

Prof. dr. sc. Marko Pršić, dipl. ing. građ.

# POMORSKE GRAĐEVINE

Pogl 2 Podmorski cjevovodi

6.3.2013.

---

Predmet: HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE

Studij: Diplomski

Smjer: Hidrotehnički

Semestar: IV.

Fond sati: 30+30

Na uređenju sudjelovali demonstratori: Tomislav Šalamun, Damir Mujkanović

Sadržaj:

1	DETALJNO PROJEKTIRANJE LUKOBRANA .....	1
2	PODMORSKI CJEVOVODI .....	2
2.1	CIJEVI ZA PODMORSKE CJEVOVODE.....	2
2.1.1	Tipovi cijevi .....	2
2.1.1.1	Čelične cijevi.....	2
2.1.1.2	Fleksibilne cijevi.....	4
2.1.2	Antikorozivna zaštita.....	7
2.1.3	Nastavljanje cijevi .....	9
2.2	DJELOVANJA NA PODMORSKI CJEVOVOD .....	12
2.2.1	Stalna djelovanja na podmorski cjevovod .....	12
2.2.2	Promjenjiva djelovanja na podmorski cjevovod.....	12
2.2.2.1	Hidrodinamičke sile na vitki fiksni podmorski horizontalni valjak od djelovanja morske struje i valova.....	12
2.2.2.1.1	Sile na podmorski vitki fiksni podmorski horizontalni valjak od stacionarne morske struje	13
2.2.2.1.2	Sile na podmorski vitki fiksni podmorski horizontalni valjak od nestacionarne morske struje	17
2.2.2.1.3	Sile na podmorski horizontalni valjak od nestacionarnih gibanja vodnih čestica uzrokovanih idealnim (pravilnim) morskim valovima .....	19
2.2.2.1.3.1	Sile otpora i inercije na podmorski horizontalni valjak uslijed nestacionarnih gibanja vodnih čestica pobuđenih valovima.....	22
2.2.2.1.3.2	Sila hidrodinamičkog uzgona na podmorski horizontalni valjak uslijed nestacionarnih gibanja vodnih čestica pobuđenih valovima .....	25
2.2.2.1.4	Sile na podmorski cjevovod položen na morsko dno od istovremenog djelovanja stacionarne morske struje i nestacionarnih gibanja vodnih čestica pobuđenih valovima.....	26
2.2.2.1.4.1	Utjecaj pridnenih brzina gibanja vodnih čestica pobuđenih morskom strujom i valovima na cjevovod .....	26
2.2.2.1.4.2	Interakcija valova i morske struje .....	28
2.2.2.1.4.3	Koeficijenti sila (otpora $C_D$ , inercije $C_I$ , hidrodinamičkog uzgona $C_L$ ).....	29

2.2.2.1.4.4	Klasifikacija sila od stacionarne struje i valova koje djeluju na podmorski cjevovod	34
2.2.2.2	Hidrostatske i hidrodinamičke sile na vertikalno koljeno podmorskog cjevovoda	36
2.2.3	Potresna djelovanja na podmorski cjevovod (EN 1998-4:2006 (E))	36
2.3	STABILNOST PODMORSKOG CJEVOVODA NA MORSKOM DNU	39
2.2.9	Proračun stabilnost cijevi na morskom dnu	39
2.2.9.1	Provjera sigurnosti protiv klizanja	40
2.2.9.2	Provjera sigurnosti protiv isplivavanja	44
2.2.9.3	Provjera sigurnosti protiv prevrtanja	45
2.3	POLAGANJE PODMORSKIH CJEVOVODA	47
2.3.1	Metode polaganja cjevovoda	47
2.3.1.1	Uvod	47
2.3.1.2	Metoda S – polaganja	47
2.3.1.3	Metoda J – polaganja	48
2.3.1.5	Površinski tegalj Pitati Čorića za korištenje!	50
2.3.1.6	Tegalj ispod površine	51
2.3.1.7	Tegalj iznad dna	51
2.3.1.8	Tegalj po dnu	52
2.3.1.9	Kontrolirana ravnoteža Pitati Čorića za korištenje!	52
2.3.2	Kontrola naprezanja	53
2.3.2.1	Metoda nosača (mala progibanja)	58
2.3.2.2	Nelinearna metoda nosača	59
2.3.2.3	Metoda lančanice	60
2.3.2.5	Metoda konačnih elemenata	61
2.3.2.6	Zakrivljenost cijevi u području savijanja pri dnu	62
2.3.2.6.1	Metoda lančanice	62
2.3.2.6.2	Hidrostatski tlak	64
2.3.2.6.3	Zahtjevi normi	65
2.3.3.	Zaštita cjevovoda: ukopavanje i pokrivanje kamenom	67
3	HIDRAULIČKI PRORAČUN BRODSKE PREVODNICE	74

# 1 DETALJNO PROJEKTIRANJE LUKOBRANA

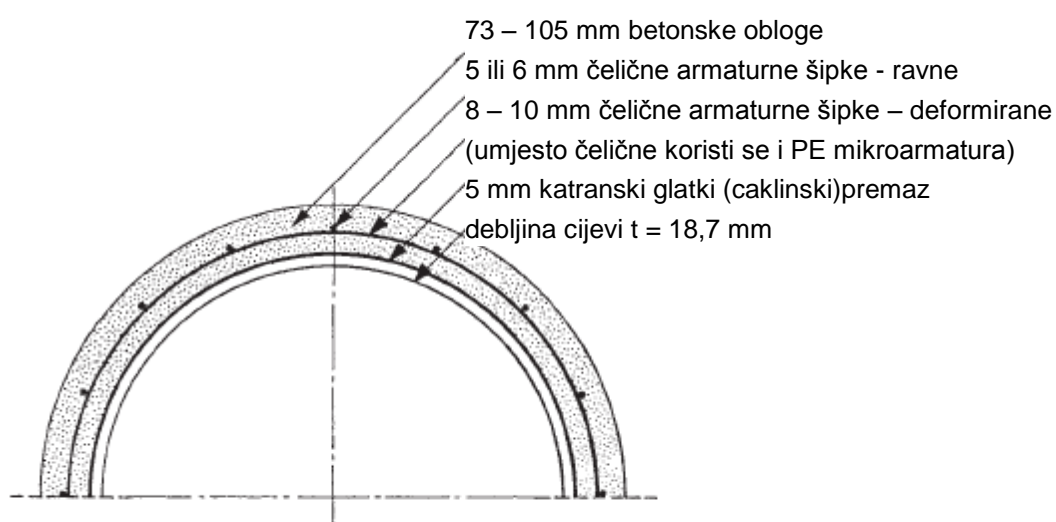
## 2 PODMORSKI CJEVOVODI

### 2.1 CIJEVI ZA PODMORSKE CJEVOVODE

#### 2.1.1 Tipovi cijevi

##### 2.1.1.1 Čelične cijevi

Tipičan poprečni presjek obložene čelične cijevi prikazan je na slici 2.1.1.1::1.



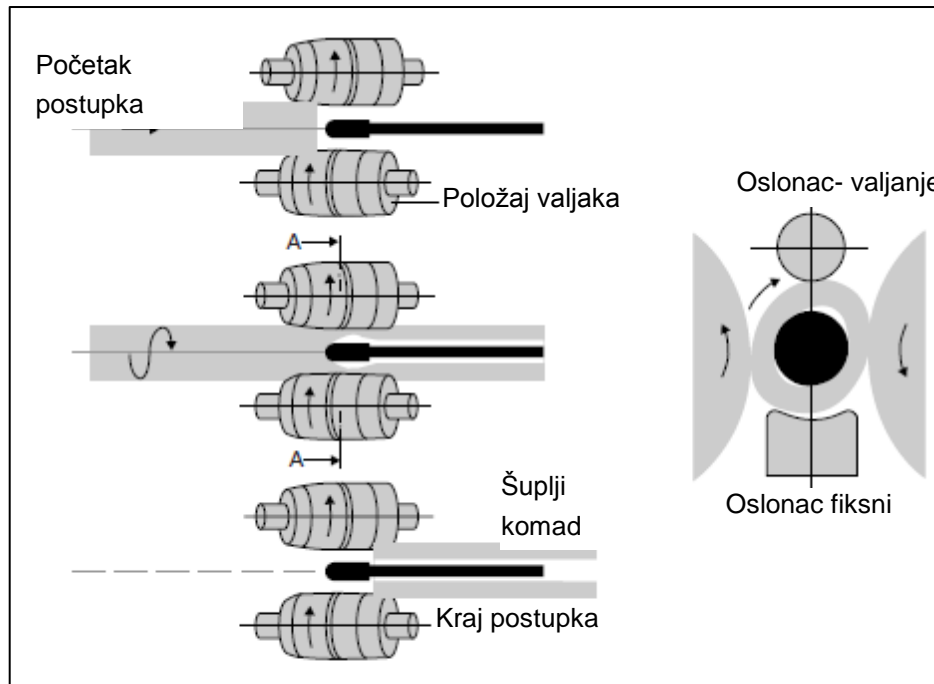
Sl. 2.1.1.1::1 Tipičan poprečni presjek obložene cijevi

Postoje međunarodni standardi (norme) koji definiraju svojstva čeličnih cijevi za primjenu u izvedbi cjevovoda. Najčešće su u uporabi američki standard API 5 L, njemačke norme DIN 17 172, norveške norme DnV-OS-F101 i u zadnje vrijeme EN 10208.

Općenito se proizvode sljedeći tipovi čeličnih cijevi:

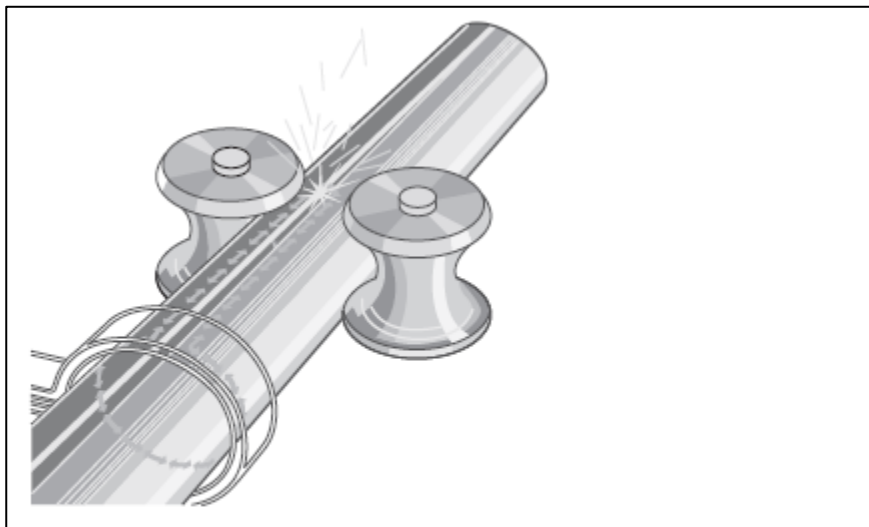
- bešavne cijevi (S),
- cijevi zavarene postupkom s visokofrekventnom strujom (HFW),
- cijevi uzdužno zavarene postupkom lučno zavarivanje pod zaštitom plina (SAWL),
- cijevi spiralno zavarene postupkom lučno zavarivanje pod zaštitom plina (SAWH).

Bešavne cijevi proizvode se nekim od postupaka valjanja. Na slici 2.1.1.1::2 prikazan je jedan od postupaka.



Sl. 2.1.1.1::2 Shematski prikaz valjanja

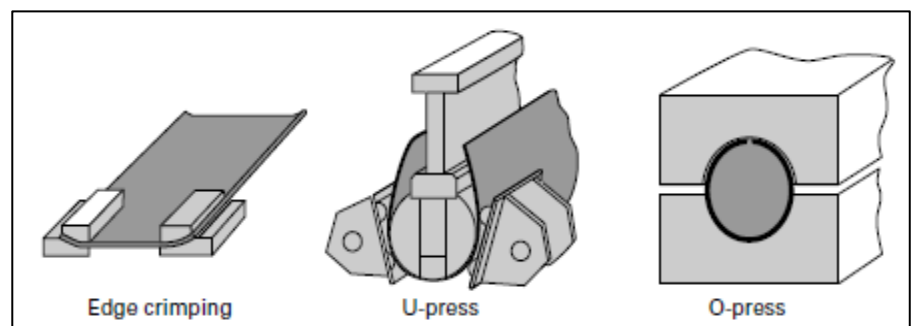
Na slici 2.1.1.1::3 prikazan je postupak proizvodnje zavarene cijevi s visokofrekventnom strujom.



Sl. 2.1.1.1::3 Zavarivanje s visokofrekventnom strujom

Cijevi uzdužno zavarene postupkom lučno zavarivanje pod zaštitom plina (SAWL) i postupak njihovog savijanja prikazani su na slici 2.1.1.1::4.

Sl. 2.1.1.1::4 Postupak formiranja cijevi



Sl. 2.1.1.1::5 ilustrira postupak proizvodnje cijevi spiralno zavarene postupkom lučno zavarivanje pod zaštitom plina (SAWH).



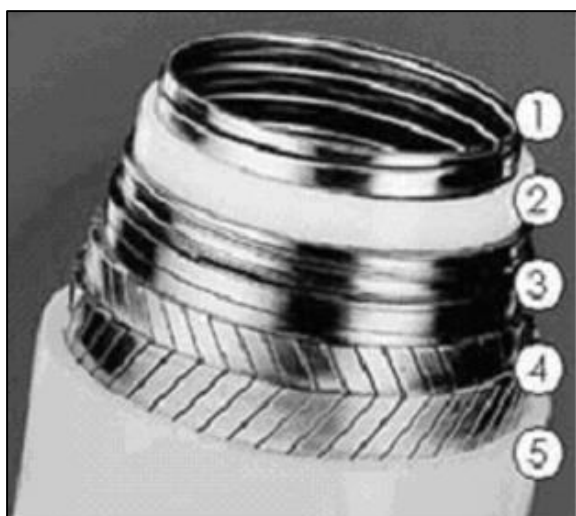
Sl. 2.1.1.1.:5 Spiralno zavarene cijevi

U tablici 2.1.1.1.:1 prikazana su mehanička svojstva čeličnih cijevi prema ISO 3183-3.

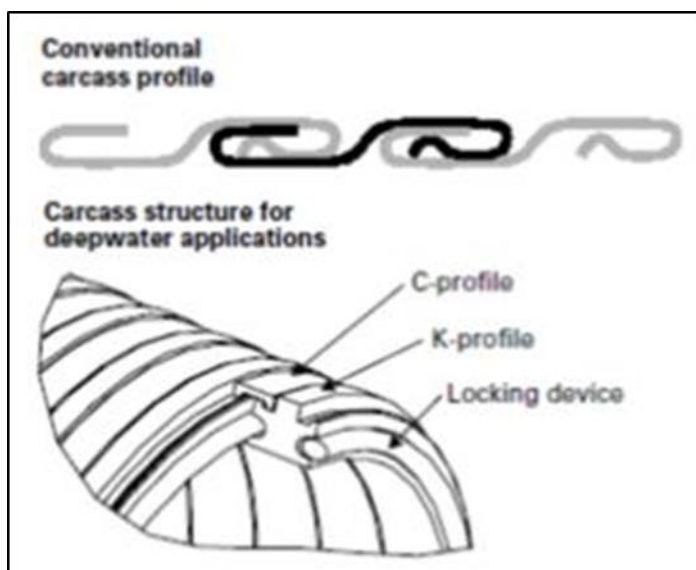
Steel name	Pipe body (seamless and welded pipes $\leq 25$ mm WT)			Weld seam HFW and SAW	
	Yield strength, $R_{10.5}$ (MPa)	Tensile strength, $R_m$ (MPa) minimum	Ratio, $R_{10.5}/R_m$ maximum	Elongation, $A$ (%)	Tensile strength, $R_m$ (MPa) minimum
L245	245–440	415	0.90	22	415
L290	290–440	415	0.90	21	415
L360	360–510	460	0.90	20	460
L415	415–565	520	0.92	18	520
L450	450–570	535	0.92	18	535
L485	485–605	570	0.92	18	570
L555	555–675	625	0.92	18	625

Tablica 2.1.1.1.:1 Zahtijevana mehanička svojstva čeličnih cijevi prema ISO 3183-3

### 2.1.1.2 Fleksibilne cijevi



Sl. 2.1.1.2.:1 Savitljiva cijev



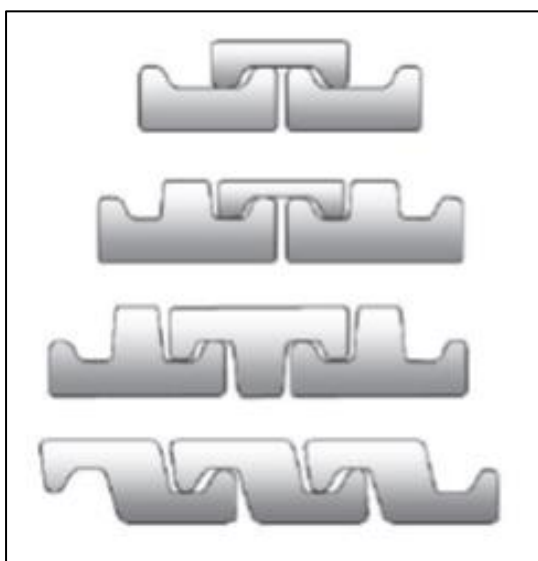
Sl. 2.1.1.2.:2 Tipična struktura trupa

Ovaj tip cijevi karakterizira mala krutost na savijanje uz visoku uzdužnu vlačnu krutost. Ova svojstva postignuta su izvedbom spregnutih stijenki cijevi kombinirajući polimerne brtvene slojeve i spiralno namotane metalne profile, vidi sliku 2.1.1.2::1. Navodi se sljedeći opis materijala svakog od slojeva:

Sloj 1: Trup (kostur). Izveden iz spiralno namotane međusobno povezane strukture izvedene iz metalnih traka. Sprječava kolaps unutarnje blazinice i pruža mehanički zaštitu od alata za čišćenje cijevi i abrazivnih čestica.

Sloj 2: Unutarnja blazinica. To je vučeni polimerni sloj koji omeđuje unutarnji integritet fluida.

Sloj 3: Tlačni omotač. Sastoji se od brojnih konstrukcijskih slojeva izvedenih iz spiralno namotanih metalnih elemenata C oblika. Pružaju otpornost radijalnom opterećenju.



Sloj 4: Vlačni omotač. Pruža otpornost uzdužnim vlačnim opterećenjima. Izveden je od brojnih konstrukcijskih slojeva izvedenih iz spiralno namotanih metalnih traka.

Sloj 5: Vanjska obloga. Izvodi se iz vučenih polimernih slojeva. Štiti konstrukcijske cijevne elemente od vanjskog okruženja i pruža mehaničku zaštitu. Slike 2.1.1.2::2 i 2.1.1.2::3 ilustriraju neke od slojeva koji se rabe kod izvedbe fleksibilnih cijevi.

Sl. 2.1.1.2::3 Tipični tlačni omotač



Sl. 2.1.1.3::1 Polietilenske cijevi velike gustoće

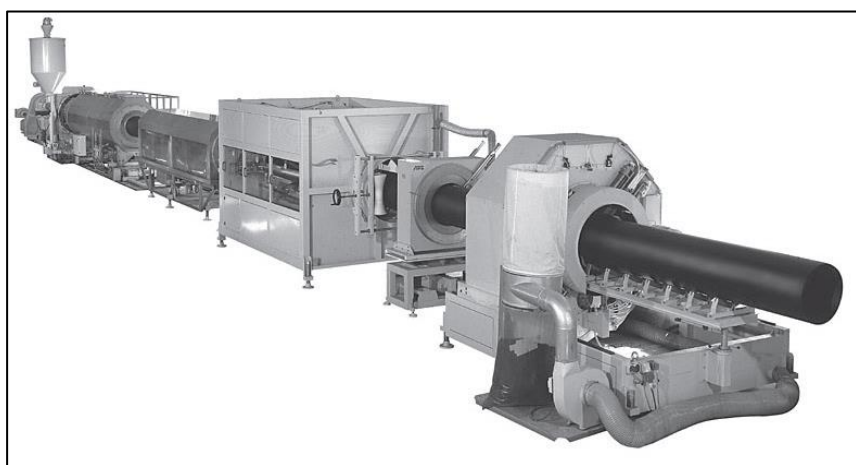


Fizikalna, mehanička, kemijska svojstva kao i karakteristike ponašanja materijala korištenih za izradu fleksibilnih cijevi potrebno je dokazati odgovarajućim ispitivanjima.

Vrlo učestalu primjenu u izvedbi podmorskih cjevovoda imaju cijevi proizvedene iz plastičnih masa, Sl. 2.1.1.3::1:

- PE - polietilenske cijevi (manjih poprečnih presjeka na kolutu),
- PEHD – polietilenske cijevi velike gustoće (većih poprečnih presjeka, izvedene u ravnim dijelovima koji se nastavljaju zavarivanjem).

Cijevi se proizvode u postrojenju prikazanom na slici 2.1.1.3::2.



Sl. 2.1.1.3::2 Tipična linija proizvodnje plastičnih cijevi

<b>HPPE</b> <i>High-performance polyethylene</i>	$MRS = 10 \text{ MPa}$ $E_0 = 1050 \text{ N/mm}^2$ $E_R \approx E_0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ $\sigma_y = 23 - 25 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_0 \geq 16 \text{ N/mm}^2$ $\nu = 0.4 - 0.5$
<b>PE-HD</b> <i>High-density polyethylene</i>	$MRS = 8 \text{ MPa}$ $E_0 = 800 - 1050 \text{ N/mm}^2$ $E_R \approx E_0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ $\sigma_y = 21 - 24 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_0 \geq 16 \text{ N/mm}^2$ $\nu = 0.4 - 0.5$
<b>PE-MD</b> <i>Medium-density polyethylene</i>	$MRS = 8 \text{ MPa}$ $E_0 = 750 - 850 \text{ N/mm}^2$ $E_R \approx E_0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ $\sigma_y = 19 - 22 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_0 \geq 15 \text{ N/mm}^2$ $\nu = 0.4 - 0.5$

Tab. 2.1.1.3::I Bitna mehanička svojstva plastičnih cijevi za kratkotrajna naprezanja pri temperaturi 20°C

gdje je:

- $E_0$  Youngov modul,  $t = 0$ ,  
 $E_c$  modul puzanja,  $t > 0$ ,  $\sigma > 0$  i konstantni,  
 $E_R$  modul relaksacije,  $t > 0$ ,  $\varepsilon > 0$  i konstantni,  
 $\sigma_y$  granica popuštanja,  
 $\sigma_0$  računsko naprezanja za vrijeme  $t = 0$ ,  
 $\sigma_c$  čvrstoća puzanja za  $t > 0$ ,  
 $\nu$  Poissonov broj.

