenost između vrha kabela i razine srednjeg

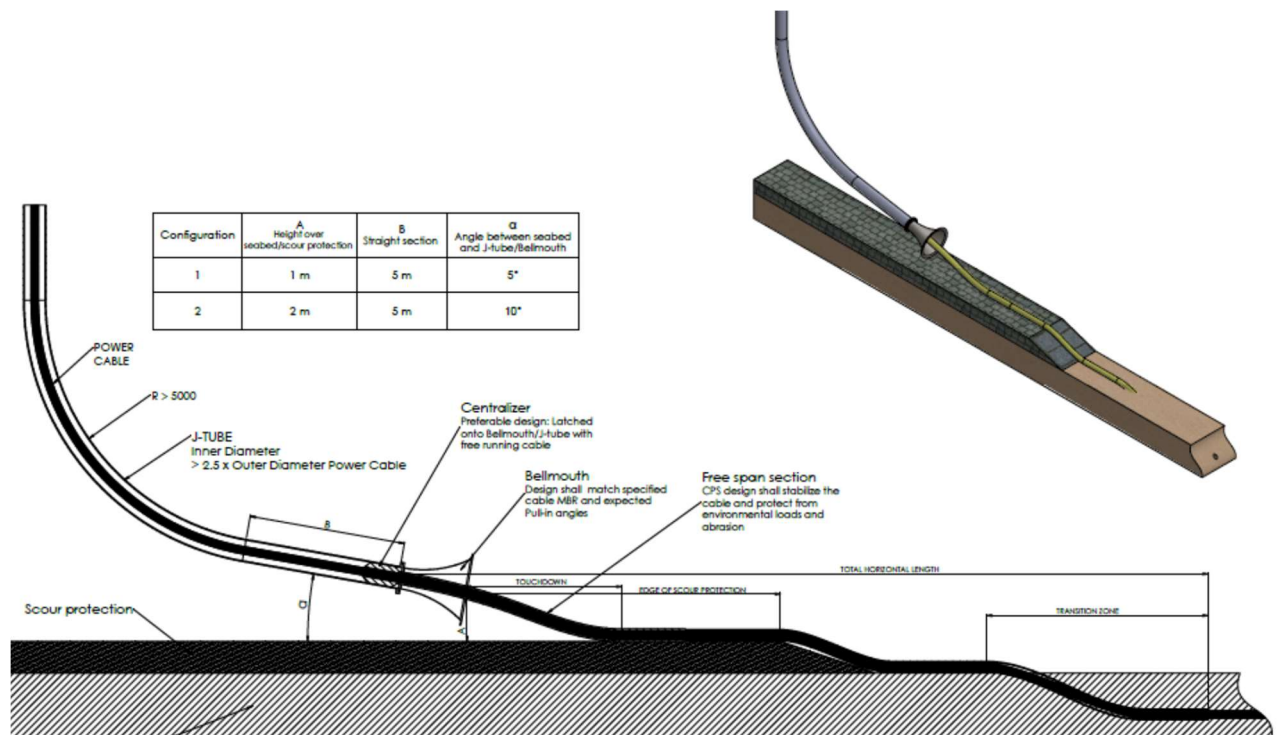
neporemećenog morskog dna iznad kabela. [1] Zahtjevi zaštite mogu se definirati u različitim koracima procesa inženjeringa i projektiranja, ali općenito je ovaj aspekt osmišljen na preliminarnoj razini tijekom ranih faza dizajna. Morsko dno može biti drugačije od očekivanog i ponekad lokalno može biti teško ili čak nemoguće postići planirani pokrov i dubinu ukopa. Ukoliko su u pitanju ekološki zaštićena područja, na primjer ako trasa kabela prolazi kroz koraljni greben zaštita kabela može biti nedopuštena ili značajno ograničena. Pokrivenost kabela zemljom je relevantan za projektiranje kabela jer pokrov na kabelu utječe na mogućnost kabela da prenese toplinu na svoje okruženje.

Pokazalo se da čak i smatrani blagi utjecaj drugih dasaka, koje se koriste kao dio ribolovnog pribora za vuču, može rezultirati kvarom podvodnog kabela za napajanje nakon nekog vremena. [1] Podmorski kabel vjerojatno neće preživjeti udar povučenog sidra na kabel te je stoga mudro razmotriti svaki utjecaj stranog tijela na kabel koji predstavlja prijetnju cjelovitosti podmorskog energetskog kabela. Prijetnje koje priroda predstavlja kabelu odnose se na promjene u zaštiti kabela kao i nestabilnostima morskog dna kao na primjer, pokretljivost morskog dna može smanjiti zaštitu kabela kada zaštitni sloj tla erodira.

Za zaštitu kabela duž njegove okomite putanje od morskog dna do nadvodne strukture, kabel se može provesti kroz takozvane J-cijev, kroz I-cijev ili kroz unutrašnjost temelja. [1] U provođenju kabela kroz unutrašnjost temelja otvor u temelju može imati zvono, a može biti samo otvor u temelju. J-cijevi kao i I-cijevi su metalne cijevi koje vode i štite kabel na njegovom uzlaznom dijelu trase, a također se može koristiti za zaštitu kabela duž drugih dijelova trase. J – cijev ima vodoravni dio koji se savija u „koljenu na okomiti“ dok I – cijev završava okomito pa se cijelo savijanje od vodoravnog do okomitog položaja kabel mora izvršiti u svom slobodnom rasponu. J – cijevi su uobičajene za podmorske kabele jer je ranjivost kabela u tom slučaju manja, odnosno smanjen je utjecaj opterećenja okoline i drugih vanjskih opterećenja. Dio kabela u slobodnom rasponu između morskog dna i otvora J – cijevi izložen je dinamičkim vanjskim silama valova i strujom induciranog gibanja vode. Kako bi se smanjile sile koje djeluju na kabel preporučuje se minimalan slobodni raspon.

Dio kabela između J- ili I-cijevi i ukopanog kabela na sigurnoj udaljenosti od J- ili I-cijevi zahtijeva posvećen inženjerski pristup u pogledu slobodnog raspona i u pogledu stabilnosti kabela na morskom dnu. Sustavi za zaštitu kabela koriste se za mehaničku zaštitu kabela, izbjegavanje prekomjernog savijanja kabela i izbjegavanje dinamičkog opterećenja na kabelu. Također, moguće je spriječiti habanje kabela zbog pomicanja taloga ili čak abrazije uslijed pomicanja kabela barem djelomično. Važno uzeti u obzir toplinski aspekt kabela zbog zaštite kabela, budući da obično povećava vanjski toplinski otpor. [1] Slobodni raspon kabela treba

procijeniti na temelju različitih scenarija instalacija i opterećenja tijekom životnog vijeka kabela. Duljina slobodnog raspona je vrlo značajan parametar koji se odnosi na sile koje djeluju na kabel i njegovu zaštitu. Vibracije koje uzrokuje vrtlog potrebno je uzeti u razmatranje kao i potencijalne promjene u duljini slobodnog raspona zbog promjena i morskom dnu. Razlikujemo dva principa zaštite kabela; stegnuti sustav i sustav zaključane slabe karike. [1] Stegnuti sustav označava kabel stegnut u fiksnom položaju, a on je rješenje kada je potrebna zatvorena J – cijev. Sustav zaključane slabe čini spoj prekidnim vijcima na glavu za uvlačenje koji se nalaze na prednjem kraju kabela. Nakon što je glava kabela uvučena u J – cijev ili I – cijev ona se pričvršćuje za unutarnji dio kraja cijevi. Ukoliko dođe do mehaničkog preopterećenja, svaki sustav za zaštitu kabela može otkazati uslijed instalacije sa slobodnim rasponom većeg iznosa nego što je projektiran ili ukoliko je instaliran za primjenu sile koja je izvan kriterija sustava za zaštitu kabela.



Slika 5.5: J – cijev i raspored kabela [1]

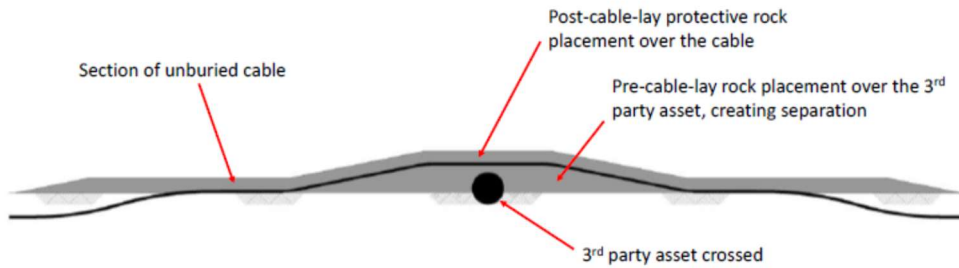
Duž svoje rute, kabel za napajanje može prijeći preko drugih linearnih podvodnih sredstava kao što su telekomunikacijski kabeli, cjevovodi i drugih energetske kabele. Ako je podmorsko sredstvo preko kojeg treba prijeći u funkciji ili ako je drugo sredstvo nemoguće ukloniti prije instalacije kabela, kabel za napajanje koji se postavlja vjerojatno neće biti ukopan na mjestu prijelaza. U tom slučaju zaštita kabela na mjestu križanja, osim ukopavanjem u zemlju, mora biti projektirana. Ovo je slučaj, gdje je drugi kabel zakopan na manjoj dubini od potrebne dubine zakopavanja kabela za napajanje koji se postavlja uz dodatno potrebno minimalno okomito razdvajanje. Ako drugi

element nije u funkciji, zakopavanje se izvodi na manjoj dubini od dubine ukopavanja kabela za napajanje iako se uklanjanje drugog elementa može se smatrati prihvatljivim rješenjem.

Tamo gdje treba prijeći cjevovod koji nije u funkciji, mnogo će se rjeđe odabrati njegovo uklanjanje prije postavljanja kabela za napajanje obzirom na složenost uklanjanja dijelova podmorskog cjevovoda. Također, može se odrediti okomito razdvajanje između kabela za napajanje i drugog sredstva koje treba prijeći prema minimalnim zahtjevima koji se primjenjuju na tom području ili prema vlasniku jedne od dvije imovine. Razmatranja u pogledu međusobnog utjecaja, na primjer toplinskog utjecaja, mogu predstavljati odlučujući čimbenik za odvajanje koji treba uzeti u obzir. To može biti, na primjer, slučaj kada energetska kabel prelazi preko vrućeg podmorskog naftovoda ili plinovoda. U tom slučaju kut križanja mora biti također uzet u obzir jer bi to utjecalo na toplinsku interakciju između sredstava. Mehanička zaštita i kabela za napajanje kao i imovine može biti još jedno razmatranje obzirom na dizajn okomitog razmaka. Na primjer, u Sjevernom moru udaljenost okomitog razdvajanja između energetskih kabela i druge imovine prelazi na najmanje 0,3 metra je uobičajeno ako je odvajanje potrebno samo zbog mehaničkih razloga, a ne zbog toplinskih razloga. [1] Na mjestu prijelaza, gdje se kabel ne može zaštititi ukopavanjem u morsko dno, kabelu se moraju osigurati sredstva vanjske zaštite. Uobičajeno je zaštititi kabel za napajanje na mjestu prijelaza kamenim nasipom. Međutim, mogu postojati i drugi načini zaštite kao što je na primjer sustav zaštite kabela (CPS) ili betonski elementi ili madraci.

Gdje je primjenjivo, treba uzeti u obzir mobilnost morskog dna tijekom životnog vijeka sredstava za prijelaz obzirom na projekt razdvajanja kao i vanjske zaštite konstrukcije prijelaza. Mjesto s nižim stupnjem pokretljivosti morskog dna je poželjno u odnosu na mjesto s višim stupnjem pokretljivost morskog dna.

Održivo odvajanje može se, na primjer, stvoriti betonskim blokom ili sustavom separatora oko kabela. Preko njega se može postaviti kamena greda za zaštitu kabela protiv vanjskih prijetnji. Na tržištu je dostupno nekoliko metoda za stvaranje potrebnog odvajanja između kabela za napajanje i podvodnog sredstva treće strane koje treba prijeći. Rješenja koja su uobičajena su kameno postavljanje, madraci od betonskih blokova, sustav odvajanja ili rukavac oko kabela.

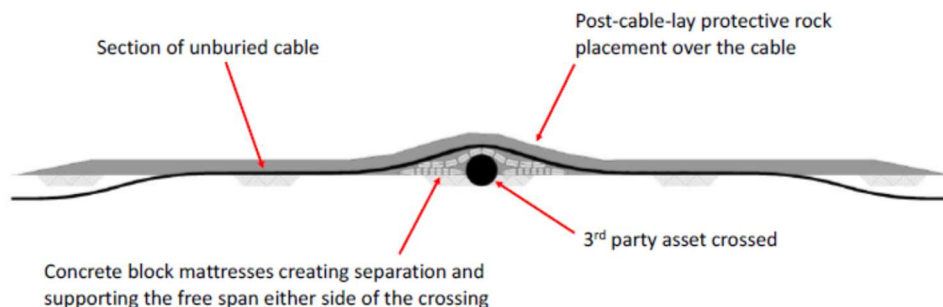


Slika 5.6: Primjer polaganja kabela iznad elementa treće strane [1]

Na slici 5.6 možemo vidjeti primjer polaganja kabela iznad elementa treće strane gdje je kabel na mjestu križanja ukopan na manjoj dubini.

Na križanju s kablom također se može primijeniti kamena berma prije polaganja kabela za odvajanje. U tom slučaju, berma prije polaganja kabela može biti niže visine u usporedbi sa situacijom u kojoj se izložen cjevovod treba prijeći. [1]

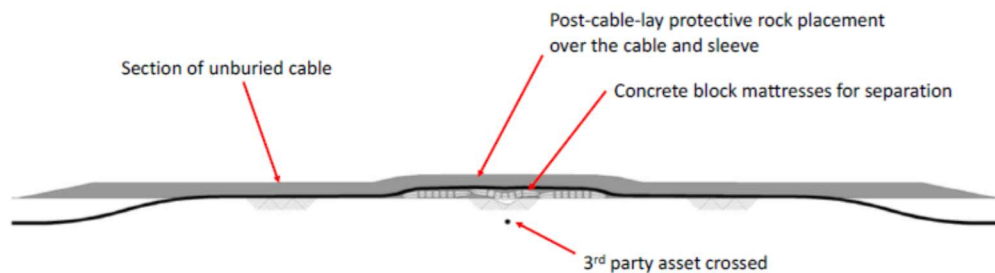
Ako se za odvajanje koristi stijena, tada je stabilnost stijenske berme prije polaganja kabela u razdoblju između postavljanja tog sloja stijene i polaganje kabela preko te berme prije polaganja do postavljanja treba razmotriti postavljanje vanjske zaštitne stijene nakon polaganja kabela.



Slika 5.7: Postavljanje kabela s odvajanjem stijenom od elementa treće strane [1]

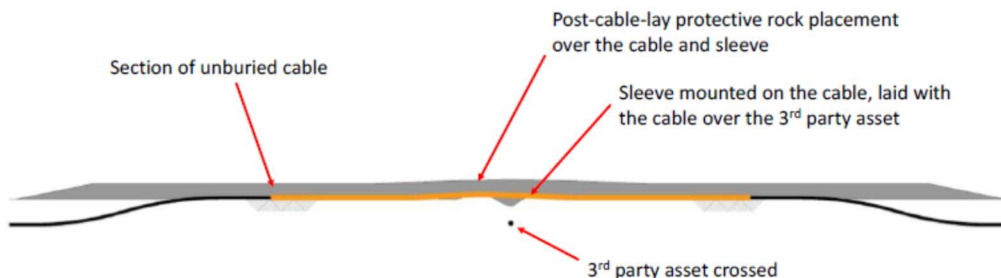
Na slici 5.7 može se vidjeti postavljanje kabela gdje je kabel ukopan na manjoj dubini odvojen stijenom od elementa treće strane.

Ako se madraci od betonskih blokova koriste za stvaranje razdvajanja između imovine treće strane i kabela za napajanje, tada se stabilnost madraca pod valovima i strujama procjenjuje za razdoblje između postavljanja madraca i postavljanja vanjskog dijela zaštitnog sloj stijene. [1] U uvjetima jače oluje može doći do ogrebotina oko madraca i madraci mogu postati osjetljivi na pomicanje. Na slici 5.8. je prikazano polaganje kabela uz pomoć madraca.