Mehanička svojstva bitna su iz 2 aspekta: kratkotrajnog naprezanja (polaganje odnosno potapanje cjevovoda u vremenu od nule do oko jedan sat) i dugotrajnog naprezanja (u eksploataciji od jednog sata do 100 i više godina). Za ilustraciju navedena su u Tab. 2.1.1.3.:I njihova bitna mehanička svojstva za kratkotrajnu situaciju pri temperaturi 20°C za različite plastične materijale.

## 2.1.2 Antikorozivna zaštita

Boje i materijali za premaze primjenjuju se na cjevovode i njegove komponente u sljedeće svrhe:

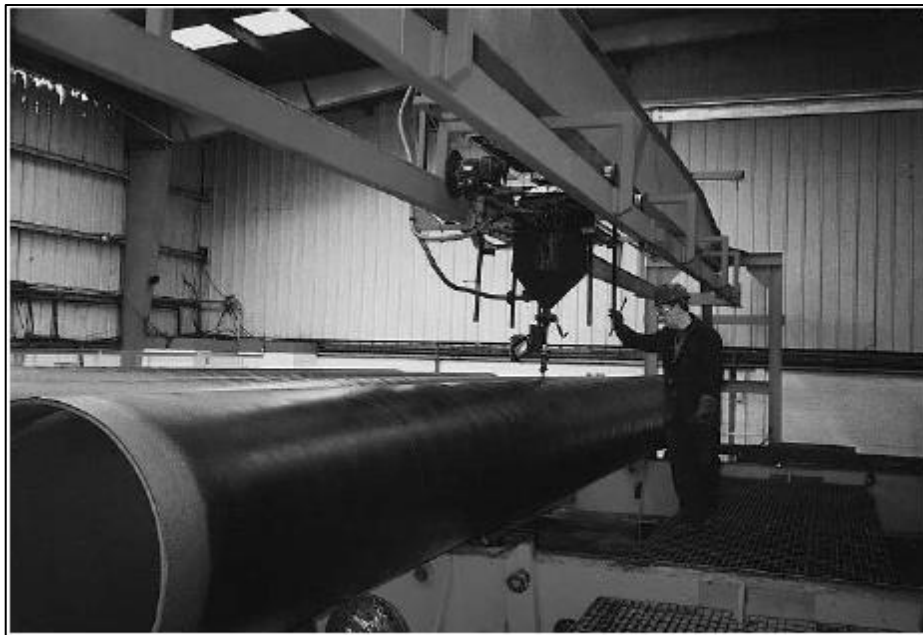
- redukcije unutarnjeg otpora (trenja),
- vanjske zaštite od korozije,
- toplinske izolacije,
- betonska obloga kao opteživač,
- premazivanje priključaka prilikom nastavljanja cijevi.

Materijali koji se rabe za premazivanje (oblaganje) i izolaciju cjevovoda općenito su karakterizirani svojom gustoćom i toplinskom provodljivošću. Neke tipične vrijednosti dane su u tablici 2.1.2.:I.

Material	Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal conductivity, $k$ (W/m°C)
Linepipe steel	7850	45
Seabed soil	1500–2400	1.2–2.7
Concrete coating	1900–3800	1.5
High density polyolefins	Variable	0.43
Fusion bonded epoxy	1500	0.3
Polychloroprene	1450	0.27
Solid polyolefins	900	0.12–0.22
Asphalt enamel	1300	0.16
Syntactic foams	Variable	0.1–0.2
Alumina silicate microspheres	Variable	0.1
Polyolefin foams	Variable	0.039–0.175

Tablica 2.1.2.:I Tipični parametri materijala za antikorozivne premaze

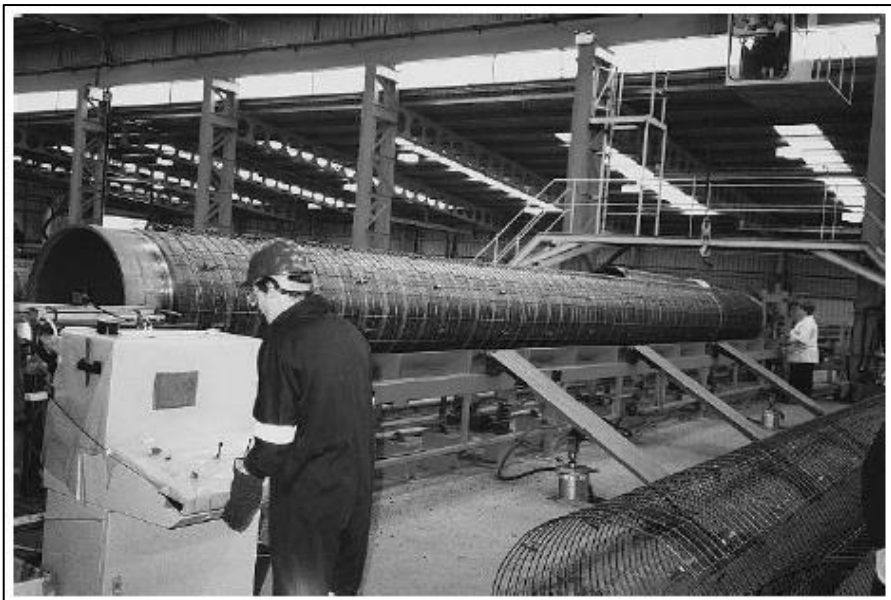
Na sljedećim slikama prikazani su neki od postupaka zaštite cijevi.



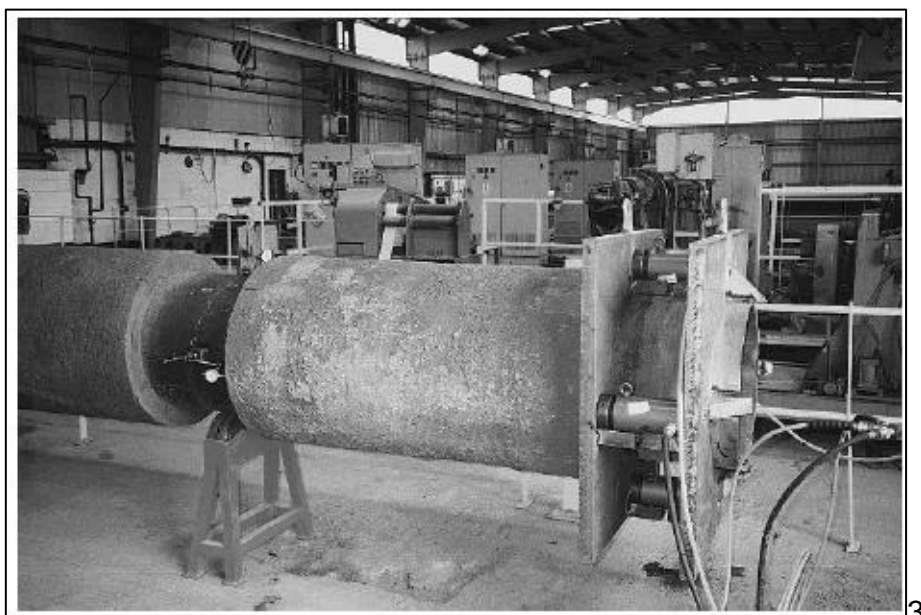
Sl. 2.1.2.:1 Nanašanje bitumenskog premaza na zavarenu cijev



Sl. 2.1.2.:2 Omatanje bitumeniziranim trakama



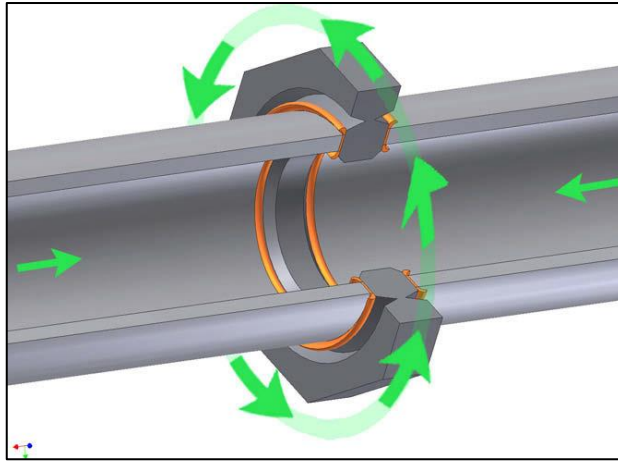
Sl. 2.1.2::3 Ugradnja spiralnog armaturnog koša na cijev prethodno zaštićenu bitumenskim premazom



Sl. 2.1.2::4 Betonom obložena cijev

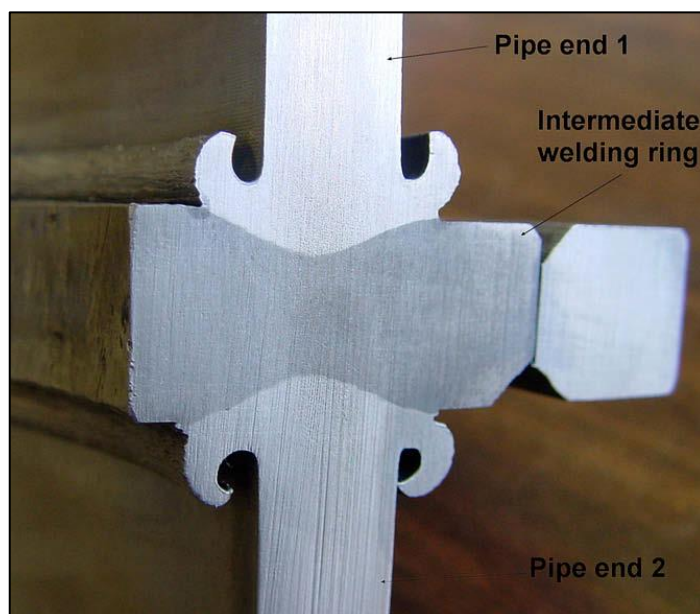
### 2.1.3 Nastavljanje cijevi

Cijevi se međusobno nastavljaju zavarivanjem. Izvode se sučelni spojevi po čitavom opsegu cijevi. Zahtijevaju se vrlo strogi uvjeti za postupke zavarivanja, dodatne materijale, kvalifikacije zavarivača kao i provedbu kontrole i ispitivanja prije, za vrijeme i nakon zavarivanja. Na Sl. 2.1.3::1 dan je princip novog postupka zavarivanja.



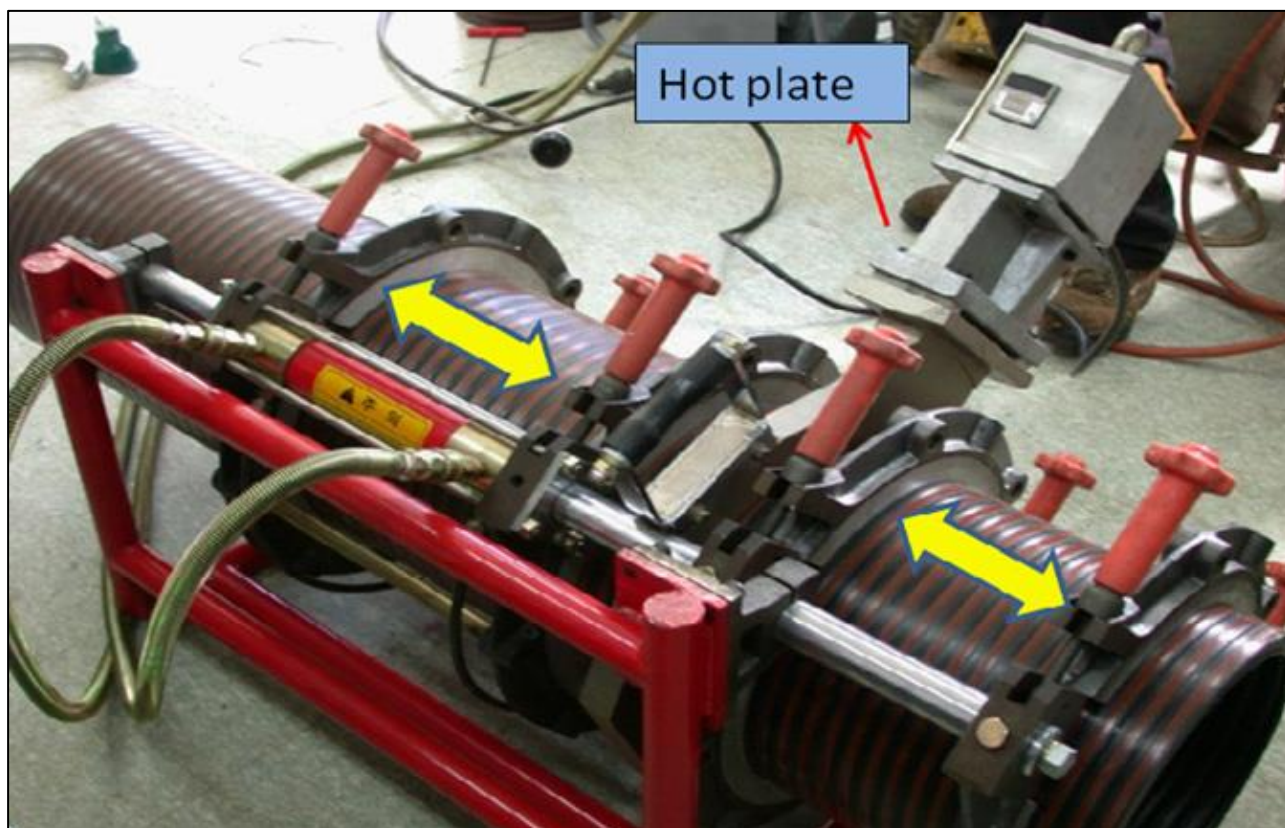
Sl. 2.1.3::1 Princip zavarivanja

U ovom slučaju dodatni materijal je prsten odgovarajuće kvalitete materijala. Ovaj prsten je smješten između cijevi koje se zavaruju. Prsten se rotira i izložen je uzdužnom tlaku koji se unosi preko krajeva cijevi. Uslijed rotiranja i uzdužnog tlaka prouzrokuje se trenje i pridruženo zagrijavanje materijala. Nakon dovođenja komponenata u kontakt, trenje između njih se povećava i uzdužna sila se povećava sve do konačne sile spajanja (forging force – sile kovanja). Praktično, spajanje je ostvareno koristeći „eksplozijsku“ silu (ili hidraulički ili pneumatski). Nakon zavarivanja, preostali istisnuti materijal se uklanja koristeći automatizirane glodalice, Sl. 2.1.3::2.



Sl. 2.1.3::2 Zavarivanje cijevi debljine stjenke 8,5 mm

Također se i plastične cijevi mogu nastavljati zavarivanjem. Sl. 2.1.3::3 prikazuje zavarivanje plastične cijevi.



Sl. 2.1.3::3 Zavarivanje plastične cijevi

## 2.2 DJELOVANJA NA PODMORSKI CJEVOVOD

Djelovanja na podmorski cjevovod u ovom prikazu su:

- **stalna** od djelovanja gravitacije na okolnu vodu, masu cijevi i masu sadržaja u njoj,
- **promjenjiva** od djelovanja struja i valova na cijev, kao i od tečenja sadržaja cijevi kroz cijev te
- **potresna** od djelovanja potresnog ubrzanja na masu cijevi i masu sadržaja u njoj.

U pravilu se izražavaju kao sile na 1m' cjevovoda.

### 2.2.1 Stalna djelovanja na podmorski cjevovod

**Vlastitu težinu  $G[N/m']$**  čini vlastita težina cijevi, težina obloge cijevi, težina opteživača i težina tekućine koja se kroz cijev transportira (uglavnom nafta, voda, plin). Od slučaja do slučaja obloge i opteživači su u alternaciji.

**Hidrostatski uzgon  $U[N/m']$**  odgovara vanjskom volumenu cijevi.

### 2.2.2 Promjenjiva djelovanja na podmorski cjevovod

#### 2.2.2.1 Hidrodinamičke sile na vitki fiksni podmorski horizontalni valjak od djelovanja morske struje i valova

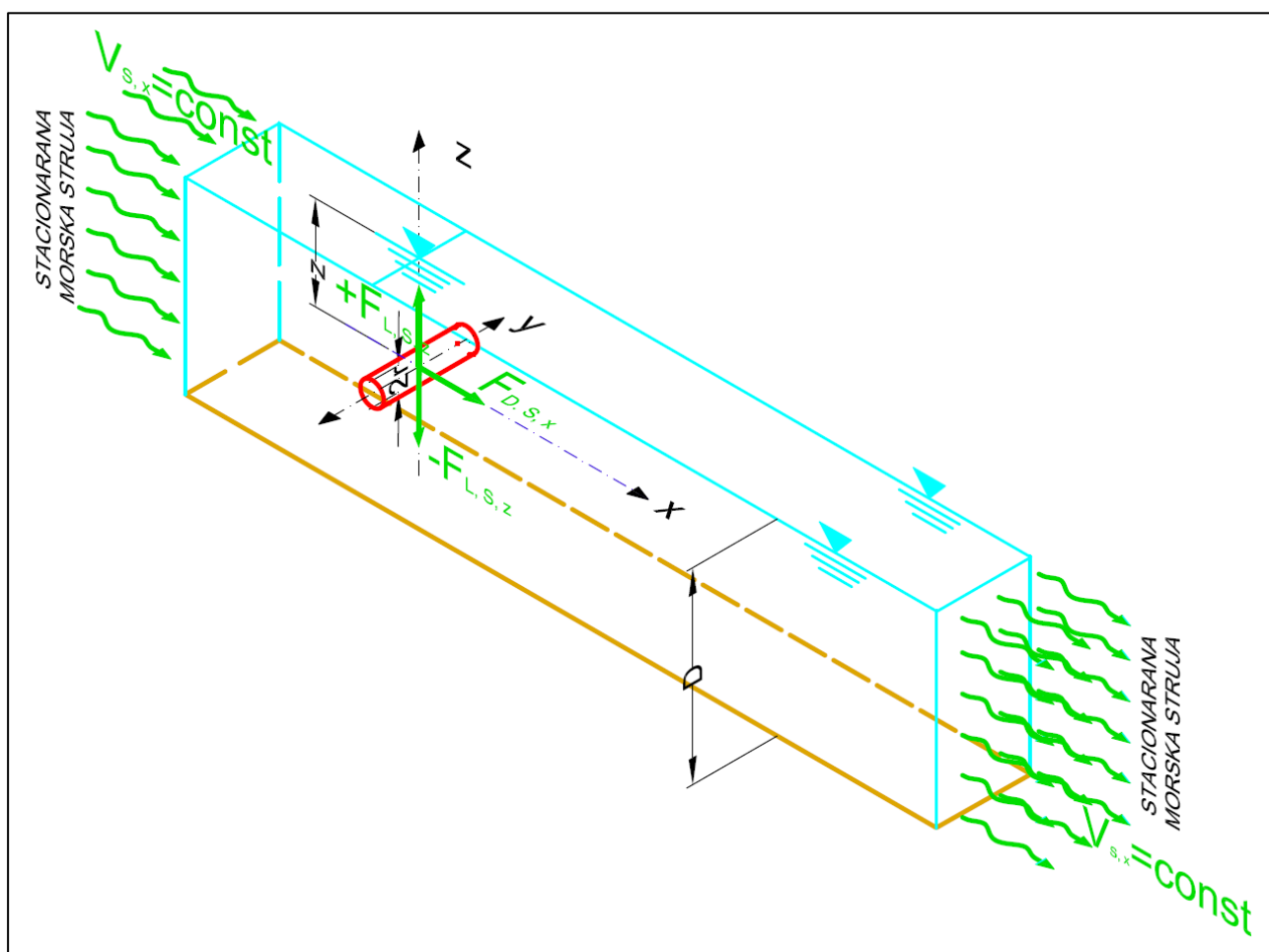
Hidrodinamičke sile se izvode iz dviju teorija. Sila otpora  $F_D$  i sila hidrodinamičkog uzgona  $F_L$  od stacionarne brzine morske struje  $V_s$  i nestacionarne brzine morskih valova  $v(t)$  izvode se iz Prandtlove teorije. Sila inercije  $F_I$  od ubrzanja vodnih čestica „a“ uzrokovanih pravilnim morskim valovima iz Morisonove teorije. Ovo poglavlje je teorijski vezano uz poglavlje o maritimnom opterećenju pilota; t. j. objašnjena za horizontalni valjak vrijede i za vertikalni samo što je su koeficijenti sila za vertikalni valjak drukčiji nego li za horizontalni.

Model za teorijski opis fizike djelovanja struje i valova, odnosno od tog djelovanja nastalog hidrodinamičkog opterećenja, na podmorski cjevovod je 2D vitki fiksni podmorski uronjeni horizontalni valjak okomit na vertikalnu ravninu X,Z (Sl. 2.2.2.1.1::1 i Sl. 2.2.2.1.3::1). Hidrodinamičko opterećenje uzrokovano je opstrujavanjem valjka vodnim česticama pobuđeno morskom strujom i morskim valovima, a ovdje se prikazuje kao vektorski zbroj niza vlastitih komponenti od kojih svaka ima druge fizikalne mehanizme nastanka. U modelu na valjak djeluje 2D gibanje vodnih čestica u toj ravnini uzrokovano stacionarnom morskom strujom, te nestacionarnim gibanjima vodnih čestica uzrokovanim idealnim (pravilnim) morskim valovima. Gibanja vodnih čestica uzrokovani valovima definirana su

prema linearnoj (Airy-evoj) valnoj teoriji za koju se većina autora slaže da se za izračun sila od valova na horizontalni cilindar u dubokom i prijelaznom području dubina može koristiti s dovoljnom točnošću. Naravno da je teorijski korektnije koristiti neku drugu valnu teoriju adekvatniju za veće strmosti vala i male dubine mora u prijelaznom području. Značajke valjka su da je: horizontalan, konstantnog promjera, krut (nedeformabilan), nepomičan, vitak (malog promjera i velike dužine:  $D/L \leq 0,2$ ;  $D$ -vanjski promjer valjka,  $L$ -valna dužina) i smješten u ishodištu koordinatnog sustava ( $x=0$ ). Takav valjak u stvari simbolizira podmorski cjevovod. On u eksploataciji ima pridneni smještaj, pa je podvrgnut nesimetričnim gibanjima vodnih čestica. Za osnovna tumačenja, koja slijede, razmatrat će se valjak izdignut iznad dna podvrgnut simetričnim gibanjima vodnih čestica oko valjka.

#### 2.2.2.1.1 Sile na podmorski vitki fiksni podmorski horizontalni valjak od stacionarne morske struje

**Hidrodinamičku silu od stacionarne morske struje** uzrokuje opstrujavanje horizontalnog valjka stacionarnom horizontalnom morskom strujom brzine je  $V_{s,x} = \text{const}$ .



Sl. 2.2.2.1.1::1 Definijska skica za hidrodinamičke sile: silu otpora  $F_{D,s,x}$  i silu hidrodinamičkog uzgona  $\pm F_{L,s,z}$  kod opstrujavanja horizontalnog uronjenog valjka stacionarnom horizontalnom morskom strujom brzine  $V_{s,x}$

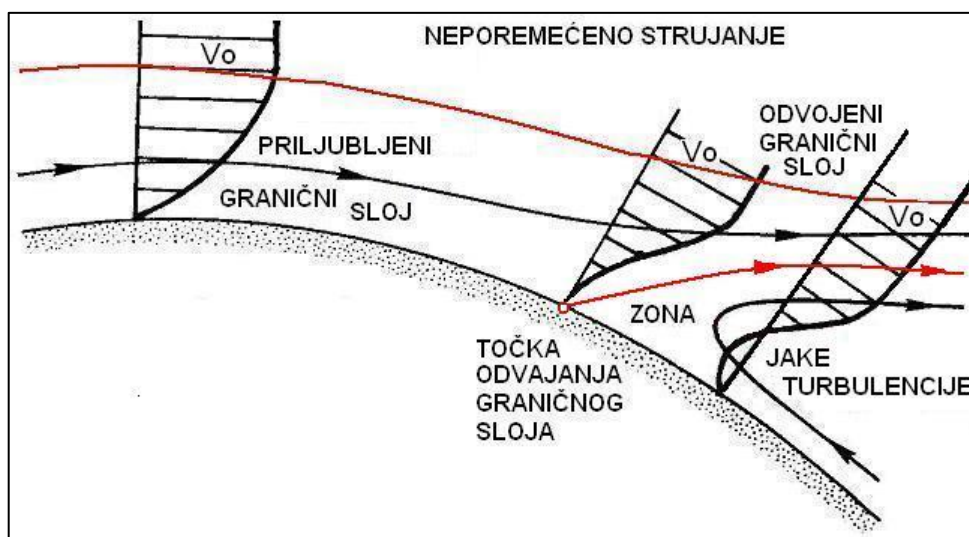


Vertikalna komponenta brzine morske struje se kao mala zanemaruje. Izvedena je temeljem Prandtlove teorije za stacionarno strujanje. Radi lakšeg teorijskog razumijevanja ona se daje izraziti kao vektorski zbroj dviju ortogonalnih komponenti (Sl. 2.2.2.1.1::1):

- horizontalne sile otpora  $F_{D,S,x}$  i
- vertikalne sile hidrodinamičkog uzgona  $\pm F_{L,S,x}$ .

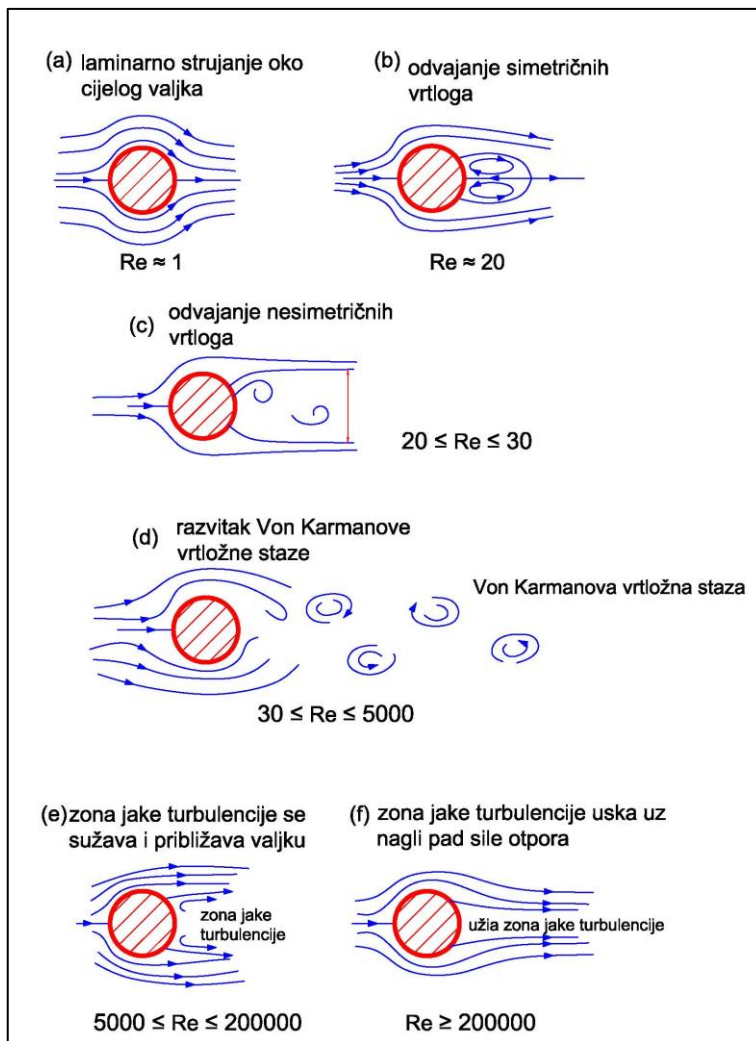
koje imaju različit fizikalni mehanizam nastajanja. Po katarakteru obadvije su sile otpora ovisne o kvadratu brzine strujanja  $V_{s,x}^2$ .

Njihova hidrodinamička geneza proizlazi iz opstrujavanja zakrivljene površine tijela; ovdje valjka, u struji tekućine. Pri opstrujavanju zakrivljenih kontura (Sl. 2.2.2.1.1::2), strujanje se najprije ubrzava i dolazi do smanjenja tlaka duž strujanja te stanjivanja graničnog sloja. Na mjestu gdje gradijent tlaka mijenja predznak, strujanje se počinje usporavati, a granični sloj širiti. Usljed toga dolazi do odvajanja graničnog sloja i pojave povratne struje. Lokacija točke odvajanja ovisi o obliku i hrapavosti tijela oko kojeg tekućina opstrujava te o Reynoldsovom broju. Kod opstrujavanja zakrivljenih kontura, povećanjem brzine strujanja, točka odvajanja se pomiče uzvodno sve dok granični sloj ne postane turbulentan kada nastupa naglo pomicanje zone odvajanja nizvodno.



Sl. 2.2.2.1.1::2 Opstrujavanje zakrivljene konture: uz odvajanje graničnog sloja i pojave povratnog toka

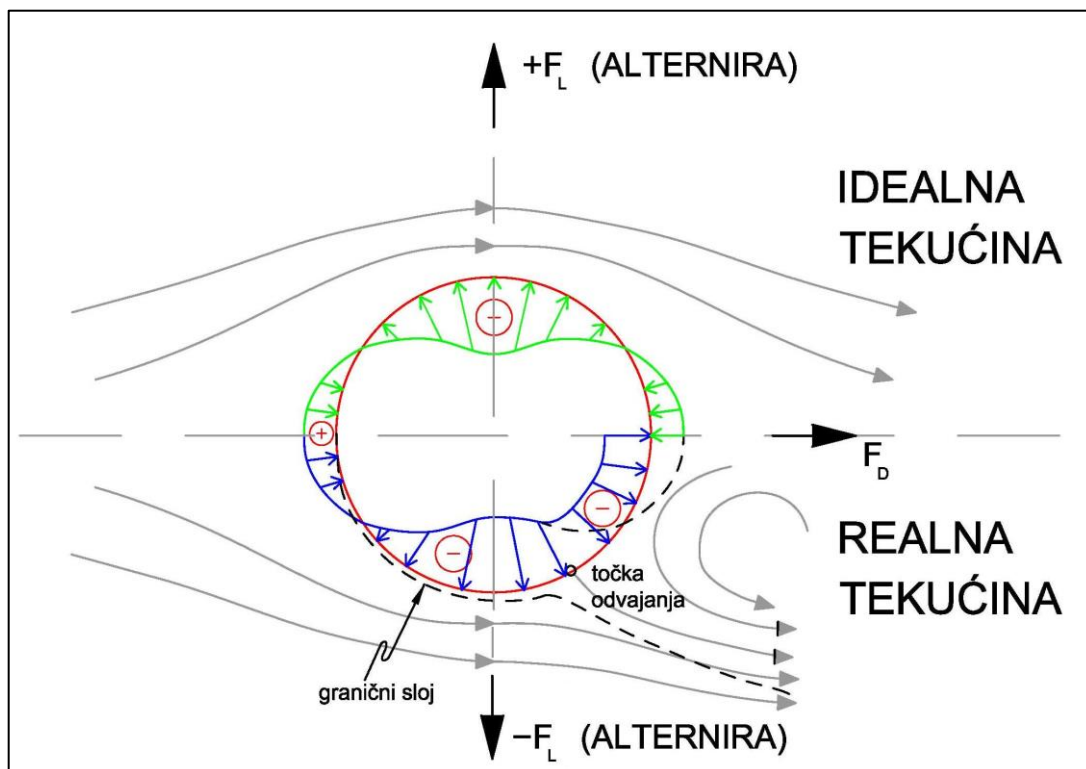
Pri malim brzinama tečenja (Sl. 2.2.2.1.1::3a) javlja se laminarno strujanje oko cijelog valjka:  $Re \approx 1$ , koeficijent otpora  $C_D = 10$ . Granični sloj nije izražen, a kinematička slika ispred i iza valjka je gotovo simetrična. Povećanjem brzine strujanja (Sl. 2.2.2.1.1::3b), uočava se širenje graničnog sloja na nizvodnoj strani valjka. Dolazi do odvajanja graničnog sloja od plašta valjka u točki odvajanja graničnog sloja, te stvaranje zone jake turbulencije, odnosno poremećenosti toka, (engl. wake) u sjeni valjka unutar koje se odvajaju veliki simetrični vrtlozi koji ostaju blizu nizvodne stjenke valjka:  $Re \approx 20$ ,  $C_D = 2$ . Vrtlozi se produljuju povećanjem brzine toka. Također, povećanjem brzine se točka odvajanja pomiče uzvodno. Daljnjim povećanjem brzine strujanja (Sl. 2.2.2.1.1::3c), točka odvajanja opet se pomiče nizvodno. U zoni jake turbulencije javlja se nesimetrično naizmjenično otkidanje vrtloga od valjka:  $20 \leq Re \leq 30$ ,  $C_D < 2$ , a zona jake turbulencije iza valjka postaje sve dulja. Kod relativno velikih brzina strujanja (Sl. 2.2.2.1.1::3d), vrtlozi se odvajaju ud valjka i putuju nizvodno. Dolazi do formiranja karmanove staze stabilnog nizvodnog slijeda naizmjeničnih samostalnih vrtloga koji imaju i stanovito kolebanje poprečno na smjer tečenja;  $30 \leq Re \leq 5000$ ,  $C_D = 1,8-1$ . Daljnjim povećanjem brzine (Sl. 2.2.2.1.1::3e) javlja se laminarno strujanje uzvodno od točke



odvajanja s tim da se turbulencija postiže u zoni jake turbulencije nizvodnije od valjka kod manjih  $Re$ , a bliže valjku kod većih  $Re$ :  $5000 \leq Re \leq 200000$  ( $2 \cdot 10^5$ ),  $C_D = 1-1.2$ , Na Sl. 2.2.2.1.1.:3f je još veća brzina kad se zona jake turbulencije sužuje što daje smanjenje sile otpora,  $Re > 200000$  ( $2 \cdot 10^5$ ),  $C_D = 1,2-0,3$ . Za odnos  $Re$  i  $C_D$  vidi Sl. 2.2.2.1.4.3.:1.

Slika Sl. 2.2.2.1.1.:4 prikazuje razliku u raspodjelu tlaka pri opstrujavanju valjka za idealnu tekućinu (gornja polovica slike) i realnu tekućinu (donja polovica slike).

Sl. 2.2.2.1.1.:3 Razvoj kinematičke slike pri opstrujavanju valjka



Sl. 2.2.2.1.1.:4 Raspodjela tlaka pri opstrujavanju valjka: realna tekućina pri otprilike  $Re = n \cdot 10^4$  Jović, 2006, Simiu 1986.

Prema Prandtlovoj teoriji, tlak se iz neporemećenog strujanja prenosi kroz granični sloj do čvrste konture gotovo nepromijenjen. Unutar odvojenog graničnog sloja očekuje se tlak jednak tlaku u točki odvajanja. Raspodjela tlaka može se izraziti bezdimenzionalno uz pomoć bezdimenzionalne tlačne funkcije  $f_0$ :

$$f_0 = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2} \quad (2.1)$$

gdje je:

- $p$  [Pa]– tlak u graničnom sloju,
- $p_0$  [Pa] tlak u neporemećenom strujanju,
- $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] gustoća tekućine,
- $v_0$  [m/s] brzina neporemećenog strujanja,

Ukupna hidrodinamička sila opstrujavanja određuje se kao integral tlačnih sila po plaštu valjka:

$$\vec{F}_0 = \int_A dF = \int_A p \vec{n} dA \quad (2.2)$$

pri čemu je  $\vec{n}$  vektor jedinične normale na element  $dA$  na plaštu valjka.

Kombiniranjem izraza (2.1) i (2.2) dobije se:

$$\vec{F}_0 = \int_A p_0 \vec{n} dA + \frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2 \int_A f_p \vec{n} dA$$

Prvi integral u gornjem izrazu jednak je nuli, pa konačni izraz za hidrodinamičku silu opstrujavanja ima oblik:

$$\vec{F}_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2 \int_A f_p \vec{n} dA \quad (2.3)$$

Ako se hidrodinamička sila rastavi na vertikalnu i horizontalnu komponentu, dobije se:

$$F_{0H} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2 \int_A f_p n_x dA$$

$$F_{0V} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2 \int_A f_p n_y dA \quad (2.4)$$

Horizontalna komponenta hidrodinamičke sile naziva se *sila hidrodinamičkog otpora*  $F_D$ . Vertikalna komponenta hidrodinamičke sile zove se *sila hidrodinamičkog uzgona*  $F_L$ . Ponegdje se ta sila naziva i Karmanovom silom. Hidrodinamičke sile otpora i uzgona mogu se izraziti preko srednje vrijednosti gornjeg integrala što daje:

$$F_D = C_D A \frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2$$

$$F_L = C_L A \frac{1}{2} \rho \cdot v_0^2 \quad (2.5)$$

gdje su

- $C_D$  – koeficijent otpora (trenja + oblika)
- $C_L$  – koeficijent uzgona

Vrijednosti koeficijenata otpora i uzgona ovise o Reynoldsovom broju, a određuju se eksperimentalno.

**Sila otpora od morske struje  $F_{D,S,x}$ , horizontalnog smjera** (engl. Drag force), fizikalno gledano, je posljedica opstrujavanja a. Djeluje u smjeru gibanja morske struje. Predstavlja zbroj istovremene sile otpora oblika valjka u struji tekućine i sile otpora trenja na plaštu valjka u struji tekućine. One se ne daju teorijski razlučiti, pa se razmatraju kao jedna sila t. j. kao sila otpora (Sl. 2.2.2.1.1.:1). Izražava se kao:

$$F_{D,S,x} = \frac{1}{2} \rho C_D D V_{S,x}^2 \text{ [N/m']}$$

gdje je:

$F_{D,S,x}$ [N/m']	hidrodinamička sila otpora od morske struje, horizontalnog smjera
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća mase morske vode
$D$ [m]	vanjski promjer valjka
$C_D$	koeficijent otpora
$V_{S,x}$ [m/s]	horizontalna komponenta brzine morske struje

**Sila hidrodinamičkog uzgona od morske struje  $\pm F_{L,S,z}$  vertikalnog smjera** (engl. Lifting force), ponekad se naziva i Karmanovom silom. Fizikalno gledano, posljedica je naizmjeničnog otkidanja vrtloga na gornjem i donjem rubu valjka. Djeluje okomito na smjer gibanja morske struje; dakle u vertikalnom smjeru, alternativno gore-dolje (Sl. 2.2.2.1.1.:1). Izražava se s:

$$\pm F_{L,S,z} = \pm \frac{1}{2} \rho C_L D V_{S,x}^2 \text{ [N/m']}$$

gdje je:

$F_{L,S,z}$ [N/m']	sila hidrodinamičkog uzgona od stacionarne morske struje, vertikalnog smjera
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća mase morske vode
$D$ [m]	vanjski promjer valjka
$C_L$	koeficijent hidrodinamičkog uzgona
$V_{S,x}$ [m/s]	horizontalna komponenta brzine stacionarne morske struje

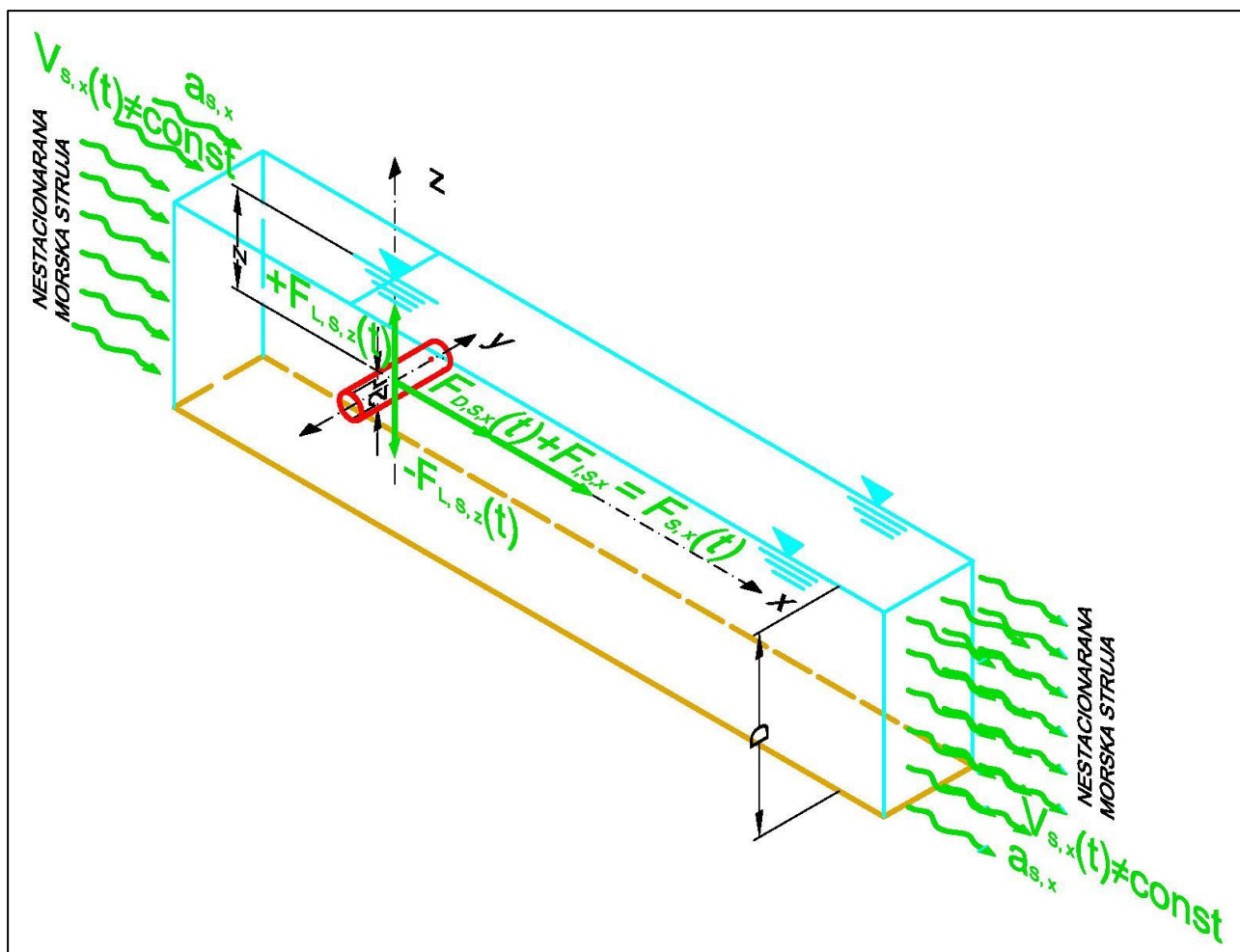
#### 2.2.2.1.2 Sile na podmorski vitki fiksni podmorski horizontalni valjak od nestacionarne morske struje

**Hidrodinamičku silu od nestacionarne morske struje** uzrokuje opstrujavanje valjka nestacionarnom horizontalnom morskom strujom brzine  $V_{s,x}(t) \neq \text{const}$  kojoj pripada horizontalno ubrzanje  $a_{s,x}$ . Ovo je hipotetički slučaj koji služi samo ovom edukativnom procesu radi teorijskog razjašnjenja efekta nestacionarnosti strujanja kod definiranja hidrodinamičkih sila na valjak. Stvarne morske struje u stvari su vrlo slabo nestacionarne i efekt njihove nestacionarnosti je inženjerski zanemariv. Radi lakšeg teorijskog

razumijevanja ona se daje izraziti kao vektorski zbroj triju ortogonalnih komponenti (Sl. 2.2.2.1.2::1):

- horizontalne sile otpora  $F_{D,S,x}$ ,
- horizontalne inercijalne sile  $F_{I,S,x}$  i
- vertikalne sile hidrodinamičkog uzgona  $\pm F_{L,S,x}$ .

koje imaju različit fizikalni mehanizam nastajanja. Prve i treća su po karakteru sile otpora ovisne o kvadratu brzine strujanja  $V_{s,x}^2$ , a druga je inercijalna sila ovisne o ubrzanju strujanja  $a_{s,x}$ .



Sl. 2.2.2.1.2::1 Definijska skica za hidrodinamičke sile: silu otpora  $F_{D,S,x}(t)$ , silu inercije  $F_{I,S,x}$  i silu hidrodinamičkog uzgona  $\pm F_{L,S,z}(t)$  kod opstrujavanja horizontalnog uronjenog valjka nestacionarnom morskom strujom brzine  $V_{s,x}(t)$  i pripadnim horizontalnim ubrzanjem  $a_{s,x}$

Prema 2.2.2.1.1 brzina horizontalne morske struje  $V_{s,x}(t)$  proizvodi:

**horizontalnu silu otpora  $F_{D,S,x}(t)$**

$$F_{D,S,x}(t) = \frac{1}{2} \rho C_D D V_{s,x}^2(t) \text{ [N/m]}'$$

**i vertikalnu silu hidrodinamičkog uzgona  $\pm F_{L,S,x}(t)$**

$$\pm F_{L,S,z}(t) = \pm \frac{1}{2} \rho C_L D V_{S,x}^2(t) \text{ [N/m']}$$

gdje su:

$F_{D,S,x}(t)$  [N/m'] hidrodinamička sila otpora od nestacionarne morske struje u nekom trenutku „t“, vertikalnog smjera i

$F_{L,S,z}(t)$  [N/m'] sila hidrodinamičkog uzgona od stacionarne morske struje u nekom trenutku „t“, vertikalnog smjera.