Slika 5.8: Polaganje kabela uz pomoć madraca [1]

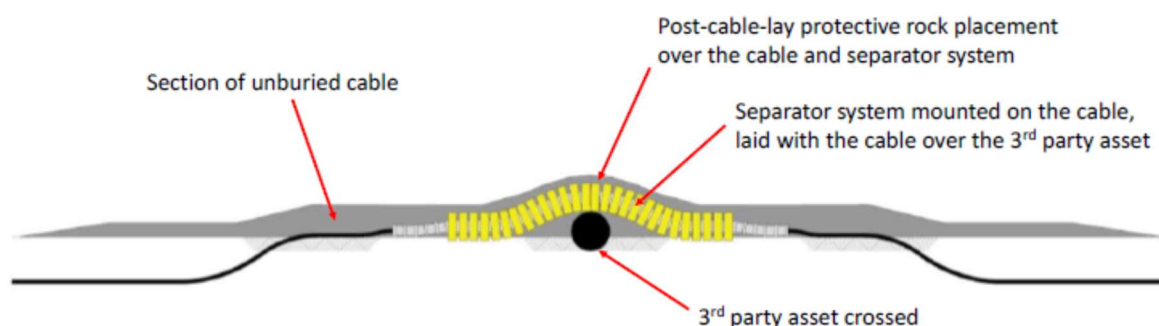
Ako se omotač oko kabela koristi za stvaranje razdvajanja između imovine treće strane koja se križa i kabela za napajanje, tada se posebno treba ocijeniti toplinska svojstva rukavca obzirom na dizajn odabranog kabela što je prikazano na slici.



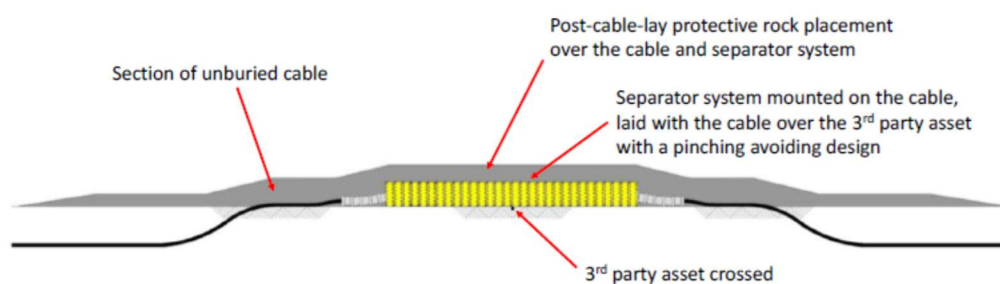
Slika 5.9.: Obuhvat prijelazne konstrukcije oko kabela – zaštitni kameni sloj preko kabela [1]

Ako se koristi sustav odvajanja postavljen na kabel, tada se težina tog sustava procjenjuje posebno u vezi s instalacijom. Kod vremena potrebnog za montažu treba uzeti u obzir sustav razdvajanja oko kabela tijekom operacija polaganja kabela, a to olakšava pažljiva priprema. Ako se za križanje drugog kabela koristi separatorski sustav, onda je za stezanje potrebno uzeti u obzir ukršteni kabel od strane sustava razdvajanja tijekom životnog vijeka energetskeg kabela što bi moglo postati problem nakon spuštanja morskog dna iako su na tržištu dostupni dizajni separatorskih sustava koji izbjegavaju štipanje. [1] Na tržištu su također dostupni sustavi mostova za stvaranje razdvajanja između imovine treće strane s kojom je prekriven strujni kabel. Ako se razmatra takav sustav mosta, onda se preporučuje uzeti potencijalne razlike u visini morskog dna uzimajući u obzir obje strane imovine koju treba prijeći. Preporučljivo je da bude slobodni potencijalni raspon u kabelu za napajanje s obje strane mjesta križanja. Obzirom na kut križanja između kabela za napajanje i sredstva koje treba prijeći, potrebno je uzeti u obzir da se duljina vanjske zaštite križnog kabela za napajanje povećava kada se kut križanja smanjuje odnosno kad je kut križanja manji od 90 stupnjeva. S druge strane praveći okomicu križanje može rezultirati dodatnim krivuljama u trasi kabela, dužim kabelom i većom upotrebom područja morskog dna za kabelski koridor. Okomito

križanje ne mora se smatrati nužnim, ali je potrebno svjesno razmotriti mogućnost križanja kutova za svaki prijelaz. Na sljedećoj slici 5.10 prikazano je odvajanje kabela korištenjem mostova.



Slika 5.10: Sustav separatora prijelazne konstrukcije oko kabela – zaštitni kameni sloj preko cijevi [1]



Slika 5.11: Sustav separatora prijelazne konstrukcije oko kabela – zaštitni kameni sloj preko kabela [1]

5.5. Tehnička rješenja elemenata podmorskog i kopnenog dijela trase podmorskog kabela

Polaganje podmorskih kabela obično se provodi u skladu s izračunima i pripadajućim metodama, a temeljne pretpostavke su:

- Zanemarivanje krutosti savijanja kabela, težina kabela je uniformna, a kabel nije elastičan
- Napetost polaganja kabela i kutovi se mogu točno mjeriti na brodu za polaganje
- Brzina broda za polaganje je sporija od brzine potapanja kabla
- Donja napetost je dovoljno visoka da spriječi petljanje i stvaranje uvijanja blizu točke dodirivanja dna.

- Donja napetost je dovoljno niska da spriječi povlačenje kabla prema sredini zakrivljenosti tijekom promjene smjera i usporavanje CLV (ovisno i o trenju dna).
- Radijus savijanja kabla na točki dodira je daleko iznad minimalnih granica savijanja kabla.
- Donja napetost je dovoljno niska da spriječi stvaranje dugih slobodnih raspona na neujednačenom morskom dnu.
- Donja napetost kompenzira vertikalno pomaknuće skretnice ili sipe broda za polaganje [1]

Tijekom spajanja, ako nije moguće uvlačiti kabel, posljedica je da će isti dio kabla prolaziti kroz ponovljeno savijanje, što može rezultirati, primjerice, lokaliziranim oštećenjima u olovnom plaštu zbog dinamike valova. [1] Analiza oštećenja treba biti provedena kako bi se utvrdilo najduže vrijeme pripravnosti za određenu kombinaciju vremenskih uvjeta, bez uvlačenja kabla. Bez obzira na to, dobra praksa polaganja podmorskih kabla je periodično uvlačiti ili izvlačiti kabel kako lokalizirani umor ne bi nastao.

Kod operacija uvlačenja kabla mogu se razlikovati sljedeće faze:

1. Priprema za operacije uvlačenja kabla, uključujući sve potrebne pripreme i, za drugo uvlačenje kraja, rezanje kabla na potrebnu duljinu
2. Uvlačenje kabla
3. Privremeno usmjeravanje kabla tijekom uvlačenja
4. Skidanje kabla nakon uvlačenja
5. Spajanje ili spoj kraja kabla
6. Testiranje kabla [1]

Za sve ove faze, zahtjevi za vrijeme, prostor i pristup trebaju biti projektirani. Ti zahtjevi trebaju biti usklađeni s cjelokupnim programom drugih aktivnosti, kao što su izgradnja priobalne postaje ili morskog postrojenja. Sigurni radni uvjeti trebaju biti osigurani pažljivim i detaljnim inženjeringom operacija uvlačenja kabla. Posebno treba uzeti u obzir istovremene operacije, na primjer, druge operacije koje se provode na morskom postrojenju ili platformi dok se kabel uvlači. Planiranje s obaveznom analizom svih sučelja treba biti provedeno kako bi se izbjegle višestruke mobilizacije i prijenosi osoblja i materijala.

5.6. Utjecaji konstrukcije podmorskog kabela i kablenskog pribora na projektna rješenja

Metode instalacije ovise djelomično o parametrima kabela i priboru, kao i o vrstama tla u kojem će se kabel ukopati. Mehaničke karakteristike kabela određuju ograničenja načina instalacije kabela. Kao osnovne uvjete, treba uzeti u obzir sljedeće mehaničke parametre kabela:

- Vrsta kabela (jednožilni, trožilni ili drugi)
- Dizajn oklopa (jedan oklop, dvostruki oklop ili drugi)
- Uravnoteženi ili neuravnoteženi oklop
- Masa u zraku
- Masa u vodi
- Promjer kabela
- Granice pritisaka stiskanja
- Granice pritiska na bočnim stijenkama
- Granice pritiska stezanja
- Maksimalna vučna sila s i bez tvorničkih spojeva (ako je primjenjivo)
- Minimalni radijus savijanja (s i bez napetosti)
- Minimalni radijus savijanja za jezgre kabla bez oklopa
- Savojna čvrstoća - krivulja histerezisa (ljepilo i klizanje)
- Aksijalna čvrstoća (napetost i kompresija)
- Torsionalna čvrstoća
- Okolne temperature zraka i vode koje se smatraju sigurnima za rukovanje i instalaciju kabela
- Minimalni promjer omatanja (ako je namotljiv)
- Raspodjela vučne sile između provodnika i oklopa
- Maksimalni broj operacija omatanja
- Maksimalna dozvoljena energija udara (za postavljanje u stijene)

- Parametri za omatanje ili polu-omatanje - ako je primjenjivo
- Smjer omatanja (u smjeru kazaljke na satu ili suprotno)
- Maksimalno dopušteno pritisak
- Broj ciklusa premještanja kabla koje kabel može izdržati
- Raspon temperatura pri kojima je rukovanje / instalacija kabla moguće [1]

Podmorski elektroenergetski kabeli obično pokazuju histerezijski odnos momenta savijanja i zakrivljenosti zbog efekata "klizanja" između različitih slojeva kabla. [1] Osim toga, bitumen na oklopnim žicama i drugim komponentama kabla, te opća svojstva različitih materijala čine ovisnost o temperaturi.

Za podmorske kabele, čvrstoća će varirati ovisno o zakrivljenosti kabla. Relativno klizanje se smanjuje trenjem, potencijalno u kombinaciji s adhezijom u sloju bitumena na oklopnim žicama ako je primjenjivo. Savojna čvrstoća klizanja obično je dominirana olovnom ovojnicom (ako je prisutna) i slojevima oklopa.

Povećanje zakrivljenosti uzrokuje postupno smanjenje čvrstoće, praćeno regijom s nižom tangencijalnom čvrstoćom. [1] Tamo helikalni elementi kabla počinju prevladavati trenje i klize s povećanjem zakrivljenosti. Obično je čvrstoća klizanja nekoliko redova veličine niža od čvrstoće pri prijanjanju. Potrebno je poznavati parametre pribora kabla kako bi se procijenilo kako će utjecati na instalaciju podmorskog kabla; dimenzije, težine i metode instalacije podmorskih kabla i popravnih spojeva, dimenzije i težinu prijelaznih spojeva, karakteristike prilikom savijanja, module plovnosti, metode terminacije, dužine vuče, sustave za zaštitu podmorskih kabla, sustave za odvajanje podmorskih kabla, parametre dizajna kablenskog sustava.

5.7 Odabir tehnologije i mehanizacije za polaganje podmorskog kabla

Operacije ukopavanja obično se izvode i planiraju uz pomoć posebnih alata koji su dizajnirani za takve radove i za specifične podzemne uvjete. Alat za ukopavanje treba biti odabran na temelju različitih čimbenika kako bi se kabel ukopao u podzemlje na ciljanu dubinu ukopa. Takvi utjecajni čimbenici mogu biti sljedeći:

- Uvjeti tla
- Vrsta tla

- Otpor tla odnosno smična čvrstoća
- Uvjeti na površini (npr. nagib, pješčani valovi / mega bradavice, polja s kamenjem)
- Stupanj zbijenosti
- Okolišni uvjeti
- Okolišna ograničenja / staništa i zaštitne zone
- Utjecaj na okoliš uporabe alata, npr. buka i širenje sedimenta
- Dozvole i zahtjevi tijela vlasti / obveze
- Vodene struje
- Dubina vode
- Očekivani vremenski uvjeti i stanje mora
- Pristupačnost radnog mjesta (broda i tla)
- Specifičnosti projekta
- Putanja kabela
- Zahtjevi za ukopavanje
- Vrsta odobrene / planirane instalacije (priprema prije polaganja, istovremeno polaganje i ukopavanje ili ukopavanje nakon polaganja)
- Ograničenja proizvoda / veličine [1]

Svaki tip alata za ukopavanje ima različite prednosti i nedostatke koji trebaju biti uzeti u obzir u odnosu na specifične uvjete na terenu, zahtjeve za ukopavanje, opću konstrukciju tj. metodologiju ukopavanja samih alata ili dodatne posebno dizajnirane značajke određenog alata. Za ukopavanje podmorskih kabela dostupan je širok raspon alata za ukopavanje kao na primjer bager za pred iskopavanje koji se koristi na brodu, slobodno lebdeći mlazni rovokopači ROV (daljinski upravljana vozila), rovokopači na gusjenicama s različitim primjenama (mlazno ukopavanje, reznik na lancu, reznik na kotaču), rovokopači uz pomoć ronioca, plugovi za kabele, vertikalni ubrizgavači (mlazno ukopavanje, reznik na lancu), vibracijski mač, iskopavanje masovnim tokom, mlazna lanseta uz pomoć ronioca, polupotporni bageri. [1]

6. Pregled, snimanje i istraživanje morskog dna i trase podmorskog kabela

6.1 Snimanje i istraživanje morskog dna

Podaci iz anketa trebaju se dobiti za ukupnu duljinu planirane trase ili trasa obuhvaćajući koridor dovoljne širine kako bi pružili adekvatne informacije za dizajn trase kabela te za instalacijske i operativne aktivnosti poput mikro-rute kako bi se izbjegle prepreke ili inženjering trase kako bi se izbjegla područja s posebnim prirodnim vrijednostima ili s tlima nepovoljnim za operacije ukopavanja kabela. Često je važno da pokrivenost ankete bude dovoljno široka kako bi se mogli razmotriti alternativni scenariji za trasu kabela. U nekim se slučajevima vrše ankete na više koridora kako bi se mogli usporediti, a zatim odabrati najprikladniji koridor za instalaciju kabla. Širina koridora ankete određena je obuhvatom projekta, tehničkim zahtjevima i lokalnim uvjetima na terenu.

Preliminarna anketa za definiranje trase i odabir detaljnog koridora trebala bi imati širinu veću nego u kasnijim fazama. Na primjer, ankete za otkrivanje neeksplozivnih ubojitih sredstava obično se provode na užem koridoru, u fazi kada je odabrana preferirana trasa kabla i obuhvaćaju vrlo detaljnu anketu (obično širina može biti oko 20-30 metara s obje strane trase kabela, ili veća ako se razmatra mogućnost mikro-rute kako bi se izbjeglo potencijalno eksplozivno područje). [1] Poznavanje područja također može utjecati na širinu koridora, na primjer, ako su identificirana područja pokretnog morskog dna ili prepreke tada koridor treba uzeti u obzir te čimbenike. Širina koridora također treba uzeti u obzir slučajeve kada se susretnu tvrdi uvjeti morskog dna ili prepreke duž rute kako bi se omogućila mikro-ruta. Također, širina koridora ovisi o broju kablskih ruta koje treba razmaknuti kako bi se omogućile tolerancije tijekom instalacije. Općenito, širina koridora trebala bi omogućiti popravak unutar koridora. Kao rezultat toga, širina koridora općenito se povećava s dubinom vode jer će se povećati duljina popravka, a točnost instalacije će se smanjiti.

Mogu postojati i ograničenja širine koridora povezana s dozvolama kada se kablaska ruta mora držati unutar unaprijed određenog autoriziranog koridora. Utjecaj širine koridora ankete na potrebne resurse, troškove i odgodu za akviziciju, analizu i obradu ključni su elementi koje treba uzeti u obzir. [1] Iz navedenih razloga nemoguće je definirati tipičnu širinu koridora za morsku anketu jer se može razlikovati od nekoliko desetaka metara za detaljne ankete do nekoliko stotina metara za proširene istraživačke ankete prilikom traženja optimalnih uvjeta za dizajn i instalaciju kabela.

Rekognoscirajuća anketa ili preliminarna anketa obično se provodi kako bi se na početku faze preliminarne studije prikupili osnovni podaci. Izvodi se radi dizajniranja preliminarne rute radi procjene izvedivosti i povezanih troškova, rasporeda, rizika za projekt. Preliminarna ruta također se koristi kao ulaz u natječaj za instalaciju kabela kao i za prijavu dozvola.

Detaljna anketa se provodi radi izrade konačnog dizajna kabela i instalacije kabela. Detaljna anketa se obično provodi na užem koridoru u odnosu na rekognoscirajuću anketu, obično uz središnju liniju koridora koja odgovara preliminarnoj ruti. Preporučuje se da ova anketa omogući detaljni dizajn rute i aktivnosti za zaštitu kabela. Koridor je obično uži jer se u ovoj fazi promjene rute uglavnom odnose na manje izmjene u usporedbi s preliminarnom anketom.