$V_{s,x}(t)$  [m/s] horizontalna komponenta brzine nestacionarne morske struje

$D$  [m] vanjski promjer valjka

Sila otpora  $F_{D,S,x}(t)$  i sila hidrodinamičkog uzgona  $\pm F_{L,S,z}(t)$  u ovom slučaju su varijabilne po vremenu. U proračune konstrukcije uzima se njihova najveća vrijednost tokom razmatranog vremenskog razdoblja, ili neka vrijednost manja od maksimalne koja u nekoj proračunskoj situaciji (u kojoj itovremeno djeluju i druge vremenski varijabilne sile) daje najnepovoljniji učinak. Koja je to proračunska situacije ne može se unaprijed znati, pa se doznaje ispitivanjem mnogih od kojih se jedna pokaže najnepovoljnija.

No nestacionarno horizontalno strujanje ima i horizontalno ubrzanje  $a_{s,x}=\text{const}$  koje proizvodi **horizontalnu silu inercije**  $F_{I,S,x}$  (Sl. 2.2.2.1.2::1) , a koja se izražava kao:

$$F_{I,S,x} = \frac{1}{4} \rho \pi C_I D^2 a_{s,x} \text{ [N/m']}$$

gdje je:

$F_{I,S,x}$  [N/m'] sila inercije od nestacionarne morske struje, horizontalnog smjera

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] gustoća mase morske vode

$D$  [m] vanjski promjer valjka

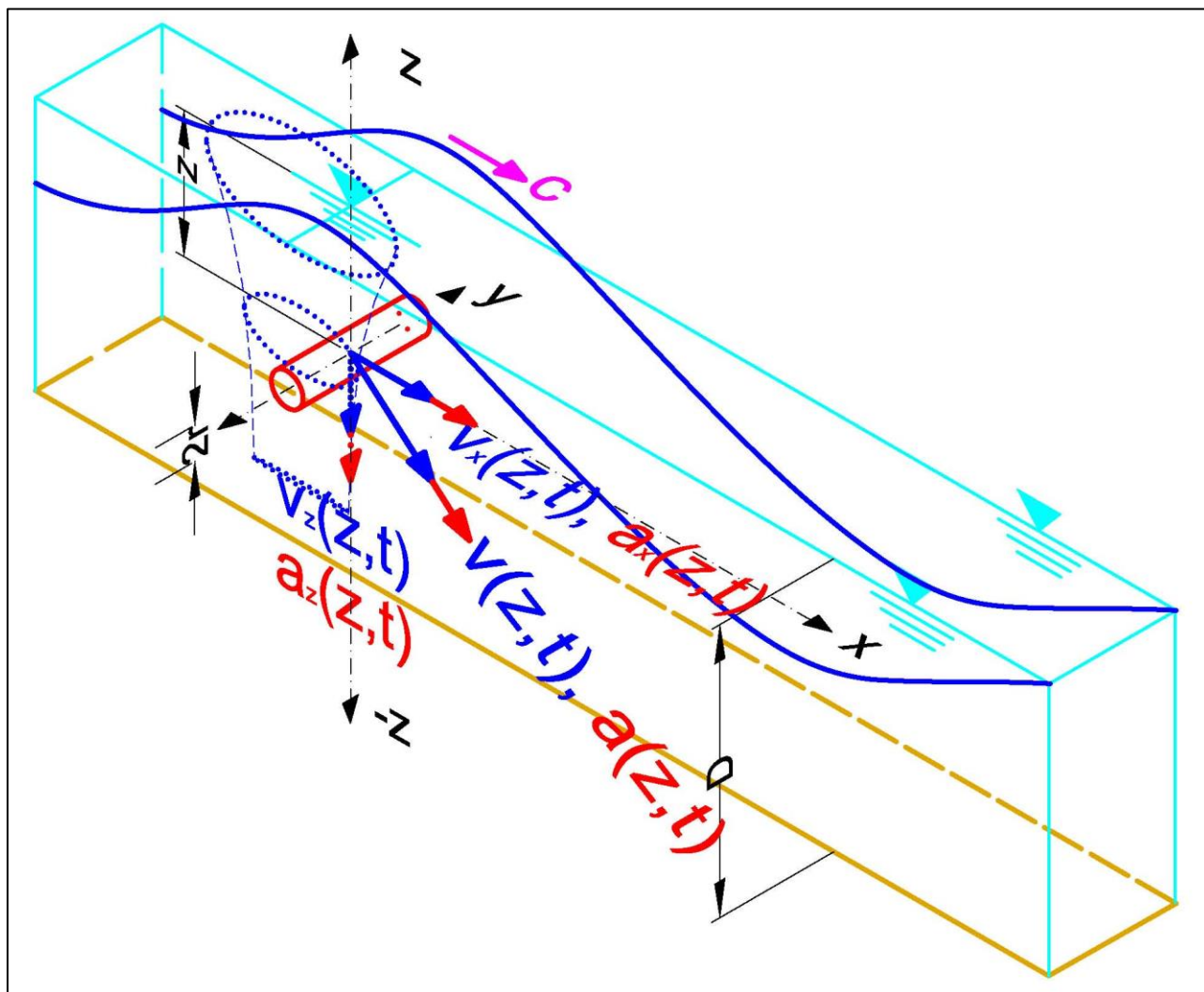
$C_I$  koeficijent inercije, ili koeficijent pridružene mase

$a_{s,x}$  [m/s] horizontalna komponenta ubrzanja morske struje.

2.2.2.1.3 Sile na podmorski horizontalni valjak od nestacionarnih gibanja vodnih čestica uzrokovanih idealnim (pravilnim) morskim valovima

**Ukupnu hidrodinamičku silu od valova** uzrokuje opstrujavanje podmorskog valjka vodnim česticama pobuđenim valovima. Osnovna filozofija njihovog nastanka i proračuna dana je naprijed u poglavljima 2.2.2.1.1 i 2.2.2.1.2. Realno gibanje vodnih čestica ispod površine vala odvijat će se kao irotacijsko. No inženjerski prihvatljiv model tog gibanja je, prema linearnoj teoriji idealnih valova, rotacijsko po kružnoj ili eliptičnoj stazi. Obodna (tangencijalna na stazu) brzina  $v(z,t)$  rotacijskog gibanja na dubini mora „z“ može se rastaviti u nestacionarne komponente  $v_x(z,t)$  i  $v_z(z,t)$  s pripadajućim komponentama

ubrzanja  $a_x(z,t)$  i  $a_z(z,t)$ . Spomenute brzine i ubrzanja, kod idealnog vala, su različite u razmatranim trnucima vremena „t“ unutar jednog valnog perioda (Sl. 2.2.2.1.3::1).

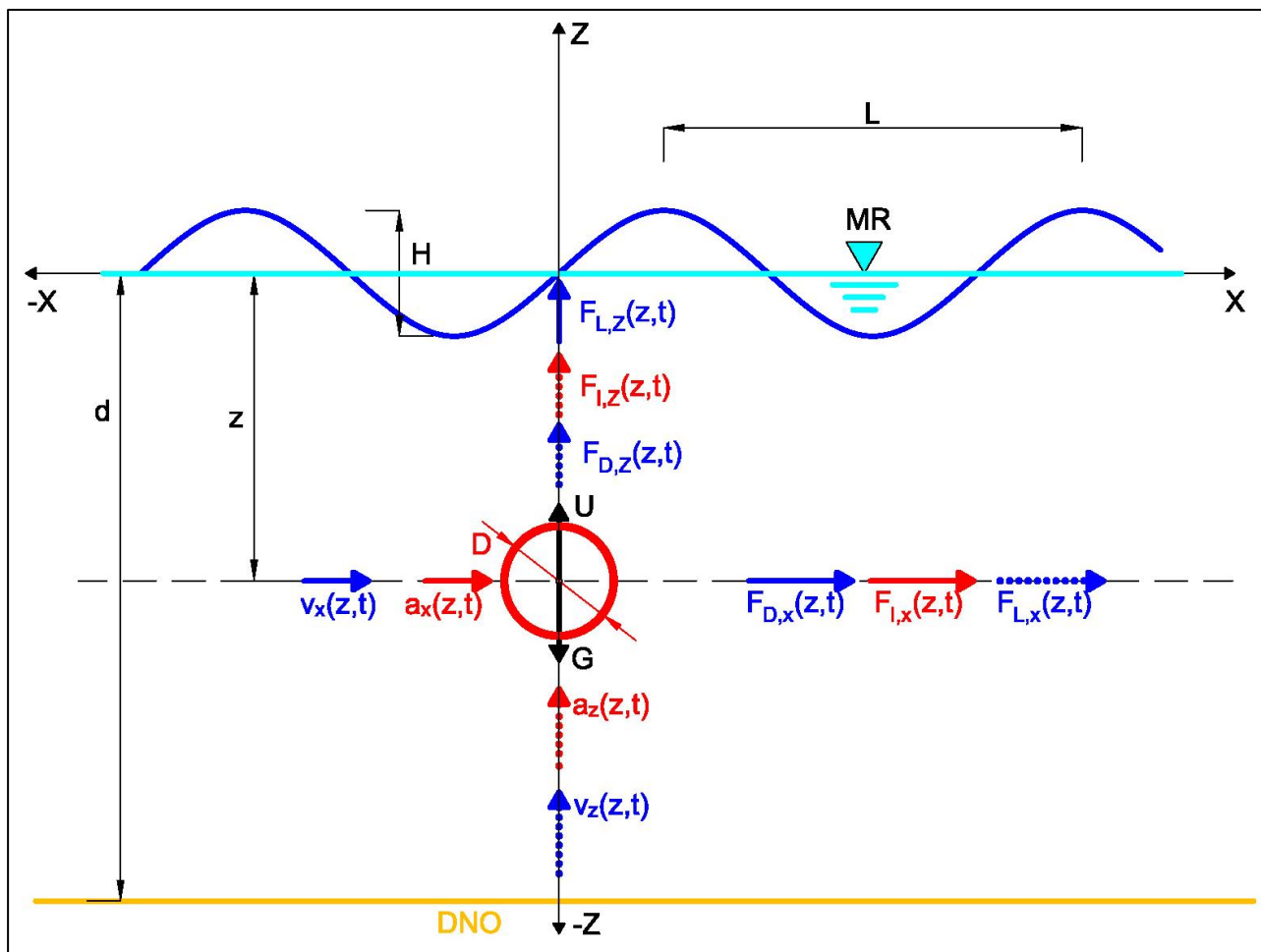


Sl. 2.2.2.1.3::1 Definijska skica za opstrujavanje horizontalnog uronjenog valjka nestacionarnim valnim gibanjima vodnih čestica; t. j. brzinama  $v_x(z,t)$  i  $v_z(z,t)$ , te ubrzanjima  $a_x(z,t)$  i  $a_z(z,t)$

U dubokom moru, na nekoj dubini „z“, rotacijsko gibanje će prema linearnoj teoriji biti po kružnoj stazi radijusa  $r(z) = \frac{1}{2} H e^{2\pi z/L}$ . Obodna brzina je  $v(z,t) = 2 \cdot r(z) \cdot \pi/T = \pi \cdot H \cdot e^{2\pi z/L} / T = \text{const}$ , a može se rastaviti u nestacionarne komponente  $v_x(z,t) = v(z) \cdot \cos[(2 \cdot \pi/T) \cdot t] = (\pi \cdot H \cdot e^{2\pi z/L} / T) \cdot \cos[(2 \cdot \pi/T) \cdot t]$  i  $v_z(z,t) = v(z) \cdot \sin[(2 \cdot \pi/T) \cdot t] = (\pi \cdot H \cdot e^{2\pi z/L} / T) \cdot \sin[(2 \cdot \pi/T) \cdot t]$  i pripadajućim komponentama ubrzanja  $a_x(z,t) = 2 \cdot (\pi^2 \cdot H \cdot e^{2\pi z/L} / T^2) \cdot \sin[(2 \cdot \pi/T) \cdot t]$  i  $a_z(z,t) = -2 \cdot (\pi^2 \cdot H \cdot e^{2\pi z/L} / T^2) \cdot \cos[(2 \cdot \pi/T) \cdot t]$ . U prijelaznom i plitkom moru, na nekoj dubini „z“, rotacijsko gibanje će biti po eliptičnoj stazi obodnom brzinom  $v(z,t) \neq \text{const}$ , nestacionarnim komponentama brzine  $v_x(z,t)$  i  $v_z(z,t)$  te pripadajućim komponentama ubrzanja  $a_x(z,t)$  i  $a_z(z,t)$ . U tom području formule za brzine i ubrzanja su kompliciranije. Obzirom na brzine i ubrzanja vodnih čestica ispod površine vala može se ukupna valna hidrodinamička sila, radi lakšeg razumijevanja, razložiti u tri vrste sila:

- silu otpora  $F_D(z,t)$ , u smjeru gibanja vodnih čestica,
- silu nercije  $F_I(z,t)$ , u smjeru gibanja vodnih čestica i
- silu hidrodinamičkog uzgona  $\pm F_L(z,t)$ , poprečno na smjer gibanja vodnih čestica.

koje su različite u svakom trenutku vremena „t“ unutar jednog valnog perioda razmatranog idealnog vala i koje imaju različit fizikalni mehanizam nastajanja. Prve i treća su po karakteru sile otpora ovisne o kvadratu brzine gibanja vodnih čestica  $v^2(z,t)$ , a druga je inercijalna sila ovisna o ubrzanju tog gibanja  $a(z,t)$ . Kako se brzina  $v(z,t)$  i ubrzanje  $a(z,t)$ , pobuđene valovima, mogu rastaviti na po dvije ortogonalne komponente:  $v_x(z,t)$  i  $v_z(z,t)$ , te  $a_x(z,t)$  i  $a_z(z,t)$  te se i gornje 3 sile mogu rastaviti u 6 ortogonalnih komponenti:  $F_{D,x}(z,t)$  i  $F_{D,z}(z,t)$ ,  $F_{I,x}(z,t)$  i  $F_{I,z}(z,t)$  i  $F_{L,x}(z,t)$  i  $F_{L,z}(z,t)$  (Sl. 2.2.2.1.3::2).



Sl. 2.2.2.1.3::2 Definijska skica za hidrodinamičke sile kod opstrujavanja horizontalnog uronjenog valjka nestacionarnim valnim djelovanjima vodnih čestica; t. j. brzinama  $v_x(z,t)$  i  $v_z(z,t)$ , te ubrzanjima  $a_x(z,t)$  i  $a_z(z,t)$

To u odnosu na vertikalni valjak komplicira problem. Kod horizontalnog valjka obje komponente brzine i ubrzanja uzrokuju hidrodinamičke sile otpora, inercije i hidrodinamičkog uzgona, a kod vertikalnog samo horizontalne. Uzročnice sile otpora, sile inercije i sile hidrodinamičkog uzgona: brzine i ubrzanja vodnih čestica su promjenjive po vremenu „t“ nemaju istovremene maksimume. Shodno tome ni sile otpora, sile inercije kao ni sile hidrodinamičkog uzgona nemaju istovremene maksimume, a ni trenutak njihovog nastupa nije unaprijed poznat. To se, kod pravilnog idealnog vala, doznaje diskretnim izračunom spomenutih triju istovremenih hidrodinamičkih sila tokom jednog cijelog valnog perioda. U nastavku se daju izračuni sile otpora i sile inercije i sile hidrodinamičkog uzgona.



### 2.2.2.1.3.1 Sile otpora i inercije na podmorski horizontalni valjak uslijed nestacionarnih gibanja vodnih čestica pobuđenih valovima

Promatra se cijev izdignutu  $z$ [m] iznad dna (Sl. 2.2.2.1.3::2). Istovremeno djelovanje sile otpora i sile inercije na horizontalni valjak razmatra se skupno i daje silu njihovog ukupnog djelovanja. Sila hidrodinamičkog uzgona u to razmatranje nije uključena. Morison je 1950. postavio teoriju da se ukupna horizontalna komponenta sile od horizontalnih komponenti gibanja vodnih čestica pobuđenih valom u nekom trenutku „t“ može izraziti kao linearan zbroj nezavisne horizontalne komponente sile otpora i nezavisne horizontalne komponente sile inercije u istom trenutku „t“:  $F_x(z,t)=F_{D,x}(z,t)+F_{I,x}(z,t)$ , a ukupna vertikalna komponenta sile na horizontalni valjak kao linearan zbroj vertikalne komponente sile otpora i vertikalne komponente sile inercije:  $F_z(z,t)=F_{D,z}(z,t)+F_{I,z}(z,t)$ . Pritom je  $F_x(z,t)$  u funkciji  $v_x(z,t)$  i  $a_x(z,t)$ , a  $F_z(z,t)$  u funkciji  $v_z(z,t)$  i  $a_z(z,t)$ . Sve to vrijedi uz pripadne hidrauličke koeficijente sila čiji je varijabilitet sukladan hidrauličkom režimu gibanja vodnih čestica oko valjka u razmatranom trenutku „t“. Fizikalno to nije dokazano što pokazuje i veliki varijabilitet hidrauličkih koeficijenata za različite režime gibanja vodnih čestica oko cijevi.

Za slučaj djelovanja morskih valova ukupna horizontalna hidrodinamička sila  $F_{tot,x}(z,t)$  [N/m'] na jedinicu dužine uronjenog horizontalnog podmorskog valjka na nekoj dubini "z" ispod mirnog raza MR, u nekom trenutku "t" i na mjestu  $x=0$  izračunava se kao suma slijedećih horizontalnih komponenti: sile otpora  $F_{D,x}(z,t)$  [N/m'] i sile inercije  $F_{I,x}(z,t)$  [N/m']. Isto vrijedi i za vertikalnu hidrodinamičku silu  $F_{tot,z}(z,t)$  [N/m'] čije su komponente  $F_{D,z}(z,t)$  [N/m'] i  $F_{I,z}(z,t)$  [N/m']. Sve je prikazano shematski na Sl. 2.2.2.1.3::2.

Ukupne horizontalne i vertikalna sile na metar dužni horizontalnog podmorskog valjka mogu se izraziti kao:

$$F_{tot,x}(z,t)=F_{D,x}(z,t)+F_{I,x}(z,t)=\frac{1}{2}\rho C_D D v_x(z,t)|v_x(z,t)|+\frac{1}{4}\rho\pi C_I D^2 a_x(z,t) \text{ [N/m']} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{tot,z}(z,t)=F_{D,z}(z,t)+F_{I,z}(z,t)=\frac{1}{2}\rho C_D D v_z(z,t)|v_z(z,t)|+\frac{1}{4}\rho\pi C_I D^2 a_z(z,t) \text{ [N/m']} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{D,x}(z,t)=\frac{1}{2}\rho C_D D v_x(z,t)|v_x(z,t)| \text{ [N/m']} \dots\dots\dots (3)$$

$$F_{I,x}(z,t)=\frac{1}{4}\pi\rho C_I D^2 a_x(z,t) \text{ [N/m']} \dots\dots\dots (4)$$

$$F_{D,z}(z,t)=\frac{1}{2}\rho C_D D v_z(z,t)|v_z(z,t)| \text{ [N/m']} \dots\dots\dots (5)$$

$$F_{I,z}(z,t)=\frac{1}{4}\pi\rho C_I D^2 a_z(z,t) \text{ [N/m']} \dots\dots\dots (6)$$

gdje je:

$F_{tot,x}(z,t)$  [N/m'] ..... ukupna horizont. hidrodinamička sila

$F_{tot,z}(z,t)$  [N/m'] ..... ukupna vertikal. hidrodinamička sila

$F_{D,x}(z,t)$  [N/m'] ..... horizontalna komponenta sile otpora

$F_{D,z}(z,t)$ [N/m']	.....	vertikalna komponenta sile otpora
$F_{I,x}(z,t)$ [N/m']	.....	horizontalna komponenta sile inercije
$F_{I,z}(z,t)$ [N/m']	.....	vertikalna komponenta sile inercije
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	.....	gustoća mase morske vode
$D$ [m]	.....	vanjski promjer cjevovoda
$C_D$	.....	koeficijent otpora
$C_I$	.....	koeficijent inercije, ili koeficijent pridružene mase
$v_x(z,t) = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (z+d)]}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(-\omega \cdot t)$	[m/s]	horizontalna komponenta brzine
$v_z(z,t) = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\sinh[k \cdot (z+d)]}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(-\omega \cdot t)$	[m/s]	vertikalna komponenta brzine
$a_x(z,t) = \frac{2\pi^2 \cdot H}{T^2} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (z+d)]}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \sin(-\omega \cdot t)$	[m/s <sup>2</sup> ]	horizontalna komp. ubrzanja
$a_z(z,t) = \frac{2\pi^2 \cdot H}{T^2} \cdot \frac{\sinh[k \cdot (z+d)]}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(-\omega \cdot t)$	[m/s <sup>2</sup> ]	vertikalna komp. ubrzanja
$H$ [m]	.....	valna visina
$T$ [s]	.....	valni period
$d$ [m]	.....	dubina vode ispod mirnog raza
$L = \frac{2 \cdot \pi}{L}$ [rad/m]	.....	valni broj
$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ [rad/m]	.....	valna frekvencija (kutna)
$L=L_o \operatorname{tgh}(kd)$ [m]	.....	valna duljina
$L_o$ [m]	.....	duljina dubokovodnog vala

Gore navedeni izrazi za brzinu, ubrzanje i ostale valne parametre definirani su prema linearnoj valnoj teoriji.

Izrazi (1) do (6) općenito su prihvaćeni za proračun hidrodinamičkog opterećenja horizontalnih cilindričnih elemenata pomorskih konstrukcija. Dakle, smatra se da vrijedi potpuna analogija proračuna opterećenja za vertikalni i horizontalni valjak, što drugim riječima znači da su za određivanje horizontalne ili vertikalne komponente opterećenja horizontalnog cjevovoda mjerodavne jedino horizontalna, odnosno vertikalna komponenta strujanja vodne čestice. No kako je ta pretpostavka u ovoj analizi uzeta kao netočna, odnosno za komponente hidrodinamičkog opterećenja horizontalnog cilindra značajna je i komponenta okomito na smjer strujanja, to je Morisonovu jednadžbu potrebno prikazati modificirano u vektorskoj formi, tj. kao vektorsku sumu sile otpora i sile inercije na jedinicu dužine cjevovoda:

$$\vec{F}(z,t) = \vec{F}_D(z,t) + \vec{F}_I(z,t) = \frac{1}{2} \rho D C_D \cdot \vec{v}(z,t) \cdot |\vec{v}(z,t)| + \frac{1}{4} \rho D^2 C_I \cdot \vec{a}(z,t) \quad [\text{N/m}] \quad (7)$$

gdje su  $\vec{v}(z,t)$ ;  $\vec{a}(z,t)$  vektori brzine i ubrzanja vodne čestice vala. Gornja jednadžba može se prikazati i pomoću horizontalne i vertikalne komponente kao:

$$\vec{F}(z,t) = F_x(z,t) \cdot \vec{i} + F_z(z,t) \cdot \vec{k} = \frac{1}{2} \rho D C_D \cdot [v_x \cdot (z,t) \cdot \vec{i} + v_z \cdot (z,t) \cdot \vec{k}] \cdot |\vec{v}(z,t)| + \frac{1}{4} \rho D^2 C_I \cdot [a_x \cdot (z,t) \cdot \vec{i} + a_z \cdot (z,t) \cdot \vec{k}] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \vec{F}(z,t) &= \left[ \frac{1}{2} \rho D C_D \cdot v_x \cdot (z,t) \cdot |\vec{v}(z,t)| + U_l \cdot a_x \cdot (z,t) \right] \cdot \vec{i} + \left[ \frac{1}{2} \rho D C_D \cdot v_z \cdot (z,t) \cdot |\vec{v}(z,t)| + \frac{1}{4} \rho D^2 C_I \cdot a_z \cdot (z,t) \right] \cdot \vec{k} \\ &= \left[ \frac{1}{2} \rho D C_D \cdot v_x \cdot (z,t) \cdot \sqrt{v_x^2(z,t) + v_z^2(z,t)} + \frac{1}{4} \rho D^2 C_I \cdot a_x \cdot (z,t) \right] \cdot \vec{i} + \left[ \frac{1}{2} \rho D C_D \cdot v_z \cdot (z,t) \cdot \sqrt{v_x^2(z,t) + v_z^2(z,t)} + \frac{1}{4} \rho D^2 C_I \cdot a_z \cdot (z,t) \right] \cdot \vec{k} \end{aligned}$$

gdje su:

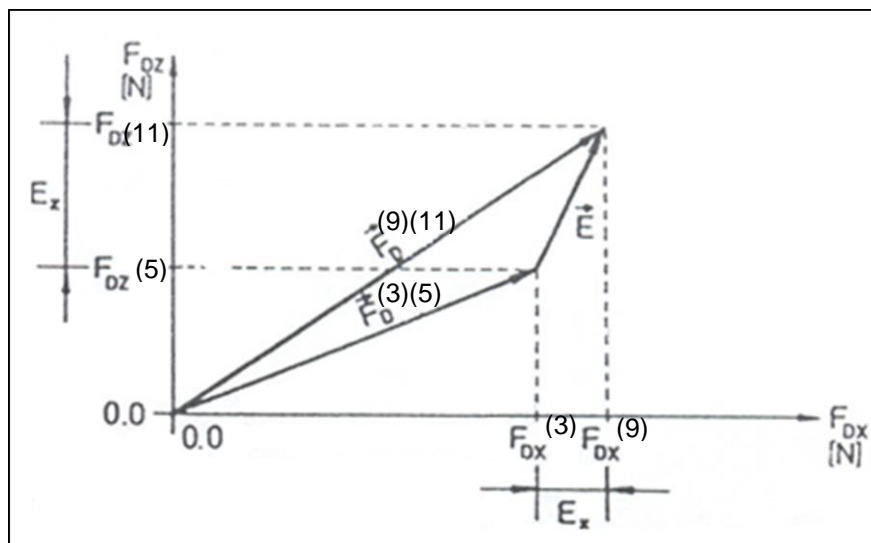
$$F_{Dx}(z,t) = \frac{1}{2} \rho D C_D v_x(z,t) \cdot |\vec{v}(z,t)| = \frac{1}{2} \rho D C_D v_x(z,t) \cdot [v_x^2(z,t) + v_z^2(z,t)]^{1/2} \quad [\text{N/m}] \quad (9)$$

$$F_{Ix}(z,t) = \frac{1}{4} \rho \pi C_I D^2 a_x(z,t) \quad [\text{N/m}] \quad (10)$$

$$F_{Dz}(z,t) = \frac{1}{2} \rho D C_D v_z(z,t) \cdot |\vec{v}(z,t)| = \frac{1}{2} \rho D C_D v_z(z,t) \cdot [v_x^2(z,t) + v_z^2(z,t)]^{1/2} \quad [\text{N/m}] \quad (11)$$

$$F_{Iz}(z,t) = \frac{1}{4} \rho \pi C_I D^2 a_z(z,t) \quad [\text{N/m}] \quad (12)$$

$\vec{i}$ ,  $\vec{k}$  jedinični vektori u smjeru osi x, odnosno z.



Sl. 2.2.2.1.3.1::1 Vektorski prikaz pogreške kod proračuna sile otpora

Vidljivo je da do promjena u proračunu opterećenja u odnosu na izraze (1) do (6) jedino dolazi kod izraza za komponente sile otpora, dok izrazi za komponente sile inercije ostaju nepromijenjeni. Dakle, očito je da jednadžbe (7) do (9) i jednadžba (11) u odnosu na izraze (3) i (5) matematički ispravnije opisuju fiziku fenomena pošto je, izraženo matematičkim rječnikom, vrijednost kvadrata n-te komponente nekog vektora  $\vec{v}_x$  različita od produkta n-te komponente  $v_x$  istog vektora  $\vec{v}$ , odnosno:

$$v_x \cdot |\vec{v}_x| \neq v_x \cdot |\vec{v}|; \quad \text{odnosno} \quad v_x^2 \neq v_x \cdot |\vec{v}|$$

gdje je  $\vec{v}$  općenito neki dvodimenzionalni vektor. Pojašnjenje ovoga dano je na Sl. 2.2.2.1.3.1 na kojoj su prikazane sile otpora  $\vec{F}_D$  izračunate na temelju izraza (3) i (5), te sile  $\vec{F}_D$  izračunate na temelju izraza (9) i (11), u određenom vremenu  $t$  i dubini  $z$ .

Prema gornjoj Sl. 2.2.2.1.3.1, vidljivo je da se primjenom izraza (3) i (5) za određivanje sila otpora čini određena pogreška:

$$\vec{E} = \vec{F}_{D(9)(11)} - \vec{F}_{D(3)(5)}$$

čije komponente su jednake:

$$E_x = F_{Dx(9)} - F_{Dx(3)}$$

$$E_z = F_{Dz(11)} - F_{Dz(5)}$$

Može se dakle zaključiti da ukoliko je doprinos sile otpora ukupnom hidrodinamičkom opterećenju značajan ili dominantan, potrebno je za analizu spomenutog opterećenja koristiti predloženi vektorski oblik Morisonove jednadžbe.

### 2.2.2.1.3.2 Sila hidrodinamičkog uzgona na podmorski horizontalni valjak uslijed nestacionarnih gibanja vodnih čestica pobuđenih valovima

Ovu silu od valova uobičajeno je zbog njene kompleksnosti analizirati odvojeno od sile otpora i sile inercije. Po tipu pripada u sile otpora. U funkciji je kvadrata brzine gibanja vodnih čestica pobuđenog valovima. Ako se promatra cijev izdignutu  $z$ [m] iznad dna (Sl. 2.2.2.1.3.:2) onda gibanje vodnih čestica ima vertikalnu  $v_x(z,t)$  i horizontalnu  $v_z(z,t)$  komponentu brzine. Kako je tada sila hidrodinamičkog uzgona posljedica sukcesivnog otkidanja vrtloga na gornjem i donjem, ili prednjem i stražnjem, rubu cijevi to se sile hidrodinamičkog uzgona javljaju naizmjenično u oba horizontalna  $\pm F_{L,x}(z,t)$  i oba vertikalna  $\pm F_{L,z}(z,t)$  smjera. Te komponente na 1m' cjevovoda (cijevi) iznose:

$$F_{L,x}(z,t) = \pm \frac{1}{2} \rho C_L D v_z^2(z,t) \text{ [N/m]}$$

$$F_{L,z}(z,t) = \pm \frac{1}{2} \rho C_L D v_x^2(z,t) \text{ [N/m]}$$

gdje je:

$F_{L,x}(z,t)$ [N/m]	horizontalna komponenta sile hidrodinamičkog uzgona
$F_{L,z}(z,t)$ [N/m]	vertikalna komponenta sile hidrodinamičkog uzgona
$v_x(z,t)$ [m/s]	horizontalna komponenta brzine
$v_z(z,t)$ [m/s]	vertikalna komponenta brzine
$\pm C_L$	koeficijent hidrodinamičkog uzgona.

#### 2.2.2.1.4 Sile na podmorski cjevovod položen na morsko dno od istovremenog djelovanja stacionarne morske struje i nestacionarnih gibanja vodnih čestica pobuđenih valovima

Ovdje će se prikazati kako se tekovine idealiziranih modela iz gornjih teorijskih razmatranja značajno izdignutog vitkog fiksnog podmorskog horizontalnog valjka primijenjuju na realnu inženjersku situaciju pridnenog cjevovoda.

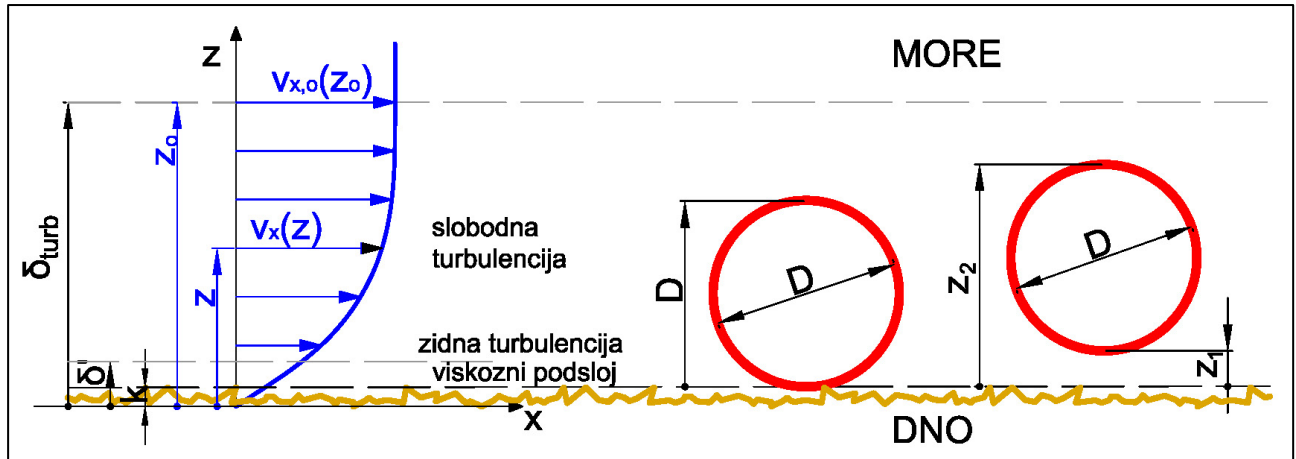
##### 2.2.2.1.4.1 Utjecaj pridnenih brzina gibanja vodnih čestica pobuđenih morskom strujom i valovima na cjevovod

Pridnene brzine horizontalnih gibanja vodnih čestica (uz morsko dno) od struje i valova dominantno utječu na horizontalnu silu otpora i veretikalnausila hidrodinamičkog uzgona na podmorski cjevovod kako je pokazano u prethodnim poglavljima. Tamo je uzeto da su spomenute brzine konstantne po vertikali u zoni debljine cijevi. No u pridnenom sloju vode (debljine otprilike veličine vanjskog promjera podmorskog cjevovoda  $D[m]$ ) vertikalni profili horizontalnih brzina od struje i valova, uzrokovan turbulentnim graničnim slojem uz samo dno, nije konstantan nego naglo pada prema na ništici na dnu ( Sl. 2.2.2.1.4.1::1). Dan je eksponencijalnim zakonom razdiobe horizontalnih brzina unutar graničnog sloja:

$$\frac{v_x(z)}{v_{x_0}(z_0)} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\frac{1}{7}}; \text{ odnosno } v_x(z) = v_{x_0}(z_0) \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\frac{1}{7}}$$

gdje su:

$z [m]$	udaljenost od dna
$D [m]$	vanjski promjer cijevi
$z_0 [m]$	udaljenost od dna točke na kojoj je poznata (izmjerena ili teoretski određena) brzina gibanja vodnih čestica; na pr. na gornjem ruba cijevi $z_0=D$
$v_x(z) [m/sek]$	brzina gibanja vodnih čestica graničnom sloju u točki $z$ udaljenoj od dna
$v_{x,0}(z_0) [m/sek]$	poznata (izmjerena ili teoretski određena ) brzina gibanja vodnih čestica u graničnom sloju u točki $z_0$ iznad dna.



Sl. 2.2.2.1.4.1::1 Vertikalni profil horizontalnih brzina gibanja vodnih čestica u turbulentnom graničnom sloju na morskom dnu debljine  $\delta_{\text{turb}}$ ;  $\delta'$ -debljina viskoznog podsloja,  $k$ -apsolutna hrapavost dna

Zbog toga će na cijev djelovati promjenjiva horizontalna brzina vodnih gibanja čestica koja se daje zamijeniti t. zv. efektivnom brzinom „ $v_{x,\text{ef}}$ “ koja se uzvodi iz prosječnog kvadrata horizontalne brzine. unutar pridnenog vodnog sloja debljine vanjskog promjera cijevi  $D$ [m]. Takav se princip primjenjuje zato jer kvadrat brzine figurira u formulama za sile otpora. Njome se uzima u obzir smanjenje brzine u graničnom sloju. Ako je cijev smještena direktno na morskom dnu fektivna brzina se računa po izrazu:

$$v_{x,\text{ef}}^2 = \frac{1}{D} \int_0^D v_x^2(z) dz$$

$$v_{x,\text{ef}}^2 = \frac{7}{9} \cdot \frac{v_{x_0}^2(z_0)}{D \cdot z_0^{2/7}} \cdot D^{9/7}$$

$$v_{x,\text{ef}} = \sqrt{\frac{7}{9} \cdot \frac{v_{x_0}^2(z_0)}{D \cdot z_0^{2/7}} \cdot D^{9/7}} \text{ [m/s]}$$

Ako je cijev izdignuta  $z_1$ [m] iznad morskog dna opteživačima efektivna brzina se određuje kao:

$$v_{x,\text{ef}}^2 = \frac{1}{D} \int_{z_1}^{z_2} v_x^2(z) dz$$

$$v_{x,\text{ef}}^2 = \frac{7}{9} \cdot \frac{v_{x_0}^2(z_0)}{D \cdot z_0^{2/7}} \cdot [z_1^{9/7} - z_2^{9/7}]$$

gdje su:

$$z_1[\text{m}] \quad \text{udaljenost od dna donjeg ruba cijevi [m]}$$

$$z_2 = z_1 + D[\text{m}] \quad \text{udaljenost od dna gornjeg ruba cijevi [m]}$$

Efektivna brzina može se primijeniti i na gibanja vodnih čestica morske struje i na horizontalna gibanja vodnih čestica pobuđena valovima. U proračunima horizontalnog gibanja vodnih čestica pobuđenog valovima kao točka  $z_0$  uzima se gornji rub cijevi, a brzina u njoj se izračunava Airy-evom teorijom. Efektivna brzina gibanja vodnih čestice manja je od brzine na gornjem rubu cijevi. Jasno je da će određivanje horizontalne sile otpora i veretikalne sila hidrodinamičkog uzgona na podmorski cjevovod biti na strani sigurnosti ako se one izračunaju s vrijednostima brzina gibanja vodnih čestica na razini gornjeg ruba cijevi umjesto s efektivnom brzinom.

Sila hidrodinamičkog uzgona najčešće je inženjerski interesantna pri opstrujavanju cjevovoda položenog na morskom dnu. Tada je posljedica ritmičkog odvajanja virova (t.j. separacije graničnog sloja) na gornjem rubu cijevi, i asimetričnog strujanja zbog smještaja cjevovoda blizuorskog dna. Općenito je različita od sile dinamičkog uzgona uslijed gore objašnjene simetričnog strujanja, oko značajno izdignute cijevi, kada se dešava samo naizmjenično sukcesivno odvajanje graničnog sloja. I asimetrija strujanja proizvodi silu hidrodinamičkog uzgona, koja može poprimiti relativno velike vrijednosti ako je malen razmak izmeđuorskog dna i cjevovoda. Dakle treba koeficijentima sila razlikovati silu na cijev položenu direktno na morsko dno i izdignutu cijev; na pr. opreživačima. U slučaju kontakta cjevovoda iorskog dna sila hidrodinamičkog uzgona uvijek je usmjerena od dna prema gore. Međutim, ako postoji i najmanji razmak, tada trenutna sila dinamičkog uzgona djeluje i prema dnu. Dakle, cjevovod koji se nalazi na morskom dnu, ili se nalazi iznad njega u slobodnom strujanju, može biti izdizan (pozitivna vrijednost koeficijenta  $C_L$ ) ili potiskivan (negativna vrijednost koeficijenta  $C_L$ ) zbog sile dinamičkog uzgona.

#### 2.2.2.1.4.2 Interakcija valova i morske struje

Interakcija valova i morske struje dešava se kod horizontalne komponente brzine; t.j. stacionarna horizontalna brzina morske struje  $v_{S,x}$  superponira se s alternativnom horizontalnom komponentom brzine vodnih čestica  $\pm v_x(z,t)$  pobuđenom valnim gibanjem dajući ukupnu horizontalnu brzinu opstrujavanja horizontalnog cjevovoda:

$$v_{x,uk}(z,t) = v_{S,x} \pm v_x(z,t).$$

Ta brzina uzrokuje ukupnu silu otpora:

$$F_{D,x,uk}(z,t) = \frac{1}{2} \rho C_D v_{x,uk}(z,t) |v_{S,x,uk}(z,t)| = \frac{1}{2} \rho C_D [v_{S,x} \pm v_x(z,t)] |v_{S,x} \pm v_x(z,t)| \text{ [N/m]}$$

i silu hidrodinamičkog uzgona:

$$F_{L,z,uk}(z,t) = \frac{1}{2} \rho C_L D v_{x,uk}^2(z,t) = \frac{1}{2} \rho C_L D [v_{S,x} \pm v_x(z,t)]^2 \text{ [N/m']}$$

U praksi sila otpora podmorskog cjevovoda od morske struje  $F_{D,S,x}(z,t)$  i sila otpora  $F_{D,x}(z,t)$  od valova može se izračunati zasebno; t. j. prva od horizontalne brzine vodnih čestica  $v_{S,x}$  uslijed morske struje i druga od horizontalne brzine vodnih čestica  $\pm v_x(z,t)$  uslijed valova. No može se istovrijedno izračunati i ukupna sila otpora koristeći ukupnu horizontalnu brzinu opstrujavanja cjevovoda  $v_{x,uk}(z,t)$ . Isto vrijedi i za silu hidrodinamičkog uzgona.

#### 2.2.2.1.4.3 Koeficijenti sila (otpora $C_D$ , inercije $C_I$ , hidrodinamičkog uzgona $C_L$ )

U izrazima danim u prethodnom poglavlju prikazani su koeficijenti pojedinih sila, potrebni da bi se moglo točno izračunati hidrodinamičko opterećenje na uronjeni podmorski cjevovod. Za slučaj dvodimenzionalnog valnog strujanja koeficijenti sila se mogu izraziti u funkciji sljedećih bezdimenzionalnih parametara:

$$C_D, C_I, C_L = f(\text{Re}; KC; \frac{c}{D}; \beta; \frac{\varepsilon}{D}; \alpha; \frac{\delta}{D}; \Omega; \frac{t}{T})$$

gdje je:

$$\text{Re} = \text{Raynoldsov broj} = \frac{v_{x,max} \cdot D}{\nu} \text{ ili } \frac{v_{z,max} \cdot D}{\nu}$$

$\nu$  = kinematički koeficijent viskoznosti tekućine

$$KC = \text{Keulegan-Carpenterov broj} = \frac{v_{x,max} \cdot T}{D}; \frac{v_{z,max} \cdot T}{D}$$

$T$  = valni period

$c$  = udaljenost od najniže točke cjevovoda do dna mora

$$\beta = \text{parametar frekvencije} = \frac{\text{Re}}{KC}$$

$\varepsilon$  = apsolutna hrapavost vanjske stijenke cjevovoda

$\alpha$  = kut između valne fronte i trase cjevovoda

$\delta$  = debljina graničnog sloja

$$\Omega = \text{odnos maksimalnih vrijednosti orbitalnih brzina} = \frac{V_{z,max}}{V_{x,max}}$$

$t$  = parametar vremena

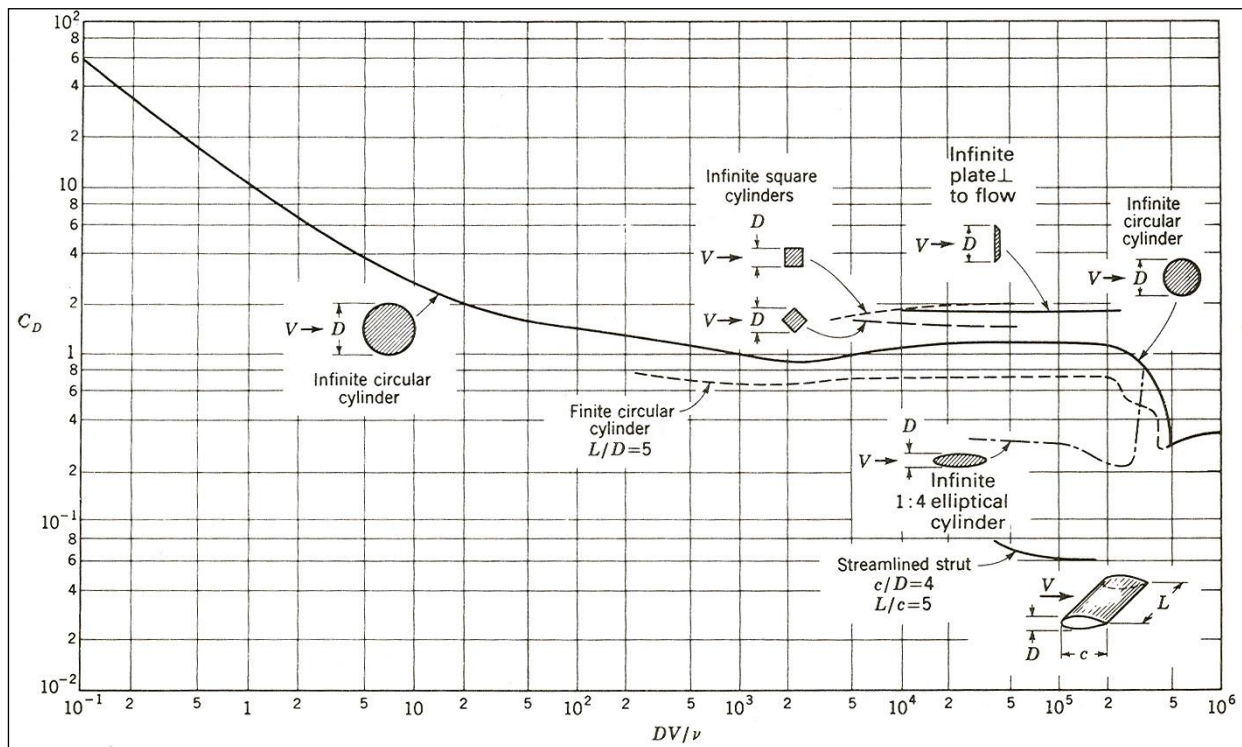
U današnjoj literaturi koja se bavi ovom problematikom, postoji niz eksperimentalnih podataka o koeficijentima sila, dobivenih na temelju obrade vlastitih ili publiciranih rezultata eksperimenata raznih autora. U tablici 2.2.2.1.4.3:1 prikazane su maksimalne



vrijednosti koeficijenata  $C_{D \max}$ ,  $C_{l \max}$ ,  $\pm C_{L \max}$  u funkciji pripadnih vrijednosti baznih parametara prema raznim autorima.