Poprečne linije se mogu izvoditi preko kabela kako bi se olakšala interpretacija i provjera podataka. Dodatne linije mogu se izvoditi izvan koridora za razvoj rute. Poprečne linije se trebaju izvoditi tamo gdje mogu pomoći u interpretaciji tla, obično na mjestima gdje dolazi do promjene litologije, strmih padina ili drugih važnih faktora.

Ljudska povijest je ostavila tragove na morskom dnu koji također utječu na trasu kabela. Tragovi arheološke i povijesne vrijednosti trebaju se izbjegavati zbog svojih vrijednosti, dok artefakti na morskom dnu predstavljaju opasnost i iz tog razloga ih je potrebno izbjeći. Olupine, na primjer, predstavljaju opasnost za operacije ukapanja kabela jer dijelovi olupine mogu ometati alat za ukapanje kabela, a kabel može zapeti za dijelove olupine. Neeksplozirane eksplozivne naprave predstavljaju poseban oblik prepreke za instalaciju kabela povezanu s rizikom od detonacije ili eksplozije. Rizik povezan s eksplozivnim napravama je vrlo specifičan, jer s jedne strane svima uključenima jasno je da je eksplozivna naprava dizajnirana posebno kako bi prouzročila teške štete ljudima i ljudskim aktivnostima tijekom rata, ali s druge strane vjerojatnost eksplozije pri udaru na eksplozivnu napravu se pokazala vrlo malom, a troškovi povezani s posebno identifikacijom i čišćenjem eksplozivne naprave s rute kabela mogu biti vrlo visoki, posebno na dionicama rute s puno ruševina.

U nekim područjima uz obalu i u prilazima većim lukama, gustoća ruševina na morskom dnu može biti vrlo visoka, 10 do 50 puta veća od gustoće ciljeva dalje na moru. Mikrorutiranje oko ciljeva na područjima s takvom visokom gustoćom kontakata često je nemoguće i stoga je potrebno istražiti mnoge ciljeve, što rezultira značajnim troškovima. Ti troškovi prvo zahtijevaju racionalno opravdanje. Zatim se trebaju razmotriti alternativne metode za smanjenje rizika povezanog s eksplozivnim napravama kako bi se smanjili troškovi.

Pokretljivost morskog dna utječe na ukop dubine eksplozivnih naprava tijekom vremena i time na potrebnu dubinu detekcije u tim područjima. [1] Također se proučava veza između pokretljivosti morskog dna i dubine detekcije.

6.2 Snimanje i istraživanje kopnenog dijela trase i okoliša

Istraživanja pri slijetanju na kopno i intermarealna istraživanja obično istražuju dio rute od 0 m najniže astronomske plime do mjesta prijelaza između podvodnih i podzemnih kabela. [1] Područje istraživanja pri slijetanju na kopno i intermarealna istraživanja uključuje radno područje gdje se koriste kopnena sredstva za instalaciju morskog kabela poput bagera, bušilica itd.

Utjecaj u ovom području ključno je ocijeniti u vezi s ljudskim aktivnostima. Postojeća infrastruktura identificirana tijekom preliminarnih istraživanja može zahtijevati posebna istraživanja, na primjer, kako bi se locirao točan položaj ispusta ili temelja nasipa. Istraživanja pri povezivanju na kopnu uključuju geofizička i geotehnička istraživanja u inženjerske svrhe. Ovisno o vrstama radova predviđenim za instalaciju kabela u ovom prijelaznom području, zahtjevi za istraživanja pri kopna bit će različiti. U slučaju zaštite kabela putem bezrovnih radova, karakterizacija slojeva tla u koje će se bušiti zahtijeva veću dubinu istraživanja. Ova istraživanja uključuju općenito duboke uzorke tla i duboka ispitivanja i na kopnu i u plitkim vodama. U nekim slučajevima, moguće je razmatrati rotacijsko bušenje kako bi se dosegla potrebna dubina istraživanja. Istraživanja za bezrovne radove mogu biti dizajnirana i izvedena od strane izvođača bezrovnih radova prilagođena odabranoj tehnici i opremi. S druge strane, dobivanje topografije duž bezrovnog profila zahtijeva manju preciznost nego u slučaju otvorene rove. Na kopnu, probna iskopavanja mogu se izvesti kao dio dizajna radova otvorenog rova. Mogu se izvoditi i za bezrovne radove jer se mogu zahtijevati na krajnjim točkama bezrovnih infrastruktura za postavljanje i povlačenje opreme za bušenje.

6.3 Izvješća snimanja i istraživanja

Za dobivanje dozvola i informiranje o procjeni utjecaja na okoliš provode se istraživanja okoliša. Za tu svrhu mogu se zatražiti različita istraživanja koja variraju ovisno o specifičnim zahtjevima dozvola i suglasnosti za određeni projekt. U nastavku je naveden popis mogućih istraživanja okoliša.

Moguća istraživanja okoliša sadrže istraživanja bentosa odnosno biljnih i životinjskih organizama na morskom dnu radi karakterizacije bentosnih staništa, istraživanja onečišćenja radi identifikacije

onečišćenja tla, arheološka istraživanja radi identifikacije objekata arheološkog interesa, istraživanja oceanografije ili meteorologije radi informiranja o aspektima kao što su toplinski učinci morskih veza na okoliš ili difuzija mutnoće tijekom radova. [1]

Izvješće o istraživanju podataka opisuje rezultate istraživačkih istraživanja. Bit će dana interpretacija stanja morskog dna i karakteristika tla. Obično se nakon geofizičkih i geotehničkih istraživanja dostavljaju različita izvješća o podacima istraživanja. Dostavlja se integrirano izvješće koje kompilira i sažima rezultate oba tipa istraživanja te ekstrapolira rezultate geofizičkih i geotehničkih istraživanja u jedan dosljedan skup podataka. Izvješće treba opisivati rezultate istraživanja po odjeljcima ruta i vrsti rezultata. Treba se odnositi, sažeti i ukazivati na izlazne podatke detaljnog istraživanja. Osim toga, posebno će biti pružen opis operacija istraživanja u zasebnom izvješću s terena ili unutar izvješća o podacima istraživanja. To bi trebalo integrirati sažetak operacija s naznakom istraženih područja te događaja ili neusklađenosti tijekom operacija.

6.4 Metode ispitivanja i pregled potrebne opreme

Brodске istražne aktivnosti bit će pozicionirane pomoću GPS-a ili DGPS sustava. Svi DGPS sustavi imaju tipičnu točnost manju od 0,5 m i uključuju korekciju s predviđanjem plime. Predviđena plima može uvesti ograničenu netočnost zbog razlike između predviđenih i stvarnih vrijednosti. Stoga je korekcija plime s lokalnim podacima posebno važna u priobalnim dijelovima. Svaki DGPS koristi mrežu fiksnih referentnih stanica na tlu za prijenos razlike između položaja označenog GPS satelitskim sustavom i poznatih fiksnih položaja. [1] Dinamičko pozicioniranje (DP) je značajka brodova koja omogućuje pozicioniranje broda i automatsko ispravljanje kretanja broda oko određene ciljne pozicije s različitim razinama redundancije (DP klasifikacija). Prikladni zahtjevi za pozicioniranje broda trebaju se odrediti na temelju obuhvata. Podvodno pozicioniranje često se provodi pomoću opreme koja koristi akustične signale za lociranje odašiljača ili odašiljača-prijemnika montiranog na potopljenom vozilu ili alatu. [1]

7. Mehanizacija i tehnologija za polaganje podmorskih kabela

7.1 Oprema za pripremu trase podmorskog kabela

Prije polaganja i pokapanja kabla, potrebno je očistiti koridor kabela premještanjem ili uklanjanjem prepreka, uključujući otpad, te pripremiti ili modificirati konfiguraciju morskog dna rute, ukoliko promjena rute nije moguća.

U slučaju da su stijene preteške ili prevelike za hvatanje kandžom i uklanjanje s rute, može biti potrebno koristiti posebne alate za uklanjanje stijena. Stijene mogu dovesti do značajnih promjena u postavljanju kabela i izmjenama rute, što povećava potrebno vrijeme i trošak.

Čest pristup uključuje hvatanje stijene i premještanje ili izvlačenje na brod pomoću hvataljke. Alat se aktivira putem ROV-a i postavlja se kranom ili LARS-om. Postoje različite vrste hvataljki za stijene, pri čemu su najčešće one s 4, 5 ili 6 zubaca ili školjke. [1]



Slika 7.1: Primjer jedinice za grabljenje stijena [1]

Još jedan pristup uključuje guranje stijena s puta pomoću građevinskog plaga ili građevinskih grablja. Prilikom primjene ove metode tijekom pripreme rute, koristi se veliki plag u obliku slova Y koji premješta stijene izvan koridora i izravnava morsko dno. Obje metode je moguće koristiti na projektu u ovisnosti o uvjetima rute.

7.2 Brod i oprema za polaganje podmorskih kabela

Plovila korištena za određenu instalaciju kabela trebala imati sljedeće:

- Dovoljno skladišnog prostora za duljine i težinu kabela u bubnjevima, koturima ili okretnim stolovima
- Dovoljan suh i temperaturno kontroliran prostor za skladištenje spojeva i alata (ako je primjenjivo)
- Manevriranje za održavanje pozicije i poboljšanje točnosti položenog kabela na odabranoj ruti
- Opremu za kontrolu napetosti kabela, instrumentaciju za mjerenje napetosti i sustav za polaganje kabela
- Prostor na palubi za instalaciju i oporavak kabela za popravak
- Radionice za popravak opreme
- Zaklon za spajanje kabela
- Kontrolne prostorije za svu opremu i sustav za zapisivanje podataka
- Sustavi za precizno pozicioniranje
- Navigacijski i pogonski sustavi za održavanje plovila na mjestu (ako je primjenjivo)
- Certifikati o morskoj vrijednosti [1]

Općenite informacije o plovilima su ukupna duljina, slobodni palub, širina, projicirani gaz i vlačna snaga. Ukupna duljina je maksimalna duljina trupa plovila mjerena paralelno s linijom vodene linije. Ova duljina je važna prilikom pristajanja broda.

Slobodna paluba obično je najviša potpuna paluba izložena vremenskim uvjetima i moru, koja ima trajna sredstva za zatvaranje svih otvora na dijelu izloženom vremenskim uvjetima, a ispod kojeg su svi otvori na bočnim stranama broda opremljeni trajnim sredstvima za vodonepropusno zatvaranje. [1] U brodu s prekidnom slobodnom palubom, najniža linija izložene palube i nastavak te linije paralelno s gornjim dijelom palube uzima se kao slobodna paluba. Širina je maksimalna širina broda izmjerena na sredini, do linije kalupa u brodu s metalnim trupom i do vanjske površine trupa u brodu s trupom od bilo kojeg drugog materijala. Projicirani gaz je vertikalna udaljenost između vrha kila do projektirane ljetne linije tereta, obično izmjerena u srednjoj ravnini broda. [1]

Projicirana dubina predstavlja vertikalnu udaljenost izmjerena sa strane od referentne ravnine do projektirane linije gornje palube na sredini.

Vlačna snaga je konvencionalna mjera vučne sile (u tonama ili kN) koju plovilo razvija pri punoj snazi. [1] Dovoljna vlačna snaga mora biti dostupna za rukovanje kabelom u katenu, rukovanje sredstvima za ukopavanje kabela (kao što su sile vučenja plugova) i dovoljni višak snage za manevriranje plovila u svim očekivanim uvjetima tijekom rada.

Za neke projekte odgovarajuća metoda instalacije može biti korištenje brodica za kabele, ali brodice imaju veća ograničenja u manevriranju na otvorenim vodama. Također, brodice su osjetljivije na nepovoljne vremenske uvjete u usporedbi s kabelskim brodovima. Brodice mogu biti opremljene opremom poput gusjeničara za napetost kabela i spremnicima za skladištenje, ali obično nemaju trajno ugrađene okretnice. One imaju mogućnost dodavanja ROV-a i opreme za ukopavanje kabela, ali skladištenje dugih duljina kabela može biti problem. Polaganje s brodicama je sporije, zahtijeva pomoćna plovila i treba ih unaprijed procijeniti jesu li pogodne za stvarnu situaciju u projektu.

Brodice, poput plovila, mogu biti opremljene navigacijskim i manevrirajućim pomagalima poput globalnog pozicioniranja. Obično se oslanjaju na sidreni sustav i vitlove kako bi održavale poziciju i dobile kretanje naprijed. Teglenice (teglence za rukovanje sidrima) koriste se za premještanje pojedinačnih sidara jedan po jedan dok brodski kapetan prilagođava poziciju brodice koristeći fiksne sidrene linije. Alternativa sidrenim sustavima je korištenje nekoliko teglenica za rukovanje brodicom tijekom polaganja, bez upotrebe sidara. Brodice se također mogu opremiti i šiljcima koji mogu pomoći u održavanju pozicije tijekom rukovanja sidrom i smanjiti broj potrebnih sidara za operacije instalacije.



Slika 7.2: Teglenica za polaganje kabela (CBL) [1]

Neki brodovi za polaganje kabela, kao i neki brodovi s ravnim dnom za polaganje kabela, također se mogu nasloniti na morsko dno. To može biti korisno za neke konfiguracije povlačenja prema obali, gdje se kabel na primjer povlači do obale pomoću valjaka. Da bi takvo naslanjanje bilo sigurno, morsko dno mora biti dovoljno ravno kako bi se izbjeglo stvaranje točkastih opterećenja na trupu brodice ili broda. Brodovi za polaganje kabela mogu biti opremljeni smještajem, ali nisu svi pogodni za dulji boravak na moru.

7.3 Mehanizacija za ukopavanje i zaštitu podmorskih kabela

Tijekom instalacije važno je koristiti opremu za pokop prema namjeni, uz fokus na izbjegavanje oštećenja kabela koji se instalira, istovremeno osiguravajući da kabel bude postavljen prema specifikacijama. [1] Na tržištu su dostupni različiti alati za pokop podmorskog kabela, namijenjeni različitim uvjetima morskog dna, a novi dizajni redovito se razvijaju. Alati koji se koriste za pokop i zaštitu podmorskog kabela uglavnom nisu standardizirani kao slični alati koji se koriste na kopnu. Često su razvijeni od strane izvođača instalacije ili specijaliziranih tvrtki.

Često korišteni alati za pokop su mehanički plugovi i sustavi mlaza vode. Plugski sustavi povezuju se s matičnim plovilom i vučom. Tipično, postignuta dubina pokopa je između 1 i 3 metra, ovisno o morskom dnu, ali nedavni novi dizajni mogu doseći dubinu od 3 do 8 metara, ovisno o morskom dnu. [1] Dubina pokopa kontrolira se hidrauličkim aktuatorima koji djeluju na klizne staze. Dubina pokopa mlaznih alata ovisi o morskom dnu i uvjetima tla, duljini mlaznog sata i planiranoj brzini napretka koju treba postići.

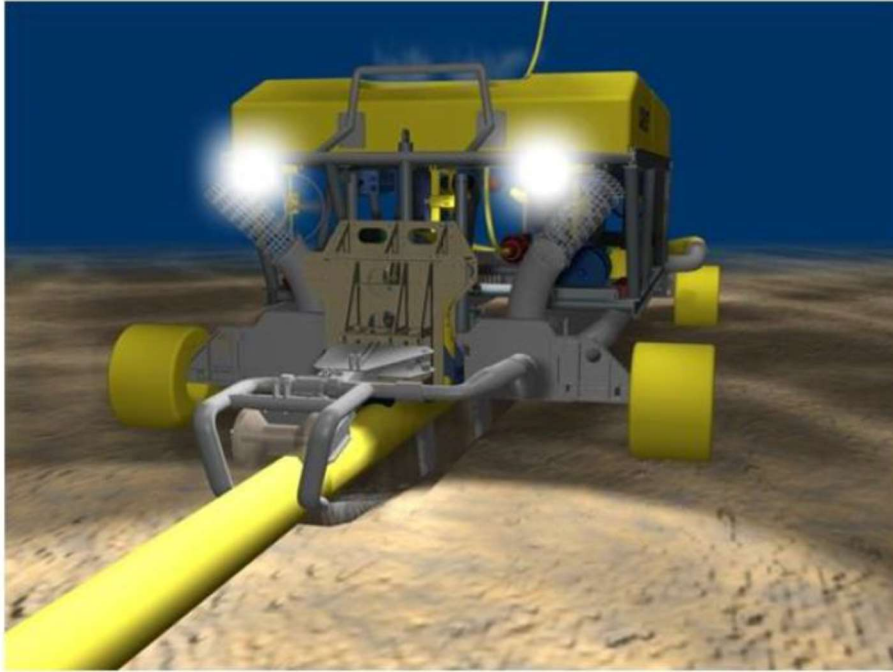
Mlazni sustav fluidizira pijesak i reže tlo niske i srednje čvrstoće koristeći kombinaciju visokog protoka, niskog tlaka i niskog protoka visokotlačnih mlaznica. Mlazni alati mogu biti instalirani na sustavima sličnim plućnom dizajnu, na daljinski upravljanim vozilima (ROV) ili pričvršćeni na bočnu stranu plovila. [1] Ova metoda može se koristiti samo u mekom ili srednje gustim tlima morskog dna. Kabel se provlači kroz mlaznice alata i pada u rov pod vlastitom težinom. Kabel se zatim samozakopava dok se materijal vraća u rov. Kada se kabel treba pokopati u srednje krupnim do grubim sedimentima koji brzo talože nakon fluidizacije, sedimenti se moraju držati u suspenziji dok se kabel ne spusti u fluidizirano tlo. Neki mlazni sustavi imaju dodatne mlaznice na stražnjoj strani za olakšavanje pokapanja, a neki mlazni sustavi imaju dodatne mlaznice ili ruke koje produljuju duljinu uz kabel gdje se tlo održava fluidiziranim.