AUTOR	MAX. VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA		PARAMETAR					
			$Re \cdot 10^5$	KC	c/D	$\beta$	$\epsilon/D$	$\alpha$
T. Sarpkaya	$C_{D \max}$	2,0	$\leq 0,10$	40,00	0,100	$\leq 250$	0,000	90°
		0,85	2,00			5000		
	$C_{l \max}$	1,20	0,15			375		
		2,00	2,00			5000		
	$C_{L \max}$	$\pm 4,29$	$< 0,10$			$< 250$		
		1,00	$> 5,00$			$> 1250$		
-0,30	0							
C.C.Teng	$C_{D \max}$	1,20	0,50	$< 5,00$	3,500	$> 1000$	0,000	
		0,60	1,20	13,00-25,00		0		
		0,80				4800-8000	0,020	
	$C_{l \max}$	1,60	0,55	2200-3700		0,000		
$C_{L \max}$	-	-	-	-	-	-		
J.C. Wright	$C_{D \max}$	2,00	1,00-1,58	$< 12,50$	0,042	$> 8000$	0,000	
	$C_{l \max}$	3,47	0,60-1,78	$< 15,50$	0,000	$> 3870$		
	$C_{L \max}$	-5,26	0,30-1,82	$< 17,00$	0,042	$> 2940$		
		2,56	0,30-1,81	$< 13,30$		$> 1935$		
D.S.Graham	$C_{D \max}$	2,00	$< 0,10$	-	$> 1,000$	-	0,000	
		0,62	$> 7,00$					
	$C_{l \max}$	2,00	$< 0,10$	-	-	-		
	$C_{L \max}$	3,20	0,20	15,00	-	1330		
$\pm 1,50$		126,00		160				
M.B.Bryndum	$C_{D \max}$	2,40	1,00-10,00	12,00	$> 1,000$	$> 8350$	$\leq 0,005$	
	$C_{l \max}$	5,00		$> 50,00$		$< 2000$		
	$C_{L \max}$	4,00		$< 8,00$		0		
						$\leq 1250$		
						00		

Tablica 2.2.2.1.4.3.:I      Maksimalne vrijednosti koeficijenta dinamičkih sila u funkciji  
 pripadnih vrijednosti baznih parametara



Sl. 2.2.2.1.4.3.:1      Koeficijent otpora  $C_D$  u funkciji Reynoldsovog broja  $Re=vD/\nu$  (stacionarno strujanje morske struje) i  $Re=v_{\max}D/\nu$  (nestacionarno strujanje vodnih čestica kod morskih valova) za tijela nekih oblika u simetričnom opstrujavanju (značajno izdignuta iznad dna) **Eva: IZVOR?**

Breastup, M. W.: Design and Installation of Marine Pipelines; Blackwell Science LTD, Oxford 2005  $\rightarrow$ :

The three force coefficients,  $C_D$ ,  $C_M$  and  $C_L$ , depend on a number of parameters, for example, the relative pipe roughness ( $k/D$ ), the relative amplitude of water motion (or the Keulegan–Carpenter number,  $KC$ ), and the ratio between the steady current and the wave velocity. The force coefficients  $C_D$  and  $C_L$  are presented in Figures 4.4 to 4.7. The coefficients presented give the best overall fit between forces measured experimentally and forces calculated using the above equations. Practical experience has shown that the use of the theoretical value  $C_M = 3.29$  for the inertia coefficient results in adequate accuracy in the force calculations. Therefore, it is recommended that  $C_M = 3.29$  be used for all pipelines resting on the seabed.

The force coefficients have been found experimentally as presented in September 1993 by the American Gas Association (AGA, now PRCI) *Submarine pipeline on-bottom stability, Volume 1, Analysis and design guidelines*, see also Bryndum *et al.* (1992).

The force coefficients are plotted as functions of:

KC	Keulegan–Carpenter number ( $U_w T/D$ )
T	wave period
$\alpha$	current to wave ratio ( $U_c/(U_c + U_w)$ )
k/D	non-dimensional pipe roughness.

Smooth pipe corresponds to a roughness  $k/D \approx 10^{-3}$ , rough pipe to  $k/D \approx 10^{-2}$ .

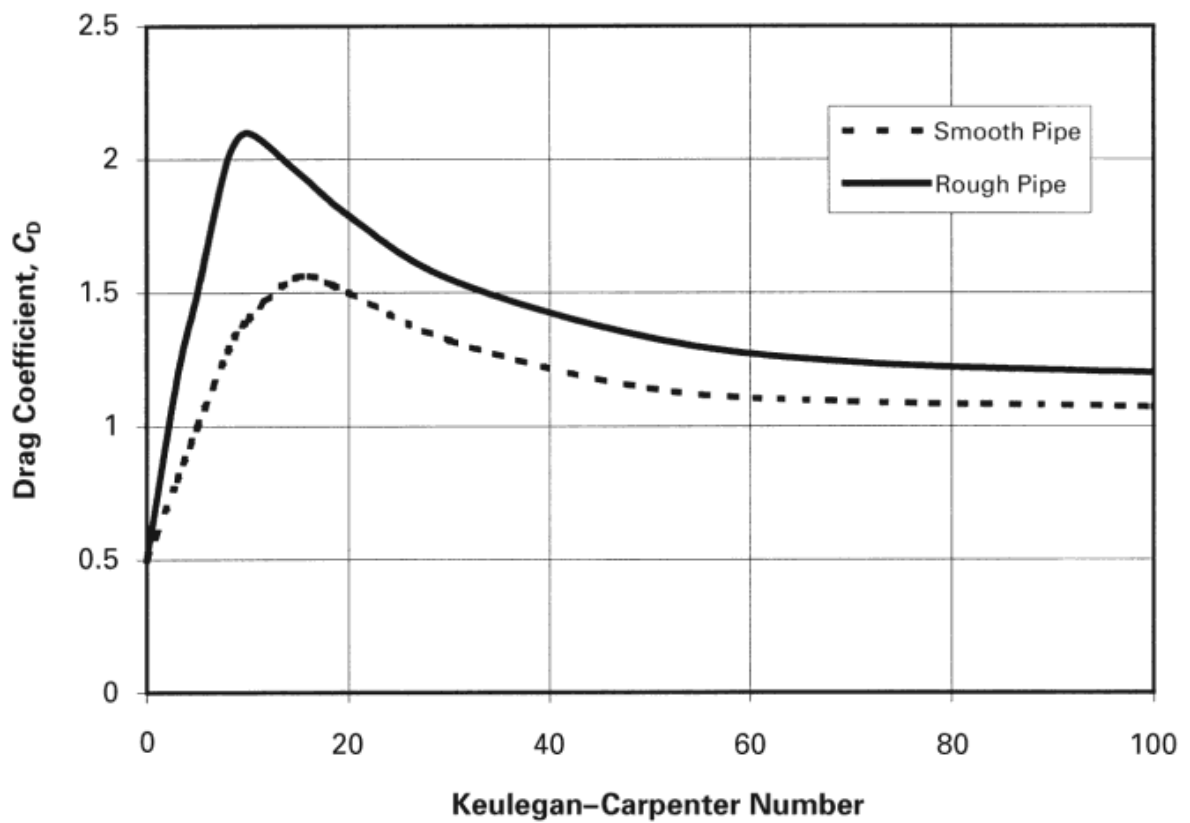


Figure 4.4 Drag coefficient against Keulegan-Carpenter number – pure wave flow

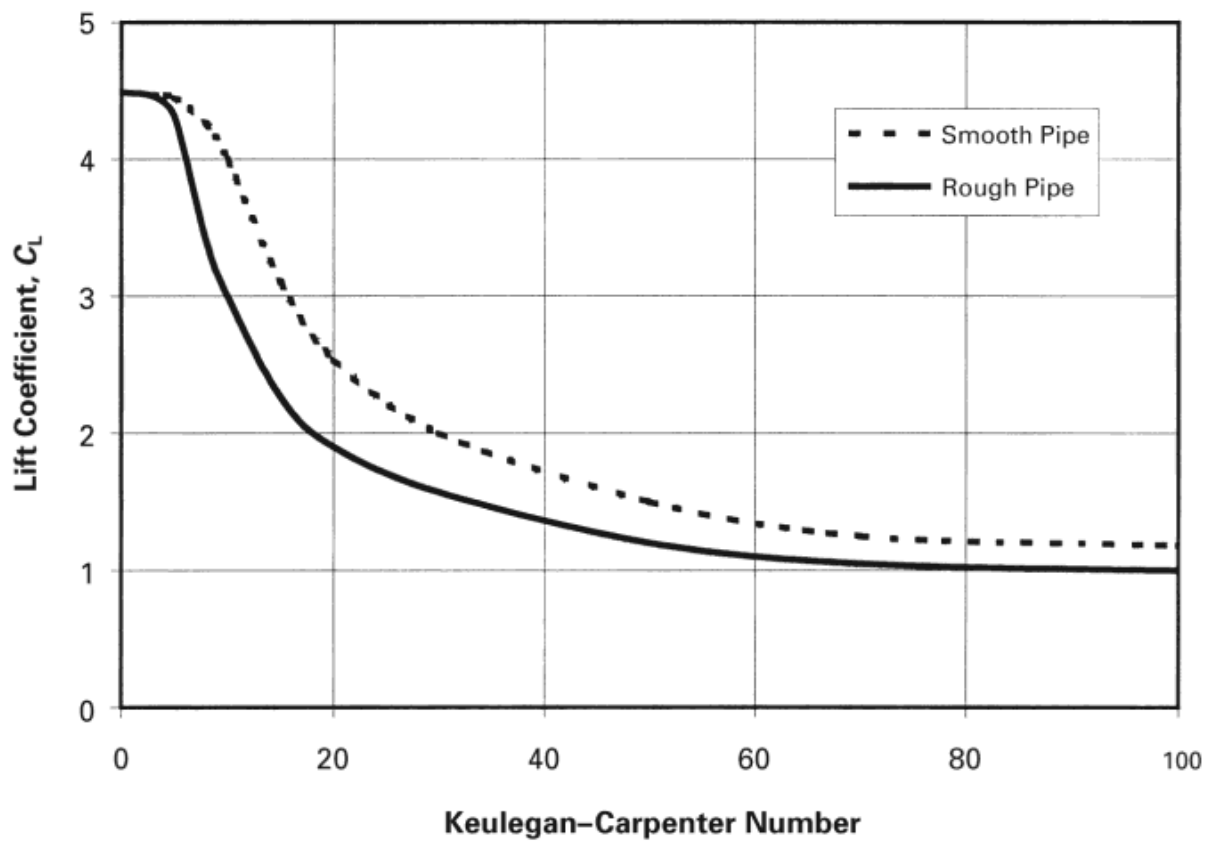
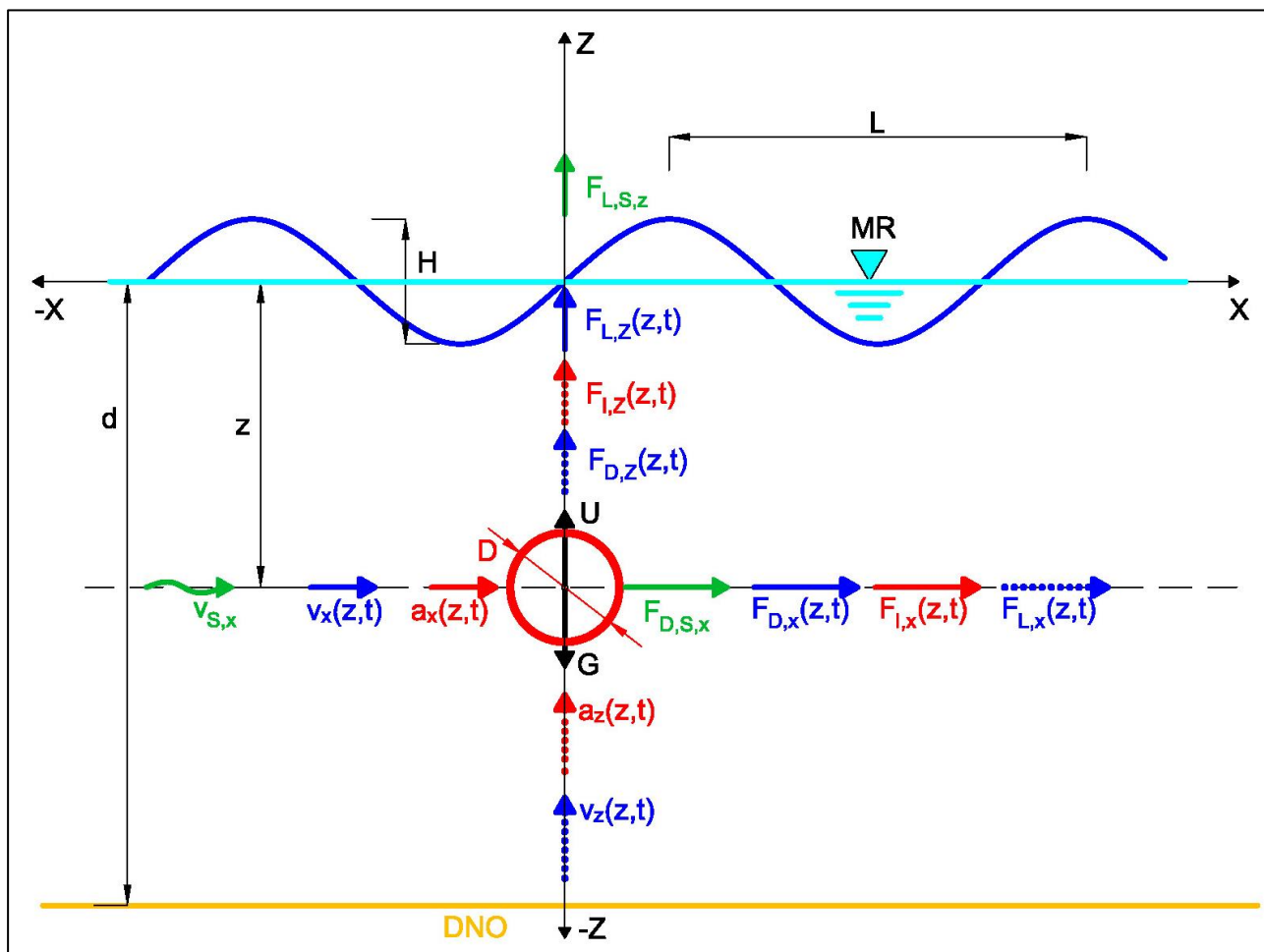


Figure 4.5 Lift coefficient against Keulegan-Carpenter number – pure wave flow



- sile otpora  $F_{D,x}(z,t)[N]$  i  $F_{D,z}(z,t)[N]$  horizontalna i vertikalna
- sile inercije  $F_{I,x}(z,t)[N]$  i  $F_{I,z}(z,t)[N]$  horizontalna i vertikalna
- sile dinamičkog uzgona  $F_{L,x}(z,t)[N]$  i  $F_{L,z}(z,t)[N]$  horizontalna i vertikalna.



Sl. 2.2.2.1.4::1 Definijska skica za hidrodinamičke sile kod opstrujavanja horizontalnog uronjenog valjka stacionarnom morskom strujom brzine  $V_{S,x}$  i istovremenim nestacionarnim valnim djelovanjima vodnih čestica; t. j. brzinama  $v_x(z,t)$  i  $v_z(z,t)$ , te ubrzanjima  $a_x(z,t)$  i  $a_z(z,t)$

Tu treba napomenuti da su uzročnice sila otpora, sila inercije i sila hidrodinamičkog uzgona od djelovanja valova: brzine i ubrzanja vodnih čestica promjenjive po vremenu „t“ nemaju istovremene maksimume. Shodno tome ni sile otpora, sile inercije i sile hidrodinamičkog uzgona nemaju istovremene maksimume, a ni trenutak njihovog nastupa nije unaprijed poznat. Inženjerski izlaz iz tog problema, kod pravilnog idealnog vala, je da se načini proračun istovremenih valnih sila otpora, inercije i hidrodinamičkog uzgona (posebno za horizontalni - x, i posebno za vertikalni - z smjer) za diskretni niz trenutaka kroz jedan cijeli valni period, te da se nađe maksimum njihovog zbroja po smjerovima. Taj onda određuje i trenutke nastanka maksimalnog valnog opterećenja na valjak po smjerovima. U nekim konstruktivnim proračunima relevantna su valna opterećenja samo x

ili samo z smjera, pa se onda uzmu maksimalne vrijednosti zbroja sile otpora, sile inercije i hidrodinamičkog uzgona za jedan od ta dva smjera. No u nekim konstruktivnim proračunima uključena su valna opterećenja i x i z smjera. Tada treba analizirati odziv konstrukcije po vremenu i za pojedine konstruktivne elemente tražiti najnepovoljnija djelovanja sila otpora i sila inercije koji će se desiti u raznim trenucima.

### 2.2.2.2 Hidrostatičke i hidrodinamičke sile na vertikalno koljeno podmorskog cjevovoda

Razmatraju se samo ona koljena cjevovoda kod kojih su ove sile usmjerene prema gore.

### 2.2.3 Potresna djelovanja na podmorski cjevovod (EN 1998-4:2006 (E))

Na pridneni podmorski cjevovod djeluju direktni i indirektni rizici:

- pomaci uslijed potresne sile cjevovoda uzrokovane potresnim gibanjem prenesenim s tla na njegove oslonce i
- diferencijalni pomaci oslonaca cjevovoda u slijedećim okolnostima:
  - za oslonce koji su direktno na tlu značajni diferencijalni pomaci su mogući samo ako se desi slom tla i/ili stalna deformacija,
  - za oslonce koji su smješteni na različitim konstrukcijama diferencijalne pomake cjevovoda mogu proizvesti seizmički odzivi samih konstrukcija.

**Potresna sila** – horizontalna komponenta izračunava se kao

$$F_b = W \cdot S_d(T) = a_g \cdot S \cdot f(T)$$

gdje je:

$F_b$ [N]	horizontalna potresna sila (nazovistatička)
$W$ [kg]	ukupna masa konstrukcije koja titra (vlastita masa + pridružena masa vode)
$S_d(T)$ [ $m/s^2$ ]	spektralno ubrzanje proračunskog spektra koje odgovara osnovnom periodu oscilacija konstrukcije
$a_g$ [ $m/s^2$ ]	proračunsko ubrzanje tla za relevantnu potresnu zonu i za referentni povratni period
$T$ [s]	period titranja sustava s jednim stupnjem slobode razmatrane konstrukcije
$S$	koeficijent tipa tla (za tip tla A $S=1$ , za tip tla B $S=1$ za tip tla C, $S=0,9$ )

f(T) funkcija elastičnog odziva za razna područja  $T_B$ ,  $T_C$ , i  $T_D$  perioda titranja konstrukcije

U proračune se uzimaju samo 3 pomičuće komponente potresnog djelovanja dok se momenti rotacije zanemaruju. Gore je dana poprečna komponenta a vertikalna i uzdužna su neki dio poprečne.

**Diferencijalni pomaci cjevovoda** različiti su za cjevovod položen direktno na tlu i položen na osloncima.

Ako je cjevovod položen direktno na tlu morskog dna diferencijalni pomaci se mogu zanemariti osim ako se mogu desiti stalni pomaci ili slom tla (likvefakcija, klizište, ...). Pomaci se tada određuju primjerenim tehnikama.

Ako je cjevovod smješten na osloncima različitim konstrukcijama diferencijalni pomaci cjevovoda određuju se analizom seizmičkog odziva cjevovoda, ili pojednostavljenim anvelopnim pristupom.

#### Literatura:

- [] Vuković, Ž.; Kuspilic, N.: Opterećenje podmorskih cjevovoda nepravilnim valovima i morskom strujom, Građevinar 49, Zagreb, 1997.
- [] Vuković, Ž.: Hidrodinamičko opterećenje horizontalnih cilindričnih elemenata pomorskih konstrukcija, Vodoprivreda br. 21, Beograd, 1989.
- [] Vuković, Ž.: Analiza hidrodinamičkog opterećenja podmorskih cjevovoda, Građevinar br. 41, Zagreb, 1989.
- [] Kostrenčić, Z.: Polaganje savitljivih cijevi na morsko dno-modelsko ispitivanje, Građevinar, 1975.
- [] ASCE: Ocean wave kinematics, dynamics and loads on structures, American Society of Civil Engineers, 1998.
- [] ASCE: Wave forces on cylinders near plane boundary, American Society of Civil Engineers, Proceeding, Harbour and coastal division vol. 100, New York, 1974.
- [] Jun Zhang: Ocean wave kinematics, dynamics and loads on structures, Huston, Texas 1998.,
- [] Gerwick, Ben C.: Construction of marine and offshore - 2nd.ed., CRC Press, Boca Raton- Florida- USA, 2000.
- [] Braestrup, M. W; et al., Design and installation of marine pipelines /. – 1st ed. Blackwell Science Ltd, Oxford UK, Ames-Iowa USA, Carlton-Victoria Australia, 2005
- [] Bathe, K. J.: Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice Hall inc. Englewood-New Jersey, USA, 1982.
- [] Chakrabarti, S. K.: Handbook Of Offshore Engineering, Vol I, Elsevier, Oxford UK, Amsterdam NL, 2005.
- [] Chakrabarti, S. K.: Handbook Of Offshore Engineering, Vol II, Elsevier, Oxford UK, Amsterdam NL, 2005.
- [] Kyriakides, S, Corona E.: Mechanics of Offshore Pipelines - Vol. I, Buckling and Collapse, Elsevier, Oxford UK, 2007.
- [] Mouselle, A. H.: Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods, Penn Well Books, Tulsa – Oklahoma USA
- [] Boyun, G., Shanhong S., Chacko, J, Ghalambor A.: Offshore Pipelines, Elsevier, Burlington - MA USA, Oxford UK, 2005.
- [] Bai, Y.: Subsea Pipelines and Risers, Elsevier, Oxford UK, 2001.
- [] Bai, Y., Bai, Q.: Pipelines and Risers, Elsevier, Oxford UK, 2005.
- [] CIRIA, CUR, CETMEF: The rock manual, The use of rock in hydraulic engineering, 2nd edition, CIRIA Publication 0683, London 2006.



- [] DNV: Submarine Pipeline Systems, Submarine Pipeline Systems, Det Norske Veritas, Høvik-Norway, 2007.
- [] EN: Potresni proračun konstrukcija otpornih na potres – Silosi, rezervoari i cjevovodi, EN 1998-4, 2006.

## 2.3 STABILNOST PODMORSKOG CJEVOVODA NA MORSKOM DNU

### 2.2.9 Proračun stabilnost cijevi na morskom dnu

Proračun stabilnosti razmotrit će se na shematskim prikazima, Sl. 2.2.9.1::1 i slijedeće, na kojima se vide komponente brzina i ubrzanja vodnih čestica i sve sile koje djeluju na cjevovod. Vertikalna brzina i vertikalno ubrzanje na dnu su zanemarivo male, pa se i sile koje one uzrokuju ispuštaju.

Stabilnost cjevovoda na dnu mora bit će zagarantirana ako se on ne može horizontalno pomaknuti, ako se ne može vertikalno podignuti s dna (isplivati) i ako se ne može prevrnuti.

Kod izračunavanja karakterističnih hidrodinamičkih sila od valova  $F_{D,X}^K(d,t)$   $F_{L,Z}^K(d,t)$  i  $F_{I,X}^K(d,t)$ , uzrokovanih brziom i ubrzanjem vodnih čestica  $v_X(z,t)$  i  $a_X(z,t)$  u smjeru osi "X" od valova (vidi Sl. 2.2.9.1::1), u praksi se umjesto njihovih "X" komponenti može uzeti njihova horizontalna komponenta zbog obično malog nagiba morskog dna  $\beta$ . To ne čini gotovo nikakvu grešku, a pojednostavljuje proračun hidrodinamičkih sila  $F_{D,X}^K(d,t)$   $F_{L,Z}^K(d,t)$  i  $F_{I,X}^K(d,t)$ .

#### Str. 14 4.3 Design Criteria AGIP

##### 4.3.1 Lateral Stability

The on-bottom stability analysis has been performed according to the methods and criteria set forth in Ref /B2/ DNV: RP E305 "On Bottom Stability Design of Submarine Pipelines", October 1988. DNV= Det Norske Veritas

As stated in Ref./B2/ the following pipeline condition has to be analysed:

- Installation condition (empty pipe);
- Operating condition.

With reference to the **pipeline installation condition** (Ref./B2/), the environmental loads relevant to the following wave and current combination shall be analysed:

- 1 year return period for wave – 1 year return period for current (for no trenched pipeline);
- 3 months return period for wave – 3 months return period for current (for trenched pipeline).

With reference to the **pipeline operating condition** (Ref./B2/), the environmental loads relevant to the most severe wave and current combination, between the following, shall be analysed:

- 100 years return period for wave – 10 years return period for current;
- 10 years return period for wave – 100 years return period for current.

#### Str. 15 4.3.3 Drag, Lift and Inertia coefficients

As stated in Ref/B4/, the **drag coefficient** to be used for the "simplified method" is calculated on

the basis of Reynolds number:  $Re=UD/\mu$ , with  $\nu = 1.01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $U$ ...brzina struje.

**Inertia and lift coefficients** have to be set equal to **3.29** and **0.9** respectively (see Appendix A of Ref./B4/ DNV1976: "Rules for the Design, Construction and Inspection of Submarine Pipelines and Risers". DNV= Det Norske Veritas).

Str. 21 do 23:  $C_D=1,3$ ,  $C_L=0,9$ ,  $C_M=3,29$

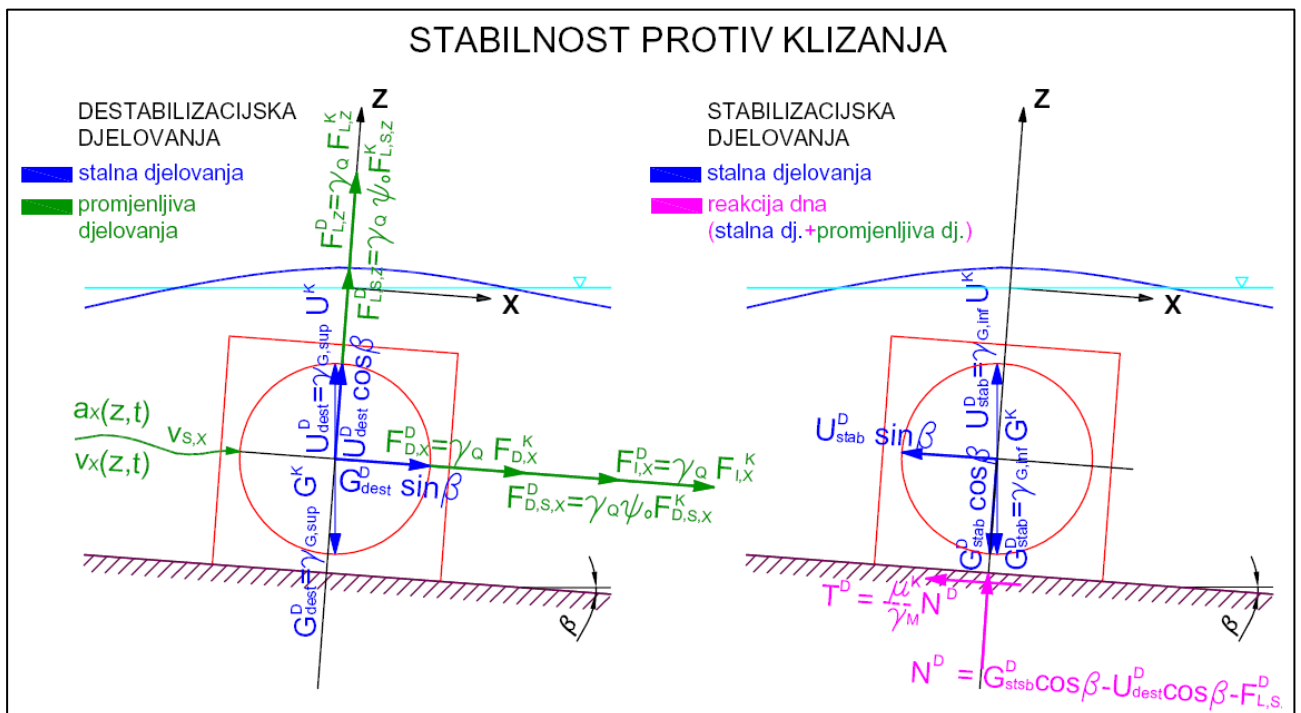
Str. 21 do 23:  $\mu=0,7$ ,  $\varphi =35^\circ$

Str. 24: Redukcija brzine vod. čest. od struje u fazi gradnje kad je cijev u nezatrpanom rovu  $R_C=0,5$

Str. 24: Redukcija brzine vod. čest. od vala u fazi gradnje kad je cijev u nezatrpanom rovu  $R_W=0,5$

### 2.2.9.1 Provjera sigurnosti protiv klizanja

Obavlja se provjerom kriterija horizontalne stabilnosti sila koje djeluju na cjevovod koji leži na dnu bez ikakvog ukopavanja prema slici 2.2.9.1::1, a koji glasi: sile koje djeluju na horizontalni pomak moraju biti manje od sila koje se tome odupiru! To se izražava matematički kao:



Sl. 2.2.9.1::1 Shematski prikaz brzina i ubrzanja vodnih čestica, te sila koje djeluju na cjevovod kod analize klizanja za slučaj kada je valno djelovanje prevladavajuće promjenljivo djelovanje

$$\sum X \rightarrow E_{X,dest}^D \leq E_{X,stab}^D \quad (1)$$

$$G_{dest}^D \sin\beta + F_{D,S,X}^D + F_{D,X}^D(d,t) + F_{I,X}^D(d,t) \leq U_{stab}^D \sin\beta + T^D$$

gdje su:

$E_{X,dest}^D$ [Nm']	proračunske vrijednosti učinka destabilizacijskih djelovanja
$E_{X,stab}^D$ [Nm']	proračunske vrijednosti učinka stabilizacijskih djelovanja
$G_{dest}^D = \gamma_{G,sup} G^K$ [Nm']	proračunska vrijednost destabilizacijskog učinka vlastite težina cijevi
$G^K$ [Nm']	karakteristična vrijednost vlastite težina cijevi koju čini težina cijevi i opteživača, te težina vode u cijevi
$F_{D,S,X}^D = \gamma_{Q1} \psi_0 F_{D,S,X}^K$ [Nm']	proračunska vrijednost destabilizacijskog učinka sile otpora od m. struje
$F_{D,S,X}^K$ [Nm']	karakteristična vrijednost sile otpora uslijed strujanja vodnih čestica od m. struje
$F_{DX}^D(d,t) = \gamma_{Q1} F_{DX}^K(d,t)$ [Nm']	proračunska vrijednost destabilizacijskog učinka sile otpora od vala
$F_{DX}^K(d,t)$ [Nm']	karakteristična vrijednost sile otpora uslijed strujanja vodnih čestica od vala
$F_{IX}^D(d,t) = \gamma_{Q1} F_{IX}^K(d,t)$ [Nm']	proračunska vrijednost destabilizacijskog učinka sile inercije od vala
$F_{IX}^K(d,t)$ [Nm']	karakteristična vrijednost sile inercije uslijed strujanja vodnih čestica od vala
$U_{stab}^D = \gamma_{G,inf} U^K$ [Nm']	proračunska vrijednost stabilizacijskog učinka hidrostatičkog uzgona
$U^K$ [Nm']	karakteristična vrijednost hidrostatičkog uzgona dgovara sili uzgona vanjskog volumena cijevi i opteživača
$T^D$ [Nm']	proračunska vrijednost učinka sile trenja cijevi s opteživačima na dnu
$\beta$ [°]	nagib morskoga dna

$$uz \quad T^D = \frac{\mu^K}{\gamma_M} N^D$$

$\mu^K = \text{tg}(1/3 \text{ do } 2/3 \varphi'_k)$  karakteristična vrijednost trenja između cijevi s opteživačima i tla na morskom dnu

$\varphi'_k$  [°] karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja tla morskog dnu

$\gamma_M=1,1$	parcijalni koeficijent materijala za tg $\varphi'_k$ kod proračuna stabilnosti HRN ENV 1997-1,15
$N^D$ [Nm']	proračunska vrijednost učinka normalne reakcija dna uslijed djelovanja cijevi s opteživačima na dno

$$G_{dest}^D \sin\beta + F_{D,S,X}^D + F_{D,X}^D(d,t) + F_{I,X}^D(d,t) \leq U_{stab}^D \sin\beta + \frac{\mu^K}{\gamma_M} N^D \dots\dots\dots (1)$$

Radi proračuna sile trenja  $T^D$ , koja ovisi o normalnoj reakciji dna  $N^D$  postavlja se jednadžba ravnoteže sila normalno na liniju dna:

$$\sum Z \rightarrow N^D = G_{stab}^D \cos\beta - U_{dest}^D \cos\beta - F_{L,S,Z}^D - F_{L,Z}^D(d,t) \dots\dots\dots (2)$$

gdje je:

$G_{stab}^D = \gamma_{G,inf} G^K$ [Nm']	proračunska vrijednost stabilizacijskog učinka vlastite težine cijevi i opteživača
$U_{dest}^D = \gamma_{G,sup} U^K$ [Nm']	proračunska vrijednost destabilizacijskog učinka hidrostatičkog uzgona
$F_{L,S,Z}^D = \gamma_{Q1} \psi_0 F_{L,S,Z}^K$ [Nm']	proračunska vrijednost učinka hidrodinamičkog uzgona od morske struje
$F_{L,S,Z}^K$ [Nm']	karakteristična vrijednost sile hidrodinamičkog uzgona od morske struje na cijev
$F_{L,Z}^D(d,t) = \gamma_{Q1} F_{L,Z}^K(d,t)$ [Nm']	proračunska vrijednost učinka hidrodinamičkog uzgona od vala
$F_{L,Z}^K(d,t)$ [Nm']	karakteristična vrijednost sile hidrodinamičkog uzgona od vala na cijev

Iz (1) i (2)

$$\frac{\mu^K}{\gamma_M} [G_{stab}^D \cos\beta - U_{dest}^D \cos\beta - F_{L,S,Z}^D - F_{L,Z}^D(d,t)] - G_{dest}^D \sin\beta \geq F_{D,S,X}^D + F_{D,X}^D(d,t) + F_{I,X}^D(d,t) - U_{stab}^D \sin\beta$$

$$\frac{\mu^K}{\gamma_M} G_{stab}^D \cos\beta - G_{dest}^D \sin\beta \geq \frac{\mu^K}{\gamma_M} U_{dest}^D \cos\beta - U_{stab}^D \sin\beta + F_{D,S,X}^D + F_{D,X}^D(d,t) + F_{I,X}^D(d,t) + \frac{\mu^K}{\gamma_M} F_{L,S,Z}^D + \frac{\mu^K}{\gamma_M} F_{L,Z}^D(d,t)$$

uz  $G_{stab}^D = \gamma_{G,inf} G^K$  i  
 $G_{dest}^D = \gamma_{G,sup} G^K$

gdje je:

$\gamma_{G,dest} = \gamma_{G,sup} = 1,1$	parcijalni koeficijent sigurnosti za stalna destabilizacijska djelovanja
------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------

$$\gamma_{G,stab}=0,9$$

parcijalni koeficijent sigurnosti za stalna stabilizacijska djelovanja

dobije se težina cijevi, uključivo njeno ispunjenje vodom, s opteživačima koja leži na dnu bez ikakvog ukopavanja:

$$G^K(d,t) \geq \frac{\frac{\mu^K}{\gamma_M} U_{dest}^D \cos\beta - U_{stab}^D \sin\beta + F_{D,S,X}^D + F_{D,X}^D(d,t) + F_{I,X}^D(d,t) + \frac{\mu^K}{\gamma_M} F_{L,S,Z}^D + \frac{\mu^K}{\gamma_M} F_{L,Z}^D(d,t)}{\frac{\mu^K}{\gamma_M} \gamma_{G,inf} \cos\beta - \gamma_{G,sup} \sin\beta},$$

To nakon uvrštenja proračunskih vrijednosti učinka djelovanja, i pretpostavku da je djelovanje vala prevladavajuće promjenjivo djelovanje (EN oznaka Q<sub>1</sub>), daje:

$$G^K(d,t) \geq \frac{\left( \frac{\mu^K}{\gamma_M} \gamma_{G,sup} \cos\beta - \gamma_{G,inf} \sin\beta \right) U^K + \gamma_Q \left[ F_{D,X}^K(d,t) + F_{I,X}^K(d,t) + \psi_o F_{D,S,X}^K + \frac{\mu^K}{\gamma_M} F_{L,Z}^K(d,t) + \frac{\mu^K}{\gamma_M} \psi_o F_{L,S,Z}^K \right]_{max}}{\frac{\mu^K}{\gamma_M} \gamma_{G,inf} \cos\beta - \gamma_{G,sup} \sin\beta} \quad [Nm'].$$

Pritom je:

$\gamma_Q=1,5$	parcijalni koeficijent sigurnosti za promjenljiva djelovanja HRN ENV 1991-1,25
$\psi_o=0,6$	koeficijent za kombinacijsku vrijednost promjenljivih djelovanja za m. struju ili m. valove po ugledu na vjetar PM & HRN ENV 1991-1,26

Ako se želi dobiti samo težina cijevi s opteživačima bez vode koja ju ispunjava onda od gornje vrijednosti  $G^K$  treba oduzeti težinu vode koja stane u cijev.

Iz gornjeg izraza vidi se da je vrijednost u uglatoj zagradi funkcija od vremena "t", jer je sila otpora  $F_{D,X}^K(d,t)$  i sila hidrodinamičkog uzgona od vala  $F_{L,Z}^K(d,t)$  funkcija od horizontalne komponente brzine vodne čestice  $v_x(d,t)$  valnog gibana, a sila inercije  $F_{I,X}^K(d,t)$  funkcija od horizontalne komponente ubrzanja vodne čestice  $a_x(d,t)$ . Dakle vrijednost u uglatoj zagradi mijenja se od minimalne do maksimalne, i stoga gornji kriterij stabilnosti mora vrijediti i za maksimalnu vrijednost uglate zgrade. Maksimalnu uglatu zgradu određuje se numerički - izračunom njegovih vrijednosti za sve trenutke od  $t=0$  do  $t=T[s]$ ! Naime; brzina  $v_x(d,t)$  se mijenja kao cos funkcija od vremena  $v_x = f[\cos(-\omega t)]$ , a hidrodinamičke sile  $F_{D,X}^K(d,t)$  i  $F_{L,Z}^K(d,t)$  su  $\sim \cos(-\omega t)$  što znači da one mogu poprimiti vrijednosti od 0 - 100%. S druge strane ubrzanje  $a_x(d,t)$  se mijenja kao sin funkcija od vremena  $a_x = f[\sin(-\omega t)]$ , a hidrodinamička sila  $F_{I,X}^K(d,t) \sim \sin(-\omega t)$  što znači da će poprimiti vrijednosti od 0 - 100%. Za ovu ravnotežu interesantan je najveći utjecaj od sve tri hidrodinamičke sile ; t.j. od  $F_{D,X}^K(d,t)$ ,  $F_{L,Z}^K(d,t)$  i  $F_{I,X}^K(d,t)$ , a taj će se desiti kad je zbroj cos i sin funkcije maksimalan.

## 2.2.9.2 Provjera sigurnosti protiv isplivavanja

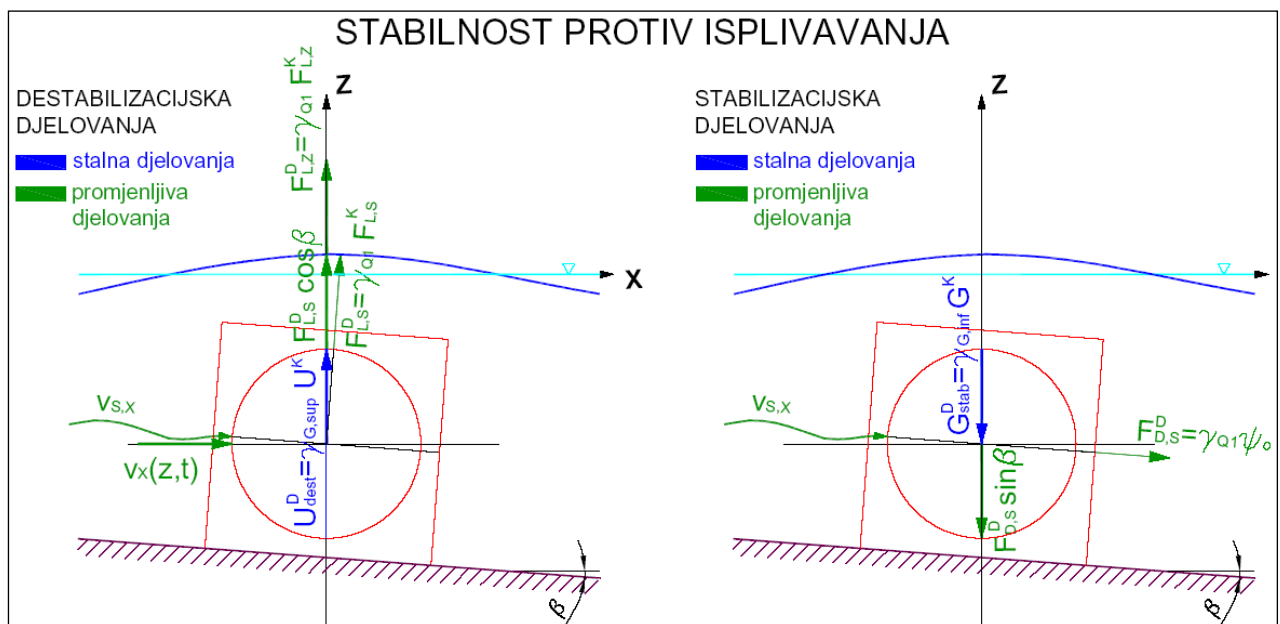
Obavlja se provjerom kriterija vertikalne stabilnosti sila koje djeluju na cjevovod koji leži na dnu bez ukopavanja prema slici 2.2.9.2::1, a koji glasi: sile koje djeluju na vertikalni pomak moraju biti manje od sila koje se tome odupiru! To se izražava matematički kao:

$$\sum V \rightarrow E_{V,destab}^D \leq E_{V,stab}^D$$

$$F_{L,S}^D \cos\beta + F_{L,Z}^D(d,t) + U_{dest}^D \leq G_{stab}^D + F_{D,S}^D \sin\beta$$

$$G_{stab}^D \leq U_{dest}^D + F_{L,S}^D \cos\beta + F_{L,Z}^D(d,t) - F_{D,S}^D \sin\beta$$

$$G^K(d,t) \leq \frac{1}{\gamma_{G,inf}} \left[ \gamma_{G,sup} U^K + \gamma_{Q1} (F_{L,S}^K \cos\beta + F_{L,Z}^K(d,t) - \psi_o F_{D,S}^K \sin\beta) \right]_{max}$$