Mlazni alati dolaze u raznim vrstama s različitom mlaznom snagom. Važno je da mlazni alat može napredovati u morskom dnu i pokopati kabel - u osnovi, alat ima dovoljno snage i prikladnu konfiguraciju za posao. Međutim, treba biti oprezan kako bi se osigurala ispravna uporaba alata jer previše vodnog tlaka u osnovi može otpuhati morsko dno ostavljajući kabel praktički nezaštićen u dolini morskog dna.

Mlazni alat može se oslanjati na potonuće kabla pod vlastitom težinom ili može koristiti pritisak kako bi kabel gurnuo prema dolje u morsko dno dok je tlo fluidizirano. Potrebno je paziti kako se kabel ne bi ošteti u bilo kojem trenutku.



Slika 7.3: Alat za mlazni ukop [1]



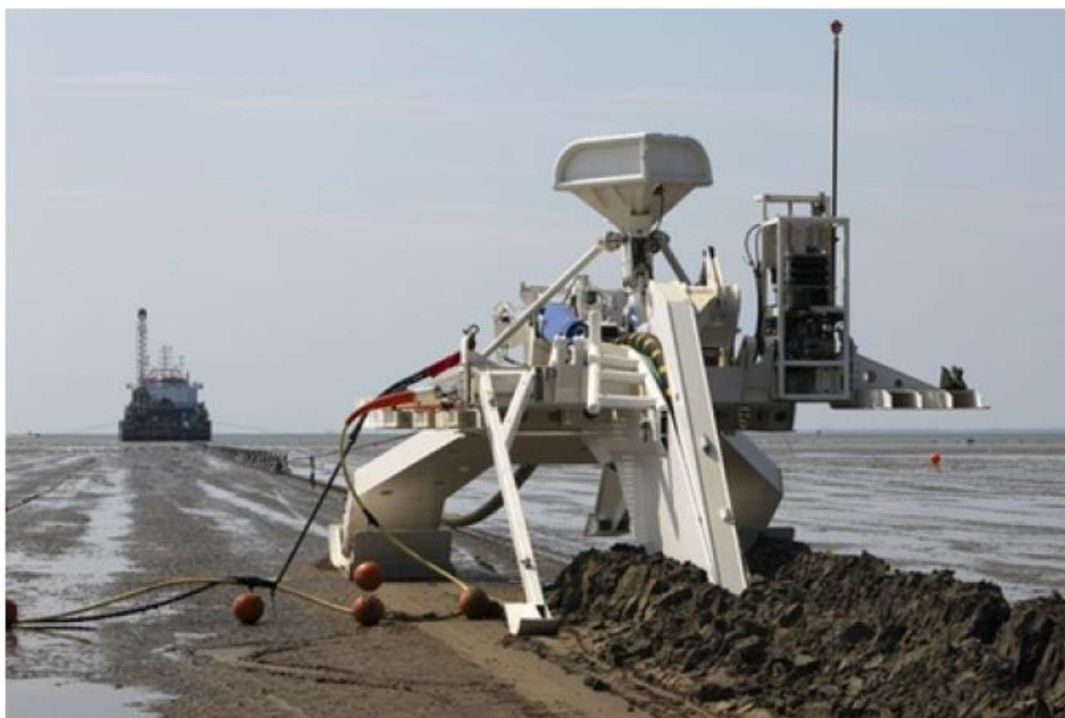
Slika 7.4 : ROV alat za mlaz vode [1]

U pluznoj metodi se dubok rov izrađuje u morskom dnu pomoću čelične oštrice pluga. Kabel se provodi kroz unutrašnjost pluznog uređaja i usmjerava u rov dok se plug kreće naprijed. [1] Kabel se zatim samozakopava dok se tlo vraća natrag i prekriva kabel iza pluga te se instalacija na taj način završava. Prednost pluzenja je što se može izvoditi istovremeno s polaganjem kabla. Nedostatak je što je kabel uključen unutar stroja i operacija je manje fleksibilna, a rizik od oštećenja kabla može biti veći, posebno ako plug nailazi na stijene, nego kod čistog mlaznog alata. Osim toga, s ovom metodom nije moguće izvesti više prolaza. Ipak, prednost je što se napetost u kablju, gdje ulazi u pluzni alat, može aktivno kontrolirati tijekom procesa od strane plovila za polaganje kabla i regulirati preostala napetost. Kabel se provodi kroz plug i istovremeno se pokopa. Glavni rizici za kabel nastaju prilikom uključivanja ili isključivanja pluga te u slučajevima kada operacija nije pažljivo praćena. Zahtjev pluzenja je potencijalno visoka razina vučne sile potrebne za vuču pluga. Prednost pluga u odnosu na druge alate za pokop je sposobnost izvođenja pokopa u različitim tlima, osim u kohezivnoj stijeni, i mogućnost postizanja značajnih dubina pokopa od 4 metra pa čak i dublje.

Ako je ruta kabla, u dijelu s tvrdim tlima, prethodno pluzena prije polaganja kabla, kabel se može naknadno pokopati pomoću uređaja za mlaznice vode, jer je tlo omekšano pluzenjem. Kao alternativa može se koristiti i vertikalni ubrizgivač.

Neki pluzni alati imaju sustav mlaznica vode. Mlaznice vode pomažu smanjiti vučne sile prilikom pluzenja u granuliranim tlima poput pijeska (voda iz mlaznica pomaže prevladati efekte dilatacije,

prividne kohezije pijeska kada se pijesak deformira određenom brzinom), ali i prilikom iskopavanja u ljepljivim kohezivnim tlima poput mekanih glina. [1]



Slika 7.5: Oprema za plug na kopnu [1]

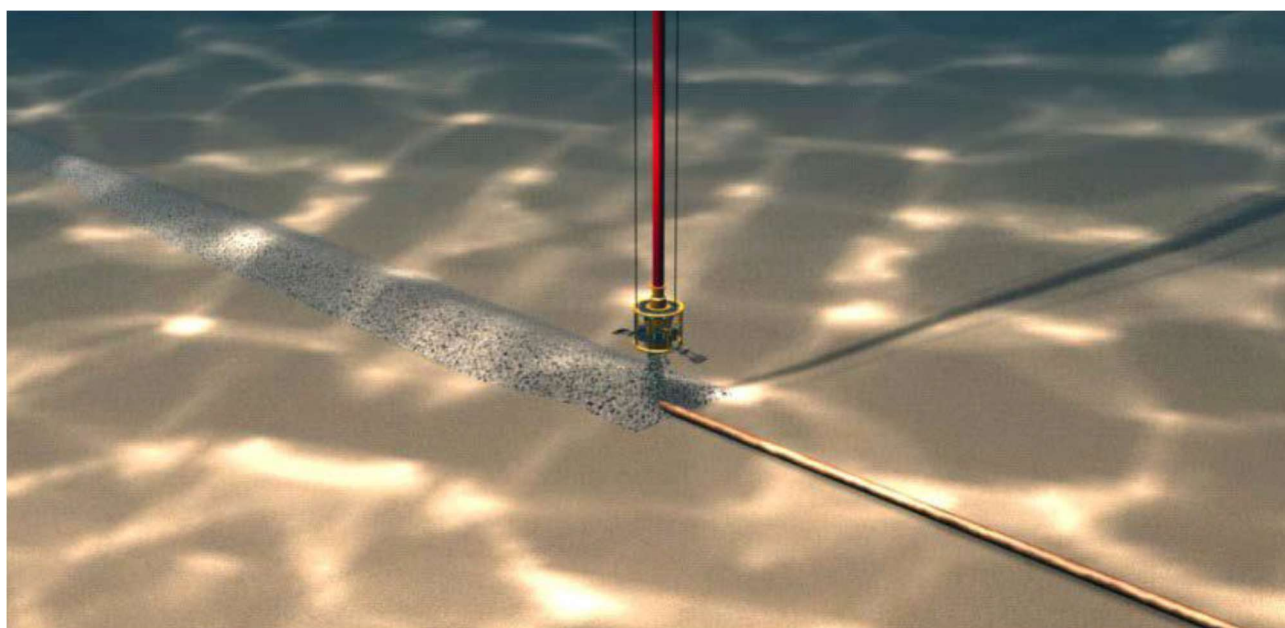
Vertikalni injektor sastoji se od mlazne glave odnosno mača s mlaznicama za vodu na vodećoj ivici. [1] Kabel se provodi kroz mlaznu glavu i na taj se način i polaganje i zaštita obavljaju u jednoj operaciji.

Dostupni su i drugi alati za ukopavanje uskih rovova u tvrdu ili kamenitu morsku podlogu, na primjer, mehanički rezači kamena sa kotačima i mehanički bageri sa lancem. Oba sustava koriste zamjenjive zube za rezanje kamena. Mehanički rezač kamena obično može doseći dubinu ukopavanja do 1,5 metra, no bilo koja dubina rova koja rezultira postavljanjem vrha kabela samo nekoliko desetaka centimetara ispod površine morskog dna, obično bi trebala biti prikladna, dok mehanički bager sa lancem može doseći dubinu rova do 4 metra. [1]

Postavljanje kamena je jedna od dodatnih zaštitnih mjera koje se primjenjuju kada nije moguće ukopati podmorski kabel zbog vrlo tvrdih uvjeta tla. Postavljanjem kamene brane iznad kabela može se osigurati zaštita od spuštanja sidra i povlačenja po dnu. Potrebne su određene mjere opreza pri primjeni metoda postavljanja kamena. Energija udara kamena mora biti manja od otpornosti kabela na udarce, a kamena brana mora imati dovoljnu visinu i širinu kako bi pružila odgovarajuću

i stabilnu zaštitu od potencijalnih prijetnji. Kamena brana mora biti stabilna kako bi zadržala svoj oblik pod utjecajem valova ili strujanja.

Kamenje se obično postavlja ili tako da se kamenje stavlja s bočne strane plovila za vrlo plitke vodene dionice ili pomoću fleksibilnih cijevi za ispuštanje s plovila. Fleksibilne cijevi za ispuštanje pružaju veću preciznost, ali se ne mogu koristiti u vrlo plitkim dionicama jer većina tih plovila zahtijeva gaz od otprilike 10 metara. Veličina kamenja vanjskog sloja kamene brane ovisi o lokalnim hidrauličkim uvjetima (strujanje mora, valovi itd.). Da bi se smanjio utjecaj postavljanja većeg kamenja na kabel, prvo se može postaviti sloj manjeg kamenja iznad kabela. Taj sloj kamenja može zaštititi kabel od udara ispucanog većeg kamenja za vanjski (oklopni) sloj. Optimalno rješenje treba se utvrditi za svaki projekt odnosno dizajn kabela. Može se smatrati da je kabel otežano izvući jer bi kamena brana trebala biti uklonjena, što bi moglo ugroziti integritet kabela.[1]



Slika 7.6 : Postavljanje kamenog pokrova s fleksibilnim crijevom [1]

U nekim situacijama, kada ni žljebovi ni postavljanje kamenja nisu izvedivi ili dozvoljeni, moguće rješenje su kabelačke cijevi ili razdjelnici. Ove cijevi mogu biti izrađene od lijevanog željeza ili plastike poput poliuretana ili kombinacije materijala. Često se koriste u područjima s posebno

zaštićenom florom i faunom (npr. morska trava). Ovo se također može koristiti blizu kopna u kombinaciji s ukopavanjem ili u pristupu dostrukturalne objekte na moru kao J-cijev.



Slika 7.7: Kabel s ljuskom od lijevanog željeza i instalacija ljuske od lijevanog željeza na kabel (uz nepoštivanje današnjih sigurnosnih mjera) [1]

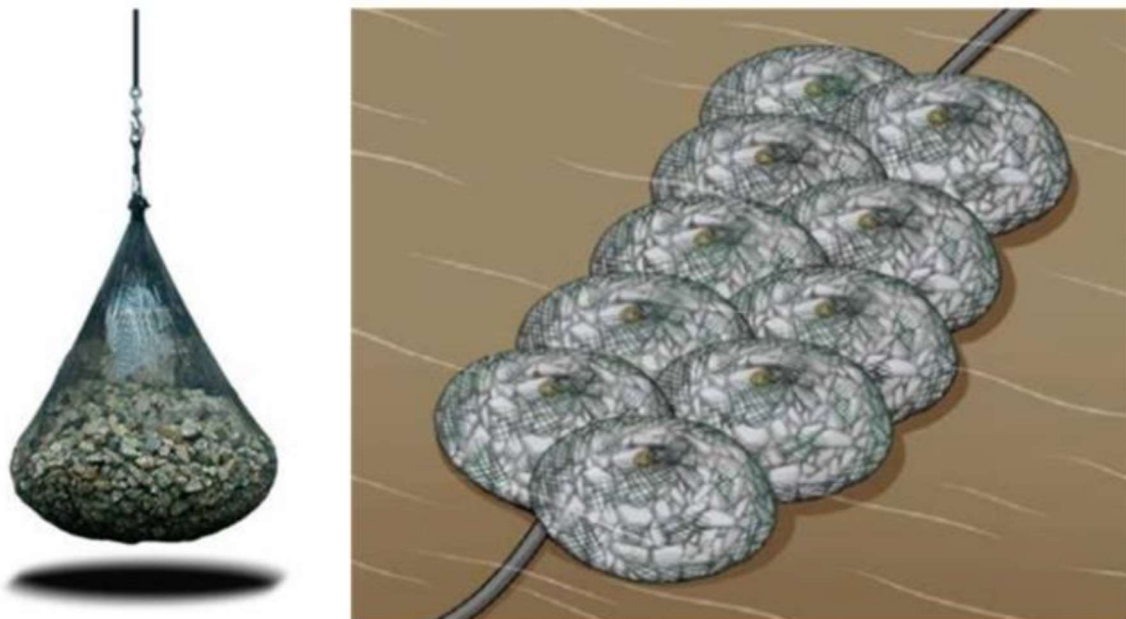
Blok madraci se mogu koristiti kako na ukopanim, tako i na neukopanim instalacijama. Općenito se koriste za zaštitu kabela kada željena dubina ukopavanja nije postignuta, kao i za prijelaze drugih komunalnih linija. [1] Budući da betonski blokovi imaju fleksibilnost, mogu se postaviti blizu kabela i morskog dna s visokom preciznošću. Betonski (blok) madraci prilagođavaju se obliku morskog dna i onome što štite. Madraci se postavljaju preko kabela ili cjevovoda pomoću dizalica i mogu se instalirati relativno malim brodovima u usporedbi s brodovima za postavljanje kamenja. Ovo može biti ekonomična alternativa ukoliko je obim radova ograničen. Betonski madraci se često koriste blizu kopnenih točaka gdje manji brodovi mogu pristupiti.



Slika 7.8: Prikaz kabela s betonskim (blok) madracem [1]

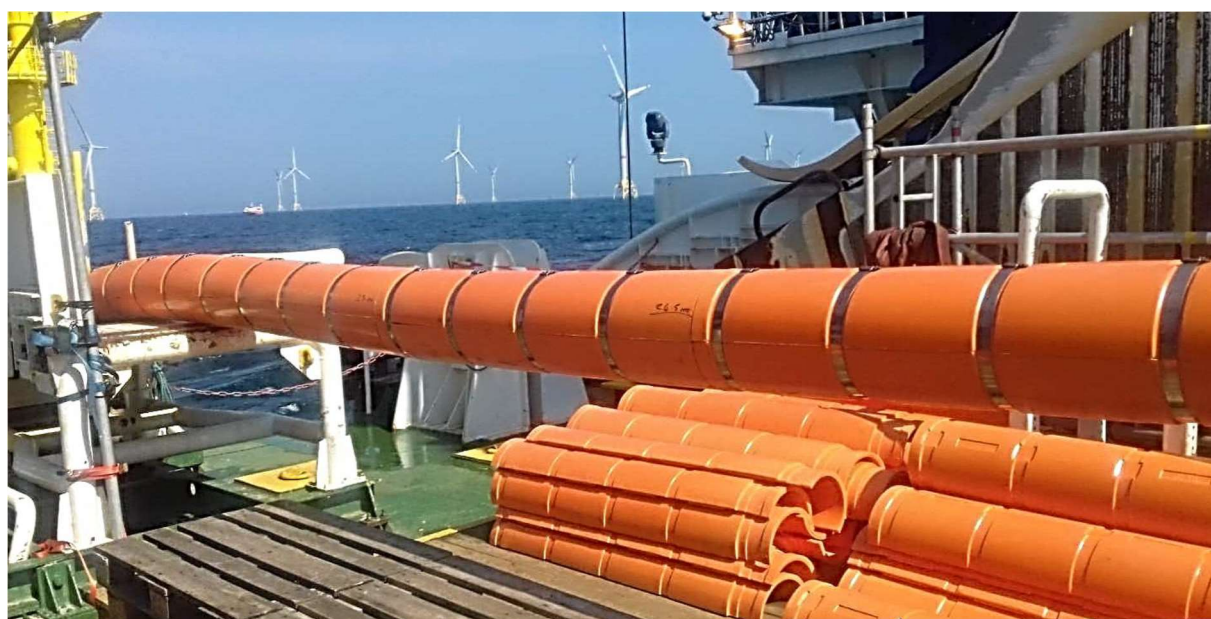
Madraci ispunjeni kamenčićima (gabioni) mogu se koristiti umjesto fleksibilnih betonskih madraca. Obično se sastoje od grubog mrežastog spremnika, otprilike u obliku i veličini madraca. Spremnik se puni lokalno dostupnim kamenčićima, djelomično zaobljenim, svaki promjera od 50 do 150 mm. [1]

Vreće ili košare s kamenjem imaju dobru fleksibilnost, stoga su pogodne za nepravilne morske dno površine ili stjenovita područja. Za postavljanje vreća ili košara s kamenjem na morsko dno potrebna je dizalica i okvir za otpuštanje na morskom plovilu. Kontinuirano praćenje putem ROV-a ili ronioca također može biti potrebno kako bi se provjerile pozicije na dnu.



Slika 7.9: Vreće s kamenjem i njihovo polaganje na kabel [1]

Polimerni oklopi se obično postavljaju na podmorski kabel na morskome plovilu prije polaganja kabela. Preporučuje se upotreba polimernih oklopa s dizajnom koji omogućuje slobodan protok vode kao i da se kabel s polimernim oklopima ne zakopavaju ispod morskog dna kako bi morska voda lako mogla ulaziti i izlaziti kroz razmak između spojeva oklopa. Kao i metalne cijevi, polimerni oklopi također imaju dobru otpornost na habanje, pa su povoljni za zaštitu kabela od abrazije. Također se koriste kao dodatna zaštita zajedno s vrećama ili postavljanjem kamenja kako bi se zaštitili kablovi od padajućih objekata.



Slika 7.10: Polimerni oklop za zaštitu kabela [1]

8. Proces operativnog polaganja podmorskih kabela

8.1. Priprema za izvođenje polaganja

Prije početka aktivnosti vezanih uz morsku instalaciju, potrebno je definirati ključne uloge i jasno odrediti odgovornosti svim uključenim stranama. Organogram ili struktura organizacije često je najbolji alat za vizualno prikazivanje uloga i linija izvještavanja zadataka. Važno je da resursi koji popunjavaju četiri ključne uloge navedene u nastavku imaju kvalifikacije i iskustvo u svom području:

1. Upravitelj offshore instalacija – OIM je odgovoran za cijelu offshore operaciju i koordinira s kapetanom broda za bilo kakva kretanja broda i koordinaciju radova. Obično se nalazi na brodu za polaganje kabela (CLV). [1]
2. Koordinator na kopnu / obali i offshore odgovoran je za sve radove na kopnu i radove na offshore strukturama, bit će glavni koordinator za operaciju vuče vitla.
3. Predstavnik klijenta prati operacije i provjerava usklađenost izvođača s dogovorenim planom izvođenja projekta (PEP) i ugovornim zahtjevima. Obično su smješteni na mjestu na kojem se odvijaju operacije (npr. predstavnik klijenta može pratiti radove na brodu za polaganje kabela, bilo offshore ili na kopnu tijekom mobilizacije i demobilizacije broda). Preporučljivo je imati barem dva predstavnika klijenta spremna za pokrivanje dvije radne smjene (24 sata) tijekom kampanje offshore radova.
4. Nadzornik morskog osiguranja - MWS je neovisna treća strana koja djeluje u ime osiguravatelja kako bi nadzirala provedbu radova sukladno odobrenim postupcima, aranžmanima i uvjetima politike osiguranja. Provodi pregled i odobrava predložene promjene u prethodno odobrenom planu te daje preporuke prema potrebi. MWS može biti smješten na brodu za polaganje kabela zajedno s predstavnikom klijenta ili udaljeno na kopnu.

U ovom trenutku projekta svi planovi su završeni i operacije instalacije su pred početkom. Kako bi se izbjeglo nepotrebno vrijeme čekanja i detalji bili usklađeni, dobra praksa je provesti jednostavno vježbanje cijele operacije: to se može dogoditi na posebnom preoperativnom sastanku na terenu, na kojem prisustvuju prethodno navedene ključne osobe. Vježbanje može biti vrlo jednostavno i slijediti plan izvršenja projekta. Koncept zahtijeva fizičko sudjelovanje oko modela područja operacije, prateći vremenski raspored iz programa sa modelima područja operacije, brodovima itd.

Glavni cilj je identificirati i zabilježiti nesporazume, neskladnosti i pogrešne pretpostavke te se usredotočiti na detalje koji još nisu razjašnjeni između uključenih strana. Rezultat vježbe je popis pitanja koja treba riješiti prije početka stvarne operacije, važno je da se pitanja ne rješavaju tijekom vježbe već samo bilježe. Vježba omogućuje svim stranama jasan uvid u nadolazeću operaciju, što će se dogoditi, kada će se dogoditi i tko će što obavljati. Također pruža jasnu sliku područja koja treba dodatno razjasniti ili na kojima treba više pažnje. Uspješna vježba ROC-a osigurat će svim stranama istu percepciju i razumijevanje predstojeće operacije, što će dovesti do glatke provedbe u skladu s dogovorenim planom. [1]

Kao preduvjet za planiranje svake kampanje morskog plovila, pažljivo se moraju uzeti u obzir dozvole za rad, raspored, ekološki aspekti, međusobna ovisnost drugih radnih paketa i drugi faktori. [1] Nesuglasice između dozvola, radnih paketa i rasporeda moraju se pregovarati kako bi operacija mogla nesmetano nastaviti. Operateri moraju biti certificirani prema području i relevantnim propisima, a trebalo bi izraditi Plan za hitne situacije koji će obuhvatiti sve faze projekta. "Ažuriranje mornara", ako je primjenjivo, redovito se šalje kako bi industrija bila informirana o bilo kakvim ograničenjima ili utjecaju na navigaciju. [1] Detalji su obično navedeni u dozvolama.

Inženjering procesa mobilizacije mora uzeti u obzir zahtjeve za plovilo, opremu i operatere koji moraju biti certificirani prema području i propisima. [1] Zahtjevi za iskustvom s opremom moraju biti dokumentirani. Ako nema dovoljno dokumentiranog iskustva, moguće je da će biti potrebni dodatni testovi tijekom ove faze. Sve operacije tijekom mobilizacije i kasnijih aktivnosti instalacije moraju biti uzete u obzir, planirane i opisane.

Rukovanje trajnim predmetima odnosno dijelovima koji će činiti trajni dio sustava kabela mora biti opisano, a parametri rukovanja dobavljača opreme moraju se poštovati. Proračuni i dizajn za pričvršćivanje na brodu te postupci komunikacije, uključujući aktivnosti verifikacije treće strane, mogu biti opisani prema potrebi i u dogovoru između klijenta i izvođača. Za operacije učitavanja kabela i prijenosa sve postaje moraju biti opremljene radijskom komunikacijom. Koordinacija svih ovih aktivnosti mora biti jasno definirana u planu komunikacije uključujući jasne upute za zaustavljanje i nastavak naredbi.

Pomorski nadzornik osiguranja (Marine Warranty Surveyor - MWS) često je potreban od strane osiguravatelja kako bi zaštitio interese osiguratelja iz kojeg je izdano osiguranje. [1] Njegova opća obveza je zaštita osiguranih predmeta i imovine. Na temelju tog načela, pomorski nadzornik jamstva odobrava pomorske operacije i postupke koji spadaju pod relevantno osiguranje ili koji bi mogli izravno utjecati na osigurane predmete poput kabela i njegovog pribora i imovinu. Konačni

opseg rada i konačna odgovornost i ograničenja trebaju biti jasno opisani za svaki pojedini projekt između svih uključenih strana.

Klijent može odabrati dodatne savjetodavne usluge kako bi podržao, odobrio i nadzirao usluge, radove i sustav koji će se instalirati. [1] Preporučuje se da takvi savjetnici imaju posebne kompetencije i certifikate za potrebne savjetodavne usluge. Uloga takvog savjetnika, uključujući njegovo ovlaštenje i odgovornost, mora biti jasno definirana u ugovoru projekta. Sve zahtjeve, odluke, promjene uputa, priručnika, dizajna, postupaka i ostalog treba tretirati u skladu s ugovorom. Odgovori izvođača na takve zahtjeve trebaju biti u skladu s ugovorom projekta, što može uključivati potencijalne odgovore prema zadanim odlukama i postupcima u odgovarajućem vremenskom roku s mogućim upozorenjima, utjecajima na projekt i sustav koji će se instalirati, kao i na instalacijske priručnike i sigurnost.

8.2. Priprema kabela trase podmorskog kabela

Prije samog polaganja podmorskog kabela može se provesti operacija čišćenja trase kabela. Tijekom ove operacije, mogu se ukloniti van upotrebe stavljene strukture i druge prepreke. Operacija se može obaviti mjesecima ili čak godinama prije nego što zapravo dođe do polaganja kabela.

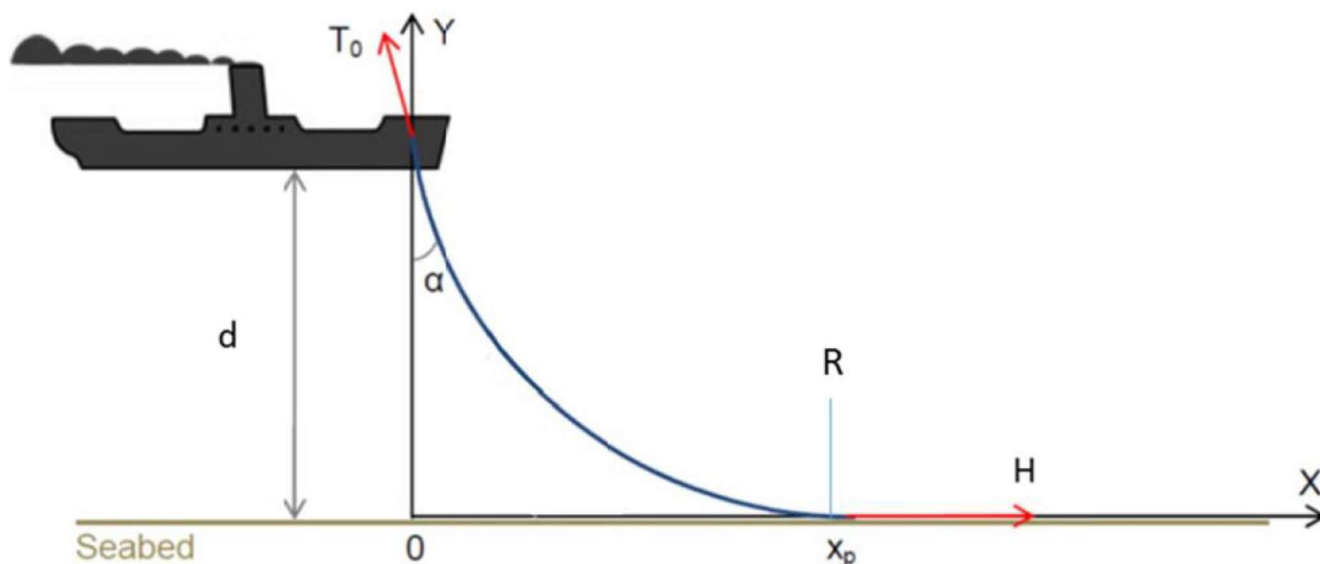
Prije operacije polaganja podmorskog kabela, podvodni objekti duž trase moraju biti identificirani i istraženi kako bi se provjerilo jesu li u funkciji. U slučaju da su objekti u funkciji, mogu se osmisliti posebne sigurnosne mjere kako bi se izbjegla bilo kakva šteta na tim objektima. Na primjer, može se dogovoriti minimalna udaljenost od objekta u suradnji s vlasnikom objekta uzimajući u obzir dubinu vode. Ti aktivni objekti trebaju biti zabilježeni u navigacijskom sustavu broda za operacije prije polaganja podmorskog kabela, a sam brod treba imati poseban sustav za pozicioniranje kako bi nadzirao i zabilježio sve potrebne podatke tijekom operacije. Operacija prije polaganja podmorskog kabela trebala bi se izvesti na posebnim sekcijama planirane trase kabela gdje će se kabel ukopati ili gdje se na trasi nalaze opasni ostaci koji trebaju biti uklonjeni prije polaganja kabela. Operacija bi trebala biti obavljena na sredini planiranog koridora kabela - kao minimalni zahtjev; u slučaju velikih koridora za više kabela, može se izvesti više prolaza broda. Maksimalna brzina broda mora biti planirana na temelju uvjeta na licu mjesta i uvjeta broda. Preporučuje se obavijestiti vlasnike tvrtki koje posjeduju objekte u blizini koridora kabela ili bilo koje druge dionice da će se ta operacija provesti kako bi se uskladili radovi i izbjeglo oštećenje bilo kojeg aktivnog objekta pri tom uzimajući u obzir i strane koje treba obavijestiti prema dozvolama. [1]

Operacija čišćenja trase mora biti izvedena na trasi kabela ili u blizini trase kabela kako bi se uklonili objekti koji više nisu u uporabi i koji mogu ometati, otežavati ili predstavljati potencijalni rizik za postavljanje kabela i njegovu zaštitu tijekom ciklusa životnog vijeka. Rezultati kampanje čišćenja trase bit će proslijeđeni izvođaču postavljanja kabela i vlasnicima ili tijelima nadležnim za odobrenje ili zakonodavstvo. Za neprepoznate kabele ili kabele čijih vlasnika nije moguće utvrditi priprema se postupak, a po mogućnosti taj postupak treba biti dogovoren s vlastima prije početka čišćenja trase. Stoga će biti pripremljeni operativni postupci, uključujući procjenu rizika i okoliša.

8.3. Proces polaganja i ukopavanja podmoskog kabela

Operacijski postupci postavljanja kabela često su kritičan dio projekta. Prije početka postavljanja kabela potrebno je da su već spomenute pripreme morskog dna završene.

Također je nužno prije početka postavljanja pripremiti "Plan postavljanja" koji će pružiti posadi broda za postavljanje kabela minimalne specifične parametre položaja broda odnosno kabela, mjesto dodira kabela s dnom, brzinu i napetost s predviđenom preostalom napetosti nakon postavljanja. [1] Napomena je da bi preostala napetost uvijek trebala biti pozitivna, ali relativno mala. Tijekom svih kampanja postavljanja kabela, praćenje katenarne linije je od ključne važnosti jer pruža informacije o primijenjenim silama na kabel. Katenarna linija definira kabel u stupcu vode između izlaza kabela iz stražnjeg ispusta odnosno valjka broda za postavljanje kabela (CLV) i dodirne točke kabela s dnom mora. Mjerenjem kuta kabela gdje izlazi iz CLV-a i znajući stvarnu dubinu vode, može se izračunati napetost na kabelu i donja tj. preostala napetost. [1] Alternativno, moguće je koristiti duljinu za izračun preostale napetosti u kabelu. Duljina je udaljenost između točke polaska na brodu i stvarne dodirne točke kabela s dnom mora. Dodirnu točku kabela može nadzirati ROV (daljinski upravljano podvodno vozilo) uz kabel, ROV koji je pričvršćen na kabel ili skener katenske linije kabela koji je pričvršćen na brod blizu ispusta. Važno je napomenuti da je katenska linija oblik bez krutosti savijanja, pa pri korištenju ove metode krutost savijanja nije uključena. Međutim, rezultat se može prihvatiti jer to nema veliki utjecaj s obzirom na veličinu samog kabela. Pomoću softvera za konačne elemente moguće je izračunati ponašanje kabela u vodi bez katenske linije.



Slika 8.1: Polaganje kabela [1]

Na slici 8.1 možemo vidjeti odnose broda na kabel i morsko dno gdje nam w [N/m] predstavlja težinu jedinice kabela po metru u vodi. Iznos je jednaka težini jedinice kabela u zraku umanjene za težinu volumena vode koji zauzima jedan metar kabela, uzimajući u obzir infiltraciju vode u prostor između zaštitnih žica, obloge i slojeva podloge. H [N] je tenzija na dnu odnosno sila koja se primjenjuje na točku dodira kabela s dnem mora. Udaljenost točke dodira kabela s dnem mora od kotača za postavljanje na moru je x_p [m]. R [m] je minimalni radijus zakrivljenosti između kolita za postavljanje kabela i točke dodira kabela s dnem. Dubina mora na mjestu gdje kabel napušta kolut za postavljanje je d [m]. Tangenta napetosti kabela na njenom izlazu je T_0 [N], a ona je jednaka vučnoj sili na brodu u smjeru osi kabela. [1]

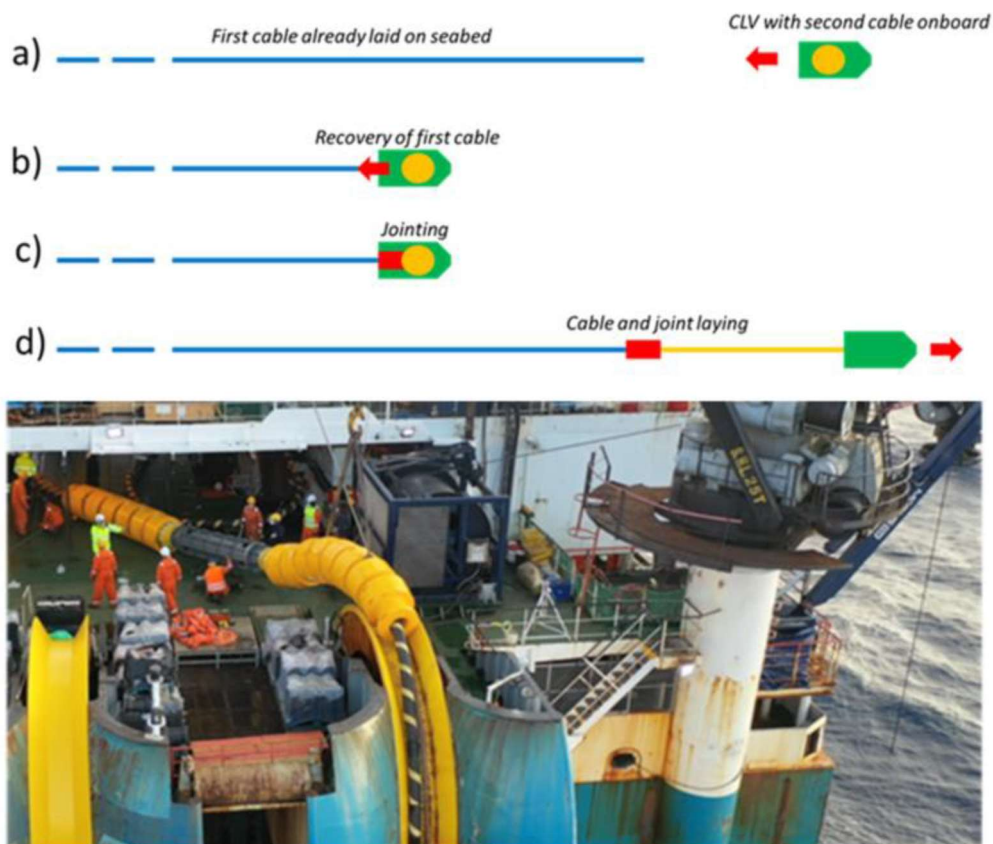
Tijekom planiranja postavljačke kampanje važno je definirati ciljni kut kabela, kao i ciljni i minimalni ostatak napetosti uz ugrađenu sigurnosnu margu koja se pridržava definiranih parametara kabela. [1] Ako je ostatak napetosti prenizak odnosno kut kabela bliže vertikali na kolutu na brodu, udaljenost na dodir će biti kratka, a brzina otpuštanja kabela može se smanjiti. Postoji rizik od labavosti kabela na dnu mora, što može uzrokovati savijanje kabela na dnu mora.

Ako je ostatak napetosti kabela dok je postavljen na dnu mora previsok, udaljenost na dodir će biti duga, a brzina otpuštanja kabela može se povećati. Postoji rizik od premašenja vučne sile na

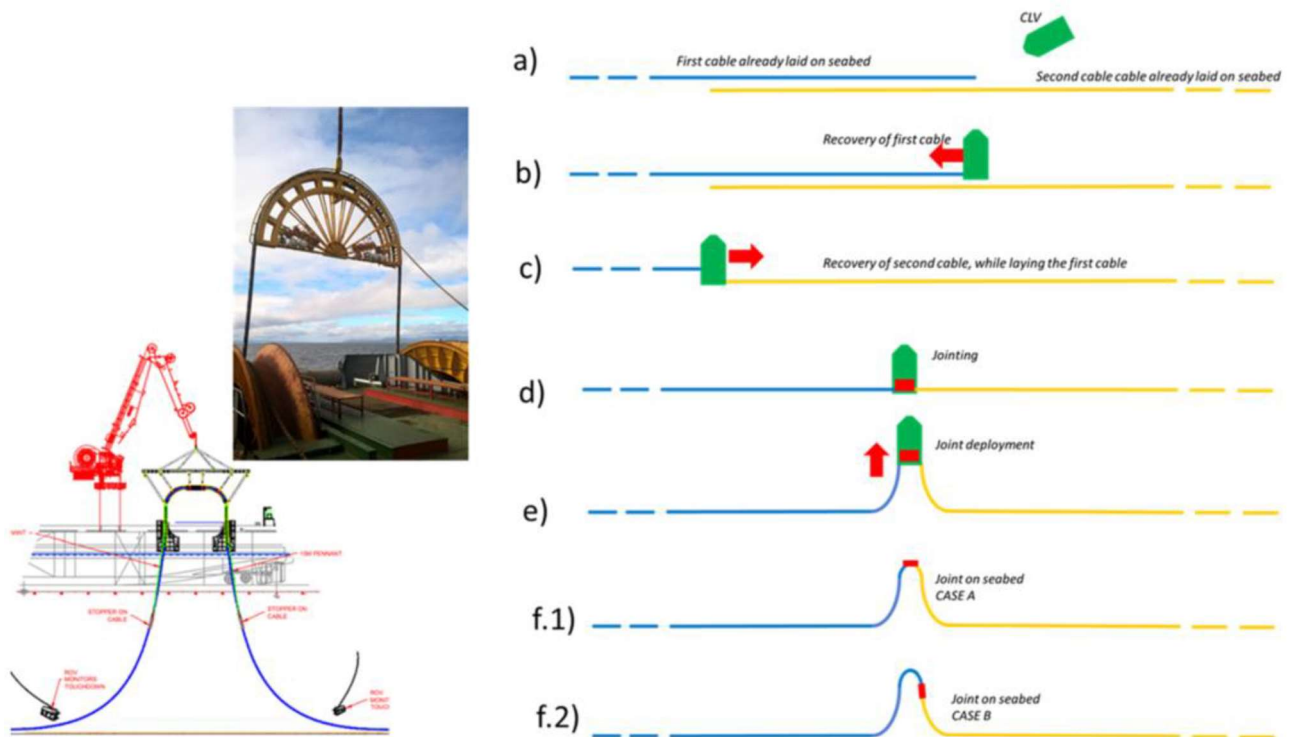
kabelu, što može dovesti do oštećenja kabela, slobodne ploče kabela ili izvlačenja kabela iz prethodno iskopanog rova ili ostavljanja kabela bez dovoljnog olabavljanja kako bi se izvršilo naknadno ukopavanje. Ako se kabeli postavljaju u rov, važno je smanjiti brzinu i ostatak napetosti prilikom približavanja zavoju ili kutu. Ako se kabel postavi u zavoju s previsokom napetosti, ima tendenciju postavljanja na unutarnju stranu zavoja i potencijalno "penjanje" iz rova.

8.4. Tehnologija i postupci spajanja podmorskih kabela

Za duže dionice podvodnog kabela može biti potrebno jedno ili više spojeva na terenu zbog praktičnih razloga. Ti spojevi na terenu mogu biti instalirani kao in-line spojevi, gdje se spoj postavlja na kraj kabela koji je već položen i kampanja postavljanja se nastavlja. [1] Međutim, spoj na terenu također se može instalirati kao završni spoj, gdje se oba kraja kabela izvuku iz mora i završni spoj u obliku omega ili ukosnice postavlja na dno mora nakon spajanja. U oba slučaja važno je da vremenski uvjeti odgovaraju aktivnosti i da se poštuju uvjeti rada na kabelu.



Slika 8.2: Prikaz in- line spoja [1]



Slika 8.3: Prikaz završnog spoja [1]

Preporučuje se da svaku značajnu kampanju instalacije podmorskog kabela izvede brod opremljen za kontingentno spajanje kabela (CLV). Ovo osigurava da se bilo kakve nepredviđene situacije koje zahtijevaju dodatno polje ili popravak kabela mogu rješavati što je moguće glađe i brže, bez potrebe za posebnom popravnom operacijom ili plovilom. U slučaju operacija sa snopovima kabela, postupci su slični gore opisanim, ali pri vraćanju energetskih kabela, treba imati na umu da se spojevi mogu montirati paralelno ili sekvencijalno, ovisno o raspoloživom prostoru na palubi plovila.

8.5. Postupci završavanja podmorskih kabela na kopnenim dijelovima

Pri približavanju obali i pripremi za operaciju izvlačenja, dubina morskog dna i vremenski uvjeti, u većini slučajeva, igraju ključnu ulogu. Cilj je imati što kraću udaljenost između plovila i obale kako bi se bolje kontrolirao kabel tijekom operacije izvlačenja. [1] Plovilo se treba nalaziti što bliže obali, ali bez ugrožavanja oštećenja plovila ili njegove manevriranje sposobnosti. Plovila s dinamičkim pozicioniranjem (DP) brzo se pozicioniraju i započinju polaganje kabela nakon završetka izvlačenja, ali obično zahtijevaju oko 5 metara vode ispod plovila kako bi osigurala funkcionalnost. [1] Tradicionalno postavljanje sidra ili usidrenje obično zahtijeva manju dubinu

vode, ali uz pomoć vučnog plovila za sidrenje, što oduzima vrijeme. Plovilo s mogućnosti nasukanja zahtijeva odgovarajuće uvjete morskog dna i privremenu dovoljnu dubinu vode kako bi se postavilo u položaj i ponovno se izvuklo za polaganje kabela. Ta plovila moraju ispunjavati određene karakteristike kako bi omogućila nasukanje, kao što su oblik trupa, položaj propelera, pristup vodi za gašenje požara i ostalo. Valovi i veliki pokreti plovila također trebaju biti uzeti u obzir pri odlučivanju o položaju plovila, kao i utjecaj morskih struja na kabel tijekom operacije izvlačenja.

Komunikacija između plovila i posade na obali je ključna, a alternativno rješenje, osim mobilnih telefona, često je obavezno jer loša komunikacija može zaustaviti operaciju izvlačenja. Transfer posade i alata između CLV-a i posade na obali treba izbjegavati, ako je moguće, jer takvi transferi često uključuju dodatne rizike. [1]

Offshore objekt obično je transformatorska ili pretvaračka platforma, platforma za naftu ili plin ili objekt za proizvodnju energije vjetrom.

Obično će više kabela ulaziti i izlaziti iz svakog offshore objekta, bilo da su to kabeli za izvoz energije ili kabeli za povezivanje izvora energije. Kabeli koji ulaze u ove objekte obično su mehanički dizajnirani kako bi izdržali zahtjeve instalacije i radnih uvjeta. [1] Kao i kod spajanja na kopnu, uvjeti se razlikuju za svaki projekt, pa su stoga i rješenja za rad u različitim uvjetima.

8.6. Završna ispitivanja podmorskog kabela nakon završetka izgradnje

Testiranje je temeljni dio životnog ciklusa kabela. Neka se testiranja provode na kabelu kako bi se potvrdilo da je kabel i dalje neoštećen nakon što je instalacija završena. Druga testiranja se obavljaju kako bi se potvrdio uspjeh same aktivnosti polaganja i zaštite kabela. Oba su relevantna za procjenu i dokumentiranje aktivnosti instalacije kabela.

Nakon potpune instalacije kablenskog sustava, provode se testovi postavljanja kako bi se potvrdio uspjeh instalacijske aktivnosti. Radi provjere ispravne instalacije kabela na morskom dnu, uobičajena praksa je da se provede kampanja praćenja kabela na kraju faze instalacije kako bi se točno utvrdio položaj i dubina zakopavanja postavljenih kabela. [1] Ova kampanja praćenja nije potrebna ako su podaci o zakopavanju i položaju kabela već dostupni tijekom aktivnosti postavljanja kabela (npr. istovremeno polaganje i zakopavanje kabela). Ovisno o ugovoru, rezultati praćenja kabela mogu se koristiti kao procjena jesu li kabeli instalirani kako je dogovoreno između izvođača i naručitelja. Najvažnija provjera nakon instalacije je praćenje položaja kabela onako kako je položen, a to je bitan zadatak kako bi se točno zabilježili položaj kabela (X i Y koordinate)

i njegova zakopanost (Z koordinata) ukoliko te informacije već nisu dostupne tijekom instalacije kabela. Tijekom instalacije kabela, svi izvještaji o nepravilnostima, položaj spojeva i ostale anomalije moraju biti zabilježeni i provjereni.

Nakon konačne instalacije, može se provesti multibemov nadzor koji prvo treba potvrditi da nema dijelova kabela na površini morskog dna osim na predviđenim mjestima poput prijelaza i sličnog. Nadzor može dokumentirati u kojoj mjeri je morsko dno obnovljeno nakon radova na zaštiti i pruža referencu za položaj kabela u odnosu na morsko dno.

Na područjima rute gdje kabele nemaju zaštitu, obično se provode video nadzori kako bi se provjerilo opće stanje instalacije i posebno slobodni razmaci. [1] Za takve nadzore obično je potrebno koristiti ROV (podvodni daljinski upravljani vozilo). Video snimke mogu se također koristiti za vizualnu provjeru stanja vanjske zaštite, poput kamenih bermi ili betonskih madraca. Općenito, nakon što se prvo praćenje provede, nije potrebno ponavljati ga kao redovnu aktivnost održavanja, osim ako morsko dno doživljava velike promjene, tektonska kretanja ili nestabilnost podvodnih kosina, zakopavanje podmorskog kabela trebalo bi ostati isto. [1] Iz tog razloga, dovoljno bi bilo provjeriti položaj, profil i dubinu morskog dna putem jednostavnog geofizičkog istraživanja, na primjer, korištenjem multibemovog ekolokatora i sustava za praćenje kabela. U određenim okolnostima, kada postoji sumnja u kretanje morskog dna ili kabela, ili zabrinutosti zbog kvalitete podataka o stvarnoj izvedbi zadatak praćenja može se ponoviti.

Glavni testovi nakon instalacije opisani su u međunarodnim standardima poput IEC, IEEE i preporukama CIGRE-a, s preciznim zahtjevima za testiranje i određenim pragovima za prolazak testova. Testiranje podmorskih kabela je sveobuhvatno i provodi se tijekom razvoja, kvalifikacije, proizvodnje i instalacije. Testovi koji se provode u različitim fazama životnog ciklusa kabela dijele zajednički cilj: osigurati rad bez poteškoća pod određenim uvjetima. Električni testovi se provode kako bi se osiguralo da su kabele potpuno spremni za rad nakon završetka instalacije.

9. Proračun dopuštenog strujnog opterećenja realnog visokonaponskog izmjeničnog podmorskog kabela $U_n=110$ kV

Prikazan je primjer provjere dopuštenog strujnog opterećenja za podmorski kabel Crikvenica – otok Krk :

Potrebno trajno dopušteno strujno opterećenje od 120 MVA, te najveća pogonska struja koja se javlja u pojedinoj žili tada iznosi:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}U_n} = \frac{120 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 630 \text{ A}$$

Stacionarnim toplinskim proračunima dobije se temperatura svih kabela u sustavu pri zadanom opterećenju i zadanom koeficijentu opterećenja od 100%. Iznos trajno dopuštene struje vodiča kablaskog voda računa se prema izrazu

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (9.1)$$

Prilikom proračuna u grafičko se sučelje unose svi elementi i njihove karakteristike bitne za termičko modeliranje konfiguracije kabela sa svim geometrijskim veličinama, karakteristikama i vrstama materijala.

Tablica 9.1 Ulazni podaci za odabrani podmorski kabel

Nazivni napon	64/110 kV
Nazivna frekvencija	50 Hz
Tip vodiča	Cu
Presjek vodiča	630 mm ²
Promjer vodiča	33 mm
Materijal ekrana vodiča	Poluvodljivi PE
Debljina ekrana vodiča	15/62.9 mm
Materijal izolacije	XLPE
Nazivna debljina	1 mm
Materijal zaštite od uzdužnog prodiranja vode	Bubreća traka
Nazivna debljina zaštite od uzdužnog prodieranja vode	0.6 mm
Materijal metalnog plašta	Legura olova
Debljina metalnog plašta	2.4 mm
Materijal ispune	Polimerski profili
Vezivo omot	Traka od polimera
Materijal armature (unutarnji sloj)	Pocinčane čelične žice
Debljina armature (unutarnji sloj)	7 mm
Broj armature (unutarnji sloj)	71
Tip donjeg sloja (posteljice)	Traka

Materijal armature (vanjski sloj)	Pocinčane čelične žice
Debljina armature (vanjski sloj)	7 mm
Broj armature (vanjski sloj)	77
Materijal vanjskog plašta	Guma/poliprepilen + bitumen
Debljina vanjskog plašta	4 mm
Vanjski promjer kabela	200 mm
Maksimalna dozvoljena trajna temperatura vodiča	90°C
Maksimalni faktor gubitaka (pri 20°C i 50 Hz)	$\tan\delta = 2 \cdot 10^{-4}$

Tablica 9.2 Podaci za podzemni kabel

Nazivni napon fazni/linijski	64/110 Hz
Nazivna frekvencija	50 Hz
Presjek i materijal vodiča	100 mm ² , aluminij – zbijeni vodič
Presjek i materijal zaslona (ekrana)	95 mm ² , bakrene okrugle žice i kontra - spirala
Izolacija	Umreženi polietilen (XLPE), trostruko ekstrudiran
Promjer vodiča	38 mm
Nazivna debljina poluvodljivog sloja preko vodiča	1 mm
Nazivna debljina vanjskog plašta od polietilena visoke gustoće (PEHD)	3.8 mm
Vanjski promjer kabela	85 mm
Masa kabela (približno)	8 kg/m
Maksimalno dopuštena trajna radna temperatura vodiča	90°C
Maksimalni faktor gubitaka (pri 20°C i 50 Hz)	$\tan\delta = 2 \times 10^{-4}$

Tablica 9.3 Iznosi toplinske otpornosti materijala korištenih u proračunima, osim toplinske otpornosti samog tla

Materijal	Toplinska otpornost materijala (K m/W)
Kabelska posteljica (nula)	1,1
Beton	0.87
XLPE	3,5
PEHD (polietilen visoke gustoće)	3,5
PE (polietilen)	3,5
Polipropilen	6,0

U proračunima se uzima sljedeća temperatura okoline:

Temperatura okoline (tlo) za dubinu polaganja kabela do 2 m.....20°C

Temperatura okoline (tlo) za dubinu polaganja kabela iznad 2 m15°C

Temperatura okoline (more)..... 25°C

Toplinska otpornost tla u ovom slučaju iznosi $1,4 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$

Za stacionarne toplinske proračune odabrani su karakteristični kritični presjeci kablinskih trasa:

1. Podzemni kabel smješten u posteljici sa slobodnim površinama
2. Podzemni kabeli u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku
3. Podzemni kabeli smješteni u zaštitnim PEHD cijevima promjera 160 mm u zaštitnom betonskom bloku
4. Podmorski kabeli u priobalnoj zaštiti iznad razine mora smješteni u PEHD cijevi s vanjskim promjerom 450 mm na dubini od 1,2 m ispod razine tla
5. Podmorski kabel položen slobodno na dnu mora između priobalnih zaštita

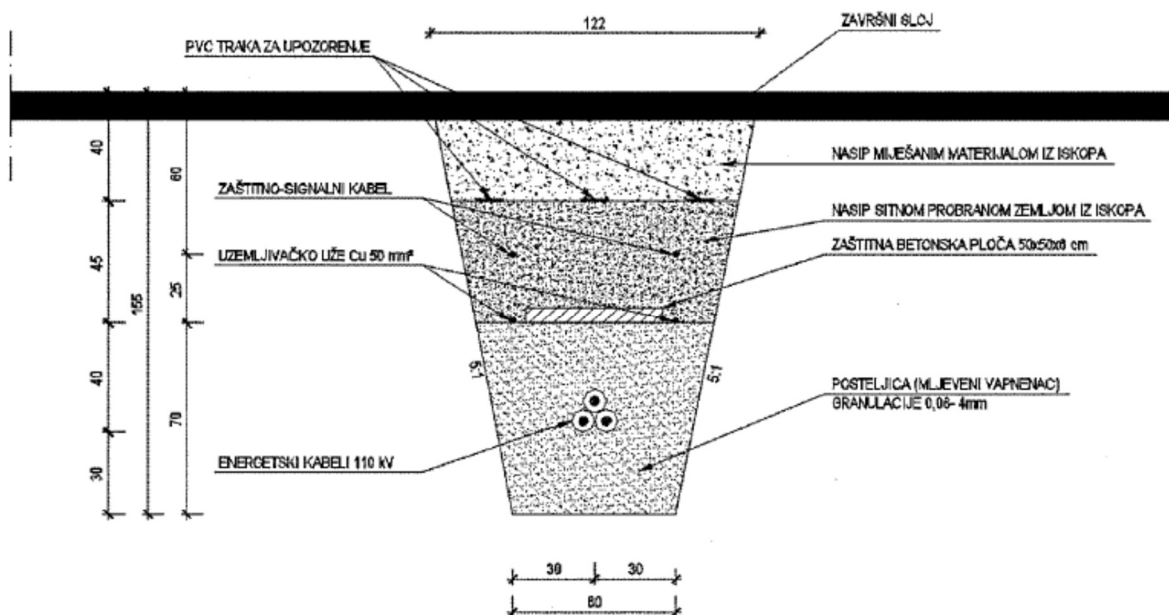
Tablica 9.4. Podaci za konkretan slučaj polaganja podzemnih kabela u Crikvenici

Duljina polaganja kabela u određenom geometrijskom rasporedu $l_k (m)$	Srednja geometrijska udaljenost osi kabela $s_k (m)$	Način i lokacija polaganja
820,69	0,0843	U trokut na dodir, polaganje u kablskoj posteljici
38,73	0,21	U vertikalnoj ravnini, u PEHD cijevima promjer 160 mm u betonu
292,83	0,30	U trokutu, u PEHD cijevima promjera 200 mm u betonu
14,20	0,50	U ravnini, za kablске spojnice
6,00	2,00	U ravnini, vertikalno polaganje ispod kablških završetaka

Tablica 9.5 Podaci za konkretan slučaj polaganja podzemnih kabela na otoku Krku

Duljina polaganja kabela u određenom geometrijskom rasporedu $l_k (m)$	Srednja geometrijska udaljenost osi kabela $s_k (m)$	Način i lokacija polaganja
233,00	0,0843	U trokutu na dodir, polaganje u kablskoj posteljici
4,20	0,50	U ravnini, za kablске spojnice
6,00	2,00	U ravnini, vertikalno polaganje ispod kablških završetaka

Proračun presjeka za prvi slučaj – podzemni kabel smješten u posteljici na slobodnim površinama

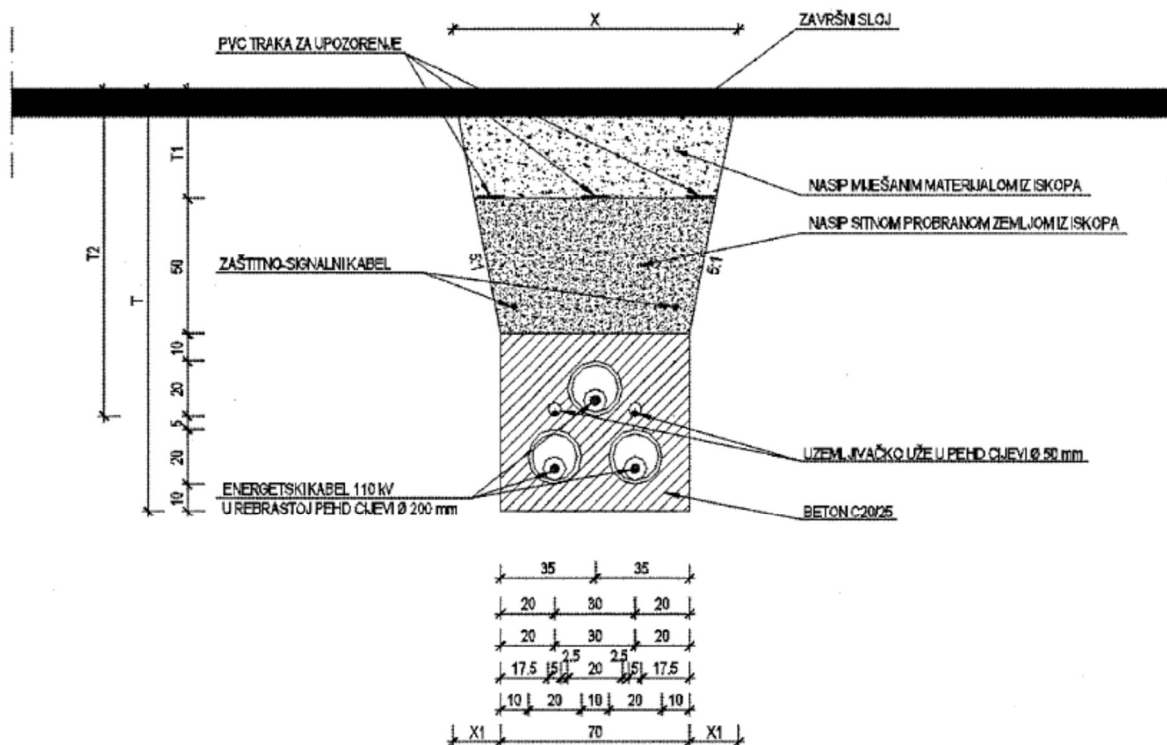


Slika 9.1: Poprečni presjek rova s podzemnim kabelima smještenim u posteljici na slobodnim površinama [7]

Tablica 9.6 Rezultati proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u posteljici na slobodnim površinama

KOEFICIJENT OPTEREĆENJA	1,0	0,85
Prijenosna moć	127 MVA	141 MVA
Fazna struja	666 A	741 A
Temperatura vodiča	90 °C	90 °C
Izmjenični otpor vodiča	$0,04046 \frac{\Omega}{km}$	$0,04056 \frac{\Omega}{km}$
Gubici kablenskog voda (sve tri faze)		
Vodiči	53,79 kW/km	66,83 kW/km
Zasloni (ekrani) kabela	35,24 kW/km	43,93 kW/km
Izolacija	0,19 kW/km	0,19 kW/km
Ukupni gubici kablenskog voda	89,22 kW/km	110,96 kW/km

Sljedeći slučaj je proračun podzemnih kabela smještenih u zaštitnim PHED cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku, a način polaganja kabela je prikazan na sljedećoj slici 9.2.

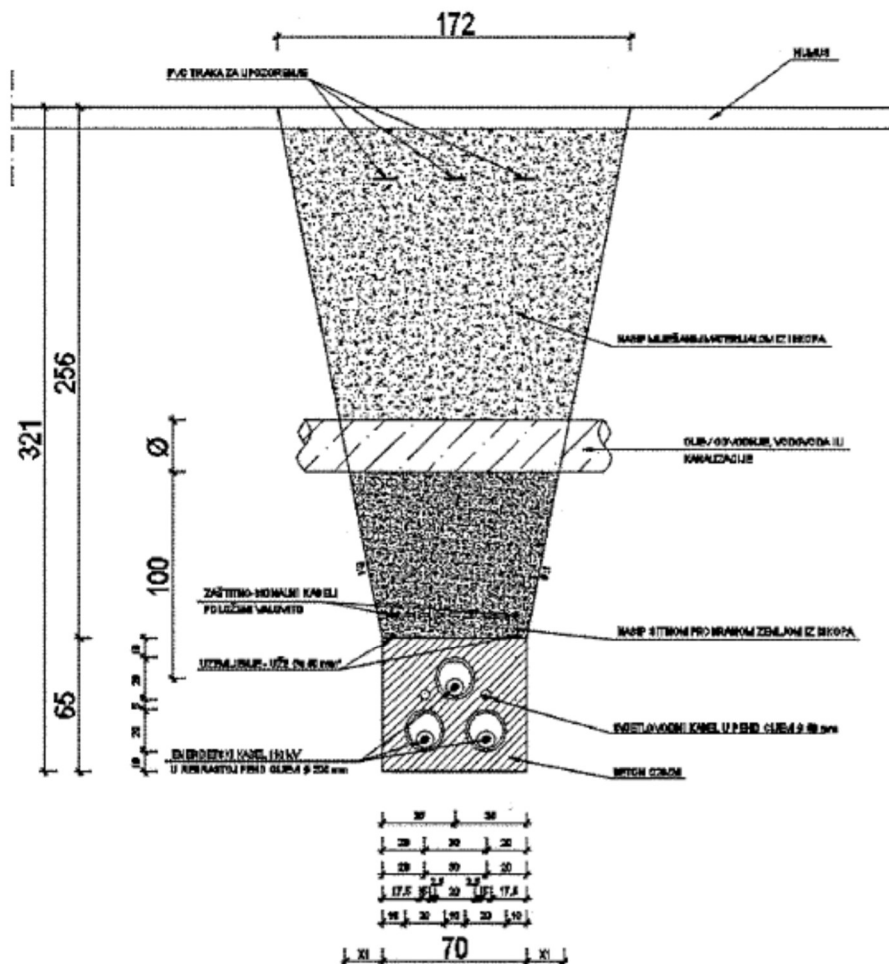


Slika 9.2: Poprečni presjek kabelskog rova s podzemnim kabelima smještenim u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku [7]

Tablica 9.7 Rezultati proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku

KOEFICIJENT OPTEREĆENJA	1,0	0,85
Prijenosna moć	134 MVA	146 MVA
Fazna struja	702 A	765 A
Temperatura vodiča	90 °C	90 °C
Izmjenični otpor vodiča	$0,0395 \frac{\Omega}{km}$	$0,0395 \frac{\Omega}{km}$
Gubici kabelskog voda (sve tri faze)		
Vodiči	58,30 kW/km	63,92 kW/km
Zasloni (ekrani) kabela	39,27 kW/km	46,81 kW/km
Izolacija	0,19 kW/km	0,19 kW/km
Ukupni gubici kabelskog voda	97,76 kW/km	116,32 kW/km

Podzemni kabeli smješteni u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku. Betonski blok je identičan onomu u prethodnom proračunu, ali je dublje ukopan na križanjima s drugim instalacijama.



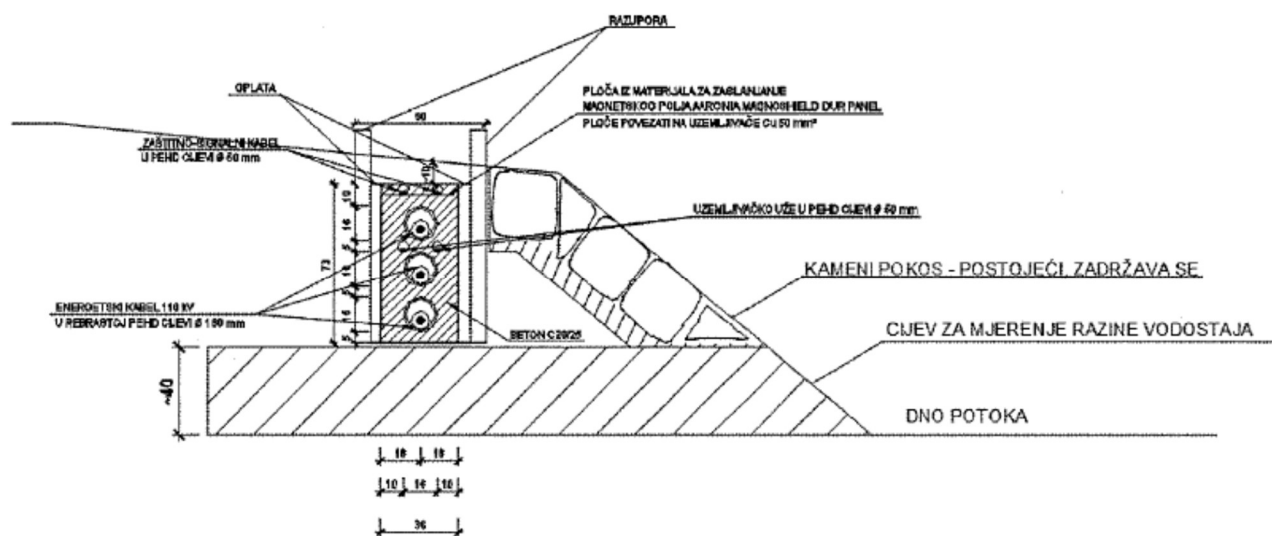
Slika 9.3: Poprečni presjek kablenskog rova s podzemnim kabelima smještenim u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku na točki najdublje smještenih kabela na križanju s evidentiranom instalacijom kanalizacije [7]

Tablica 9.8 Rezultati proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm

KOEFICIJENT OPTEREĆENJA	1,0	0,85
Prijenosna moć	122 MVA	134 MVA
Fazna struja	640 A	706 A
Temperatura vodiča	90 °C	90 °C
Izmjenični otpor vodiča	$0,0395 \frac{\Omega}{km}$	$0,0395 \frac{\Omega}{km}$
Gubici kablenskog voda (sve tri faze)		
Vodiči	48,54 kW/km	59,07 kW/km
Zasloni (ekrani) kabela	32,55 kW/km	39,72 kW/km
Izolacija	0,19 kW/km	0,19 kW/km

Ukupni gubici kablenskog voda	81,28 kW/km	98,98 kW/km
-------------------------------	-------------	-------------

Sljedeći proračun vezan je za podzemni kabel u zaštitnim PEHD cijevima promjera 160 mm u zaštitnom betonskom bloku



Slika 9.4: Poprečni presjek kablenskog rova s podzemnim kabelima smještenim u zaštitnim PEHD cijevima promjera 160 mm u zaštitnom betonskom bloku [7]

Tablica 9.9 Rezultati proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u zaštitnim PEHD cijevima promjera 160 mm u zaštitnom betonskom bloku

KOEFICIJENT OPTEREĆENJA	1,0	0,85
Prijenosna moć	138 MVA	149 MVA
Fazna struja	727 A	784 A
Temperatura vodiča	90 °C	90 °C
Izmjenični otpor vodiča	$0,0394 \frac{\Omega}{km}$	$0,0394 \frac{\Omega}{km}$
Gubici kablenskog voda (sve tri faze)		
Vodiči	62,31 kW/km	72,62 kW/km
Zasloni (ekrani) kabela	57,67 kW/km	57,28 kW/km
Izolacija	0,19 kW/km	0,19 kW/km
Ukupni gubici kablenskog voda	120,18 kW/km	140,09 kW/km

Sljedeći proračun je proračun vezan uz podmorski kabel u priobalnoj zaštiti iznad razine mora (cijev je ispunjena zrakom) smješten u PEHD cijevi

Tablica 9.10 Rezultati proračuna za podmorski kabel u priobalnoj zaštiti iznad razine mora smješten u PEHD cijevi

KOEFICJENT OPTEREĆENJA	1,0	0,85
Prijenosna moć	121 MVA	129 MVA
Fazna struja	635 A	678A
Temperatura vodiča	90 °C	90 °C
Izmjenični otpor vodiča	$0,04143 \frac{\Omega}{km}$	$0,04143 \frac{\Omega}{km}$
Gubici kablenskog voda (sve tri faze)		
Vodiči	50,10 kW/km	57,14 kW/km
Izolacija	0,16 kW/km	0,16 kW/km
Plast (legura olova)	16,51 kW/km	18,75 kW/km
Armatura (čelične žice)	25,90 kW/km	28,95 kW/km
Ukupni gubici kablenskog voda	152,86 kW/km	172,28 kW/km

Potrebno je još napraviti proračun za podmorski kabel položen slobodno na dnu mora između priobalnih zaštita. Radi konzervativnosti proračuna u proračunu je uzeto da se kabel nalazi na dubini od 20 cm u pijesku na dnu mora jer takav proračun predstavlja termički najnepovoljniju situaciju. Toplinska otpornost okolnog materijala sedimenta jednaka je 1,0 K m/W.

Tablica 9.11 Rezultati proračuna za podmorski kabel položen slobodno na dnu mora između priobalnih zaštita

KOEFICJENT OPTEREĆENJA	1,0	0,85
Prijenosna moć	179 MVA	190 MVA
Fazna struja	942 A	1000 A
Temperatura vodiča	90 °C	90 °C
Izmjenični otpor vodiča	$0,04144 \frac{\Omega}{km}$	$0,04144 \frac{\Omega}{km}$
Gubici kablenskog voda (sve tri faze)		
Vodiči	110,29 kW/km	124,42 kW/km
Izolacija	0,16 kW/km	0,16 kW/km
Plast (legura olova)	16,51 kW/km	18,75 kW/km
Armatura (čelične žice)	25,90 kW/km	28,95 kW/km
Ukupni gubici kablenskog voda	152,86 kW/km	172,28 kW/km

Tablica 9.12 Prikaz rezultata stacionarnih toplinskih proračuna

Slučaj proračuna	Koeficijent opterećenja 1,0		Koeficijent opterećenja 0,85	
	Prijenosna moć (MVA)	Struja opterećenja (A)	Prijenosna moć (MVA)	Struja opterećenja (A)
1. podzemni kabeli smješteni u posteljici na slobodnim površinama	127	666	141	741
2. podzemni kabeli smješteni u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200mm u zaštitnom betonskom bloku, dubina donjih kabela 1,3 m	134	702	146	765
3. podzemni kabeli smješteni u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200mm u zaštitnom betonskom bloku na najvećoj dubini na križanjima s drugim instalacijama, dubina donjih kabela 3,1 m	122	640	134	706
4. podzemni kabel smješten u zaštitnim PEHD cijevima promjera 160 mm u zaštitnom betonskom bloku	138	727	149	784
5. podmorski kabel u priobalnoj zaštiti iznad razine mora smješten u PEHD cijevi vanjskog promjera 450 mm	121	635	129	678
6. podmorski kabel položen slobodno na dno mora između priobalnih zaštita	179	942	190	1000

Vidljivo je da će u svim proračunima uz uvjet maksimalno dopuštene temperature vodiča trajna prijenosna moć s koeficijentom opterećenja 1,0 najmanje iznositi 121 MVA što zadovoljava traženu prijenosnu moć od 120 MVA. Također, prilikom koeficijenta opterećenje u iznosu od 0.85 odnosno 85% opterećenja maksimalne snage koja se pojavljuje u periodu od 24 sata prijenosna moć seže do iznosa od 129 MVA što znači da je sigurnost prijenosa tražene snage predmetnog kablenskog voda također zadovoljena.

10. Zaključak

Visokonaponski elektroenergetski podmorski kabeli mogu biti:

1. prema električnom sustavu prijenosa:
 - istosmjerni
 - izmjenični,
2. prema broju vodiča u konstrukciji
 - trožilni
 - jednožilni
3. prema vrsti konstrukcije (izolacije vodiča)
 - podmorski kabeli izolirani umreženim polietilenom (XLPE kabeli)
 - podmorski kabeli izolirani impregniranim papirom (MI kabeli – klasični)

Projektiranje podmorskih kabela je temeljni korak u inženjeru izgradnje podmorskih kabela. Ovaj proces uključuje detaljnu analizu i planiranje kako bi se osigurala optimalna trasa kabela, odabir odgovarajućih materijala i opreme, učinkovita organizacija postavljanja kabela te osiguranje sigurnosti i zaštite kabela tijekom i nakon instalacije.

Cjelokupni inženjering izgradnje podmorskog kabela sadrži slijedeće faze:

- preliminarnu (idejnu fazu)
- konceptualno projektiranje i dizajn u inženjeru i priprema tehničke dokumentacije
- detaljni proces inženjeringa podmorskih kabela i instalacije
- nakon instalacije – procjena instalacije i inženjering kao priprema za operativnu fazu

U prvoj, preliminarnoj odnosno idejnoj fazi određuje se idejna ruta i istražuje morsko dno. Preliminarna faza može biti osnova za odluku o ulaganju. Sljedeća je faza konceptualnog projektiranja i dizajna u inženjeru i pripreme tehničke dokumentacije prilikom koje se odrađuju detaljna istraživanja morskog dna i ruta se preciznije definira. Prilikom ove faze prikupljaju se suglasnosti i dozvole na temelju opisa instalacije projekta. Detaljni proces inženjeringa podmorskih kabela i instalacije potvrđuje brodove i alate koji će se koristiti, on čini osnovu za stvarne aktivnosti instalacije. Posljednja faza je faza nakon instalacije u kojoj dolazi do procjene

instalacije. U fazi nakon instalacije se provjerava jesu li kabeli dovoljno zaštićeni i jesu li rezervni dijelovi spremni u slučaju popravka kao i je li sve spremno za operativnu fazu.

Međunarodni standardi kao što su IEC, IEEE, i CIGRE preporuke igraju ključnu ulogu u usklađivanju s najnovijim normama i tehničkim smjericama u industriji. Ovi standardi pružaju smjernice za testiranje, kvalifikaciju i provjeru kvalitete kabela, kako bi se osiguralo da oni zadovoljavaju odgovarajuće tehničke i sigurnosne zahtjeve.

U konačnici, projektiranje podmorskih kabela zahtijeva multidisciplinarni pristup, suradnju različitih stručnjaka i pažljivu analizu kako bi se osigurala uspješna i pouzdana implementacija tijekom cjelokupnog životnog vijeka kabela.

Literatura

Knjige i poglavlja u knjigama:

- [1] B1 Tehnical brochure, Insulated cables, Instalation of Submarine Power Cables, Refrence: 883, Cigre, 2022.
- [2] Thomas Worzyk , Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects, Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [3] Handbook of Submarine Cables, U.S. Signal Corps, United States. Army. Signal Corps War Department
- [4] B1 Tehnical brochure, Insulated cables, Power Cable rating examples for calculation tool verification, Reference: 880, Cigre, 2022.
- [5] Submarine Power Cable Systems Design, Planning, and Implemetation Guide, IEEE PES NY Chapter, NYC September 18, 2018, LS Cable America
- [6] XPLE Submarine Cable Systems Attachment to XPLE Land Cable Systems – User's Guide , ABB
- [7] Izvedeni projekt – podmorski kabel 110 kV Crikvenica – otok Krk, Dalekovod projekt, Zagreb, 2016.

Sažetak i ključne riječi

Ovaj rad istražuje sveobuhvatno proučavanje podmorskih kabela, obuhvaćajući različite aspekte povezane s njihovim postavljanjem i održavanjem. Početna poglavlja fokusiraju se na regulatorne postupke i potrebne dozvole koje su potrebne za postavljanje podmorskih kabela, naglašavajući važnost dobivanja odgovarajućeg pristanka. Sljedeći dio raspravlja o postupku postavljanja, istražujući različite metodologije i tehnike koje se koriste za učinkovito i sigurno polaganje podmorskih kabela. Također se ističe značaj mjera zaštite kabela kako bi se osigurala dugotrajnost i trajnost. Rad također istražuje prakse istraživanja morskog dna, objašnjavajući važnost razumijevanja topografije i geologije morskog dna prije početka polaganja kabela. Temeljito se ispituju specijalizirani alati i oprema koji se koriste tijekom postavljanja i izgradnje. Sljedeća poglavlja dublje se bave fazom izvođenja, opisujući korake postupka postavljanja podmorskih kabela od početka do kraja. Također se rasvjetljuju sanacijski radovi koji su potrebni za održavanje i popravak podmorskih kabela, kako bi se osiguralo njihovo neprekidno i učinkovito funkcioniranje. Sveukupno, obuhvaća sveobuhvatan analitički pristup podmorskim elektroenergetskim kabelima, pružajući vrijedne uvide u planiranje, postavljanje i održavanje ovih ključnih komponenti suvremenih energetske sustava.

Ključne riječi: podmorski elektorenergetski kabel, projektiranje podmorskih kabela, zaštita kabela, polaganje kabela

Summary and key words

This paper delves into the comprehensive study of submarine cables, covering various aspects related to their deployment and maintenance. The initial chapters focus on the regulatory procedures and necessary permissions required for the installation of submarine cables, emphasizing the importance of obtaining proper consent. The subsequent section discusses the installation process, exploring the different methodologies and techniques employed in laying submarine cables effectively and securely. It also highlights the significance of cable protection measures to ensure longevity and durability. The paper then delves into seabed survey practices, elucidating the importance of understanding the seabed's topography and geology before commencing cable laying. Specialized tools and equipment used during installation and construction are also thoroughly examined. The following chapters delve into the execution phase, outlining the step-by-step process of installing submarine cables, from start to finish. Additionally, it sheds light on the remedial works necessary for the maintenance and repair of submarine cables, ensuring their continuous and efficient functioning. Overall, this paper encompasses a comprehensive analysis of submarine power cables, providing valuable insights into the planning, installation, and maintenance of these crucial components of modern energy systems.

Keywords: submarine power cable, submarine cable design, cable protection, cable laying.

Popis slika

REDNI BROJ	NASLOV SLIKE	STRANICA
2.1	Građa izmjeničnih kabela	2
2.2	Građa istosmjernih elektroenergetskih kabela	3
2.3	Presjeci vodiča podmorskih kabela	4
2.4	Presjek jednožilnog kabela	6
2.5	Prikaz promatranog trožilnog kabela i njegova svojstva	6
5.1	Faze inženjerskog projekta	32
5.2	Opća klasifikacija vrsta pokretnog morskog dna	38
5.3	Završni spoj kabela u obliku omega	41
5.4	Nezaštićeni kabel položen na morskom dnu	42
5.5	J – cijev i raspored kabela	44
5.6	Primjer polaganja kabela iznad elementa treće strane	46
5.7	Postavljanje kabela s odvajanjem stijenom od elementa treće strane	46
5.8	Polaganje kabela uz pomoć madraca	47
5.9	Obuhvat prijelazne konstrukcije oko kabela – zaštitni kameni sloj preko kabela Obuhvat prijelazne konstrukcije oko kabela – zaštitni kameni sloj preko kabela	47
5.10	Sustav separatora prijelazne konstrukcije oko kabela – zaštitni kameni sloj preko cijevi	48
5.11	Sustav separatora prijelazne konstrukcije oko kabela – zaštitni kameni sloj preko kabela	48
7.1	Primjer jedinice za grabljenje stijena	57
7.2	Teglenica za polaganje kabela (CBL)	60
7.3	Alat za mlazni ukop	61
7.4	ROV alat za mlaz vode	62
7.5	Oprema za plug na kopnu	63
7.6	Postavljanje kamenog pokrova s fleksibilnim crijevom	64
7.7	Kabel s ljuskom od lijevanog željeza i instalacija ljuske od lijevanog željeza na kabel (uz nepoštivanje današnjih sigurnosnih mjera)	65
7.8	Prikaz kabela s betonskim (blok) madracem	66
7.9	Vreće s kamenjem i njihovo polaganje na kabel	67
7.10	Polimerni oklop za zaštitu kabela	67
8.1	Polaganje kabela	72
8.2	Prikaz in- line spoja	73
8.3	Prikaz završnog spoja	74
9.1	Poprečni presjek rova s podzemnim kabelima smještenim u posteljici na slobodnim površinama	80
9.2	Poprečni presjek kabelskog rova s podzemnim kabelima smještenim u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku	81
9.3	Poprečni presjek kabelskog rova s podzemnim kabelima smještenim u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku na točki najdublje smještenih kabela na križanju s evidentiranom instalacijom kanalizacije	82

9.4	Poprečni presjek kabelskog rova s podzemnim kabelima smještenim u zaštitnim PEHD cijevima promjera 160 mm u zaštitnom betonskom bloku	83
-----	---	----

Popis tablica

REDNI BROJ	NASLOV TABLICE	STRANICA
3.1.	Rezultati iteracije	25
9.1	Ulazni podaci za odabrani podmorski kabel	77
9.2	Podaci za podzemni kabel	78
9.3	Iznosi toplinske otpornosti materijala korištenih u proračunima, osim toplinske otpornosti samog tla	78
9.4.	Podaci za konkretan slučaj polaganja podzemnih kabela u Crikvenici	79
9.5	Podaci za konkretan slučaj polaganja podzemnih kabela na otoku Krku	79
9.6	Rezultati proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u posteljici na slobodnim površinama	80
9.7	Rezultati proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm u zaštitnom betonskom bloku	81
9.8	Rezultati proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u zaštitnim PEHD cijevima promjera 200 mm	82
9.9	Rezultati proračuna proračuna za slučaj podzemnih kabela smještenih u zaštitnim PEHD cijevima promjera 160 mm u zaštitnom betonskom bloku	83
9.10	Rezultati proračuna za podmorski kabel u priobalnoj zaštiti iznad razine mora smješten u PEHD cijevi	84
9.11	Rezultati proračuna za podmorski kabel položen slobodno na dnu mora između priobalnih zaštita	84
9.12	Prikaz rezultata stacionarnih toplinskih proračuna	85