Sl. 2.2.9.2::1 Shematski prikaz brzina vodenih čestica isila koje djeluju na cjevovod kod analize isplivavanja

Iz gornjeg izraza vidi se da je vrijednost u uglatoj zagradi funkcija od vremena "t", jer je sila hidrodinamičkog uzgona od vala  $F_{L,Z}^K(d,t)$  funkcija od horizontalne komponente brzine vodne čestice  $v_x(d,t)$  kod valnog gibana. Dakle vrijednost u uglatoj zagradi mijenja se od minimalne do maksimalne, i stoga gornji kriterij stabilnosti mora vrijediti i za maksimalnu vrijednost uglate zagrade. Kako se  $v_x(d,t)$  mijenja kao cos funkcija od vremena  $v_x = f[\cos(-\omega t)]$ , a  $F_{L,Z}^K(d,t) \sim \cos(-\omega t)$  što znači da može poprimiti vrijednosti od 0 - 100%. Za ovu

ravnotežu interesantna je najveća; t.j. 100%-tna vrijednost  $F_{L,Z}^K(d,t)$ , a ta će se desiti za  $t=0$ , pa se gornji kriterij dade napisati:

$$G_{\max}^K \leq \frac{1}{\gamma_{G,\text{inf}}} \left[ \gamma_{G,\text{sup}} U^K + \gamma_{Q1} \left( F_{L,S}^K \cos\beta + F_{L,Z}^K(d,t=0) - \psi_0 F_{D,S}^K \sin\beta \right) \right] \text{ [N/m]}$$

$\gamma_Q=1,5$  za nepovoljno HRN ENV 1991-1,25 i  $\gamma_Q=1$  za povoljno PM

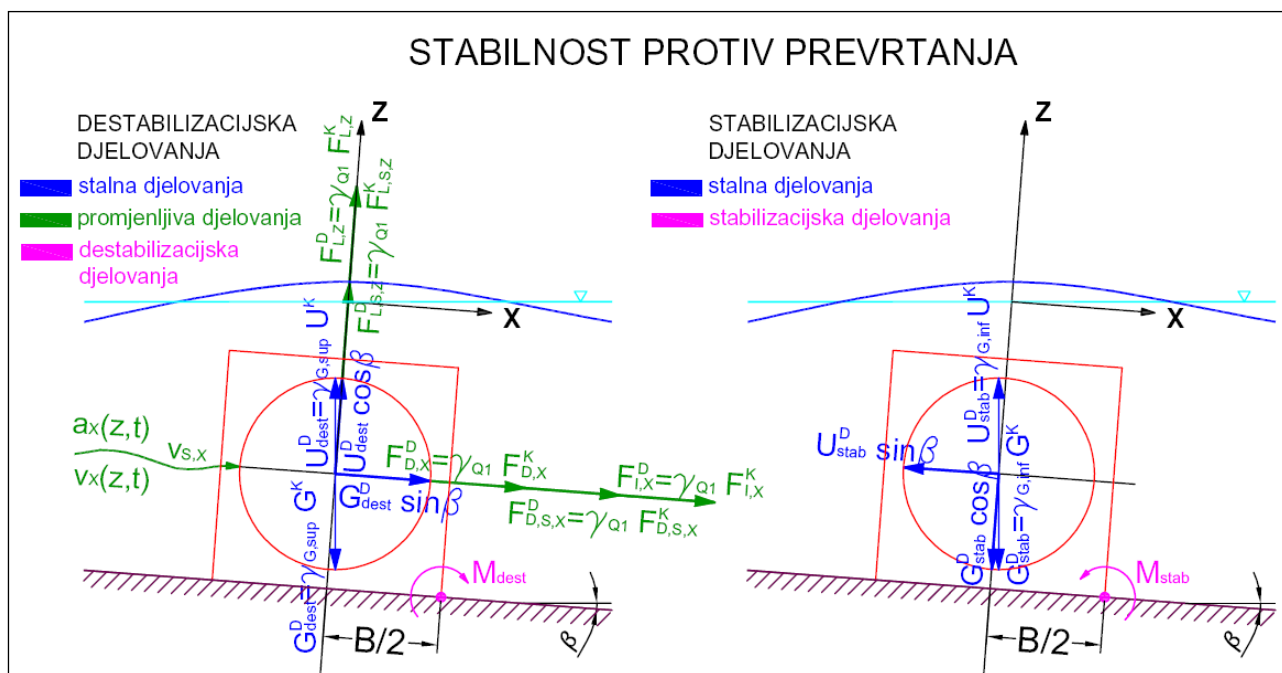
$\psi_0=0,6$  (za m. struju i valove kao za vjetar PM & HRN ENV 1991-1,26)

Ako se želi dobiti samo težina cijevi s opteživačima bez vode koja ju ispunjava onda od gornje vrijednosti  $G^K$  treba oduzeti težinu vode koja stane u cijev.

### 2.2.9.3 Provjera sigurnosti protiv prevrtanja

Obavlja se provjerom kriterija stabilnosti momenata koji djeluju na cjevovod koji leži na dnu bez ukopavanja prema slici 2.2.9.3::1, a koji glasi: destabilizacijski momenti koji djeluju na prevrtanje oko rubna točke opteživača moraju biti manji od momenata koji se tome odupiru! To se izražava matematički kao:

$$\sum M \rightarrow M_{\text{destab}}^D \leq M_{\text{stab}}^D$$



Sl. 2.2.9.3::1 Shematski prikaz brzina vodenih čestica isila koje djeluju na cjevovod kod analize prevrtanja



$$\begin{aligned}
& \left[ U_{\text{dest}}^D \cos\beta + F_{L,S,Z}^D + F_{L,Z}^D(d,t) \right] \times \frac{B}{2} + \left[ G_{\text{dest}}^D \sin\beta + F_{D,X}^D(d,t) + F_{D,S,X}^D + F_{I,X}^D(d,t) \right] \times \frac{B}{2} \\
& \leq \left[ U_{\text{stab}}^D \sin\beta + G_{\text{stab}}^D \cos\beta \right] \times \frac{B}{2} \\
& G_{\text{stab}}^D \cos\beta - G_{\text{dest}}^D \sin\beta \geq U_{\text{dest}}^D \cos\beta - U_{\text{stab}}^D \sin\beta + F_{D,S,X}^D + F_{D,X}^D(d,t) + F_{I,X}^D(d,t) + F_{L,S,Z}^D + F_{L,Z}^D(d,t) \\
& \gamma_{G,\text{inf}} G^K \cos\beta - \gamma_{G,\text{sup}} G^K \sin\beta \\
& \geq \gamma_{G,\text{sup}} U^K \cos\beta - \gamma_{G,\text{inf}} U^K \sin\beta + \gamma_{Q1} F_{D,S,X}^K + \gamma_{Q1} F_{D,X}^K(d,t) + \gamma_{Q1} F_{I,X}^K(d,t) + \gamma_{Q1} F_{L,S,Z}^K + \gamma_{Q1} F_{L,Z}^K(d,t) \\
& G^K \geq \frac{(\gamma_{G,\text{sup}} \cos\beta - \gamma_{G,\text{inf}} \sin\beta) U^K + \gamma_{Q1} [F_{D,S,X}^K + F_{D,X}^K(d,t) + F_{I,X}^K(d,t) + F_{L,S,Z}^K + F_{L,Z}^K(d,t)]_{\text{max}}}{(\gamma_{G,\text{inf}} \cos\beta - \gamma_{G,\text{sup}} \sin\beta)}
\end{aligned}$$

Ako se želi dobiti samo težina cijevi s opteživačima bez vode koja ju ispunjava onda od gornje vrijednosti  $G^K$  treba oduzeti težinu vode koja stane u cijev.

Iz gornjeg izraza vidi se da je vrijednost u uglatoj zagradi funkcija od vremena "t", jer su sile  $F_{D,X}^K(d,t)$ ,  $F_{L,Z}^K(d,t)$  i  $F_{I,X}^K(d,t)$  sin i cos funkcije od vremena. Dakle vrijednost u uglatoj zagradi mijenja se od minimalne do maksimalne, i stoga gornji kriterij stabilnosti mora vrijediti i za maksimalnu vrijednost uglate zgrade. Maksimalna uglata zgrada određuje se numerički (vidi komentar pod 2.2.9.1)!

## ZAKLJUČAK

Hidrodinamičke sile na podmorski cjevovod vrlo su kompleksan fenomen, naročito kada analiziramo realno strujanje uz utjecaj valova i struja na dnu morskoga dna. Vrlo je teško odrediti rezultantu sila u svakom danom trenutku. Prisustvo morske struje povećava komponentu sile otpora hidrodinamičkih sila u odnosu prema komponenti sile inercije, tako da ako je brzina struje dovoljno velika, komponenta sile inercije od vala može biti zanemarena. Pri određivanju komponenata gibanja vodne čestice vala, s dovoljnom točnošću se može koristiti linearna valna teorija i princip superpozicije valova i struja, pogotovo u slučajevima kada primjena nelinearnih valnih teorija nije evidentna.

Za točno određivanje komponenata gibanja vodne čestice vala određene lokacije, potrebno je izvršiti analizu deformacija valnih parametara za tu lokaciju. Treba napomenuti da su vrijednosti koeficijenta sila za slučaj istodobnog djelovanja valova i struja manji u odnosu na slučaj djelovanja samo valova. Najbitniji parametri o kojima ovise koeficijenti sila, a time i hidrodinamičke sile su Reynoldsov broj, Keulegan-Carpenterov broj KC, relativna udaljenost cjevovod od morskoga dna  $c/D$ , relativna vanjska hrapavost cjevovoda  $\varepsilon/D$  i kut nailaska valova. Koeficijenti sila za horizontalni valjak manji su nego li za vertikalni valjak, što je posljedica određenog utjecaja vertikalne komponente brzine vodne čestice vala.

## 2.3 POLAGANJE PODMORSKIH CJEVOVODA

### 2.3.1 Metode polaganja cijevovoda

#### 2.3.1.1 Uvod

Najčešće metode za polaganje (potapanje) cijevovoda su one s broda ili neke slične plovne platforme:

- S – polaganje (primjena od plitkih do dubokih voda),
- J – polaganje (primjena u srednje dubokim do dubokih voda),
- polaganje pomoću bubnja za namatanje (primjena u srednje dubokim do dubokih voda).

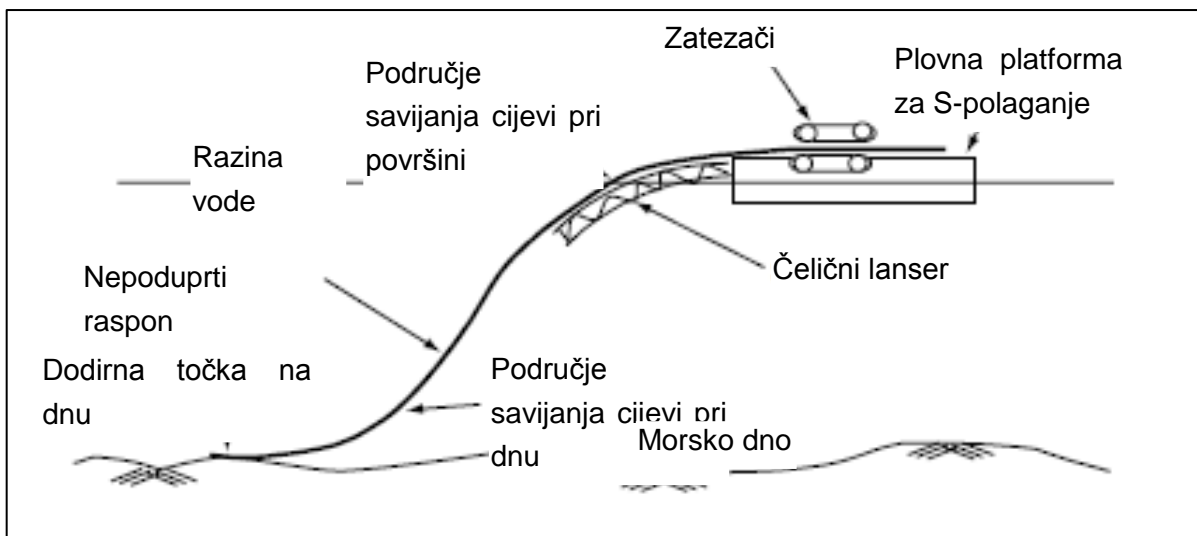
Ostale metode, metode tegljenja su sljedeće:

- površinski tegalj,
- tegalj ispod površine,
- tegalj iznad dna,
- tegalj po dnu i
- kontrolirana ravnoteža.

Primjena ovih metoda vezano uz dubinu voda ovisi od proračunskih zahtjeva. Područje približnih dubina „d“ do 12 promjera cijevi „D“ ( $0 < d < 12D$ ), ili udaljeno približno 150m od obale, smatra se plitkim vodama. Za vode srednjih dubina pretpostavlja se područje dubina od približno 12D do 50D ( $12D < d < 50D$ ), ili udaljeno približno 150m do 300m od obale, a područje približnih dubina iznad 50D ( $d > 50D$ ), ili približno udaljeno 300m od obale, smatra se dubokim vodama.

#### 2.3.1.2 Metoda S – polaganja

Kao što je prikazano na slici 2.3.1.1, metoda S-polaganja zahtijeva da tegljač ima na svojoj palubi zavarivačke postaje gdje se u zavarenoj izvedbi nastavljaju izolirane cijevi duljine 12 do 24 metra. Zavarivačke postaje omogućavaju zavarivanje u zaštićenom prostoru bez utjecaja vlage, vjetra kiše.

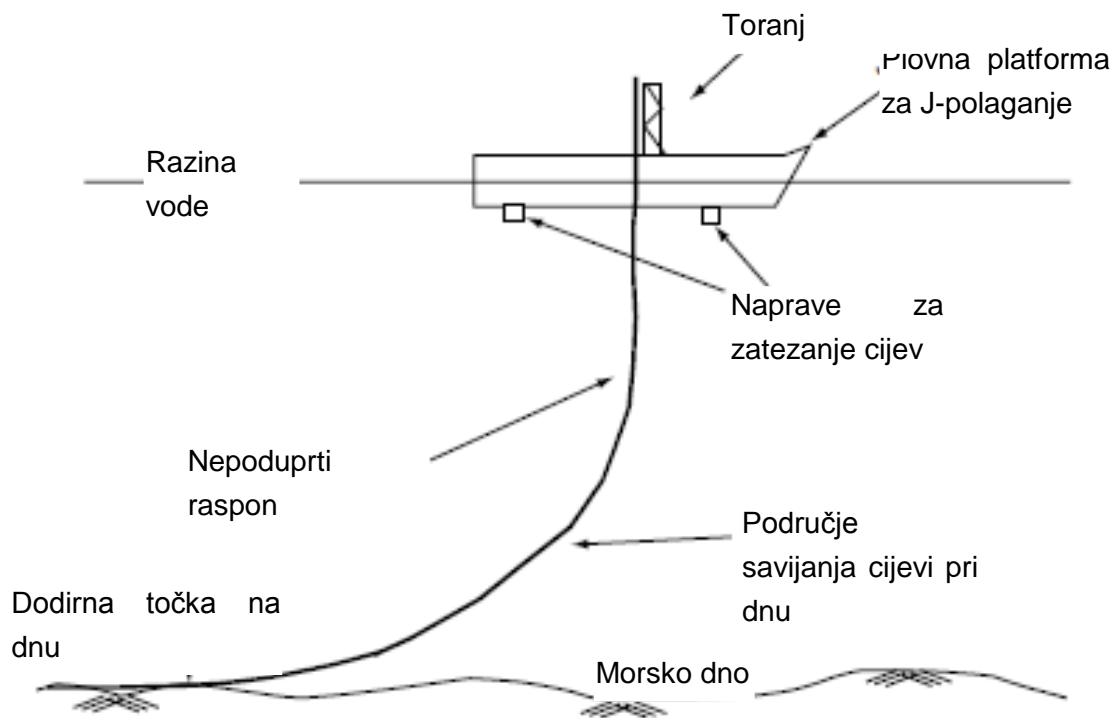


Slika 2.3.1.1 S – konfiguracija

Kad tegljač kreće naprijed, cijev se otpušta s krme tegljača u vodu, poprimajući zakrivljeni oblik prema dolje sve dok se ne dosegne dodirna točka na dnu. Nakon dodira s dnom, i s daljnjim nastavljanjem polaganja, pretpostavlja se da cjevovod poprima oblik S-krivulje. Kako bi smanjili naprezanje na savijanje cijevi, koristi se čelični nosač na kojeg se oslanja cijev prilikom njezinog otpuštanja s tegljača. Da bi se izbjeglo izvijanje cijevi, natezni valjak i kontrolirani potisak prema naprijed primjenjuju se da se ostvari odgovarajuća vlačna sila u cjevovodu. Metoda se primjenjuje za polaganje cjevovoda u području dubokih voda i to od plićih prema dubokim.

### 2.3.1.3 Metoda J – polaganja

Metoda J-polaganja prikazana je na slici 2.3.1.2. Ovom metodom izbjegavaju se neke od poteškoća kod metode S-polaganja, kao što su vlačno opterećenje i potisak prema naprijed. Kod metode J-polaganja tegljači spuštaju cijev gotovo okomito prema dolje dok ne dosegne dno. Nakon toga, pretpostavlja se da je cijev J-oblika. Tegljač korišten za primjenu metode J-krivulje treba imati visok toranj na krmi da se mogu zavarivati i klizati zavarene cijevi duljina do 80 metara. S jednostavnijim oblikom cjevovoda, metoda J-polaganja može se primijeniti u dubljim vodama nego u slučaju metode S-polaganja.



Slika 2.3.1.2 – konfiguracija

#### 2.3.1.4 Polaganje pomoću bubnja za namatanje

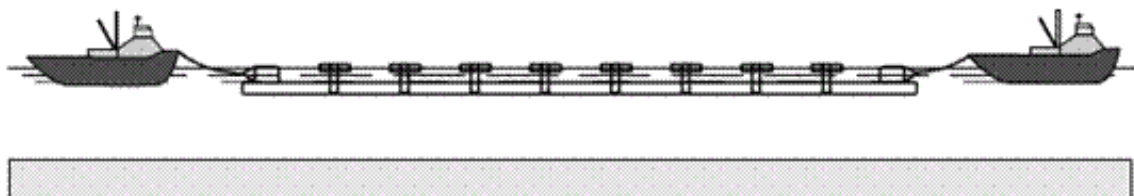
Cjevovodi manjih promjera mogu se polagati (potapati) s tegljača na kojima je smješten bubanj za namatanje. Na bubanju se nalazi obložena cijev koja se namata na obali. Ovakva izvedba rezultira s nižom cijenom izvedbe. U slučaju horizontalnih bubnjeva polažu se cijevi u konfiguraciji S-polaganja. U slučaju vertikalnih bubnjeva najčešće se izvodi J-polaganje, ali se također može izvoditi S-polaganje. Na slici 2.3.1.3 prikazan je brod s opremom za ovu metodu.



Slika 2.3.1.3 Brod s vertikalno montiranim bubnjem

### 2.3.1.5 Površinski tegalj Pitati Čorića za korištenje!

Montira se cijela podmorska sekcija na kopnu (u 1 ili više dijelova). Sljedeći korak je porinuće u more, a zatim se površinskim tegljenjem dovodi na poziciju trase i kontroliranim potapanjem spušta na morsko dno, slika 2.3.1.4.



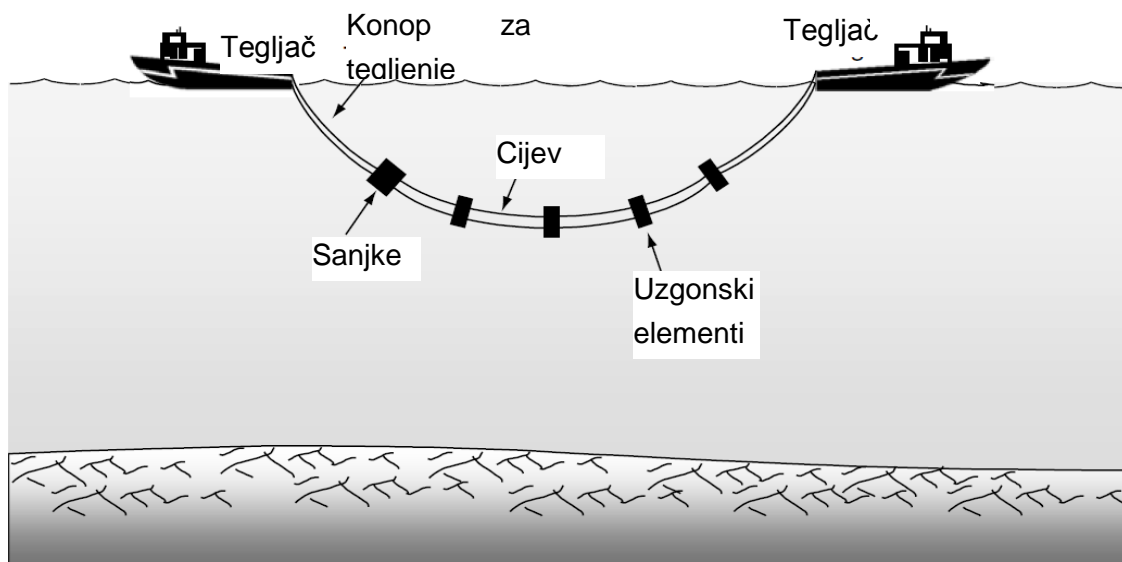
Slika 2.3.1.4 Površinski tegalj podmorske sekcije

Metoda površinskog teglja prikladna je u slučaju postojanja dovoljno duge slobodne ravne obale u blizini predviđene trase (na pr. Bakarski zaljev). Zbog sigurnijeg teglja, sekciju koja

je ukupne duljine oko 740 m, treba sastaviti iz dva jednaka komada. Kako je cjevovod ispunjen zrakom teži od njegovog uzgona, potrebno ga je opremiti uzgonskim elementima koji osiguravaju njegovo plutanje na slobodnoj površini. Obadva dijela sekcije se tegle pomoću dva remorkera i pozicioniraju iznad trase, te se spajaju u jedan. Balastiranjem uzgonskih elemenata cjevovod se kontrolirano potapa na pripremljenu trasu. Pri tome je važno voditi računa o savijanju cjevovoda u svim fazama potapanja: radijus zakrivljenosti ne smije biti manji od dozvoljene minimalne vrijednosti  $R_{\min\_plg}$ . Kontakt između cjevovoda i morskog dna formira se od krajeva prema sredini cjevovoda.

### 2.3.1.6 Tegalj ispod površine

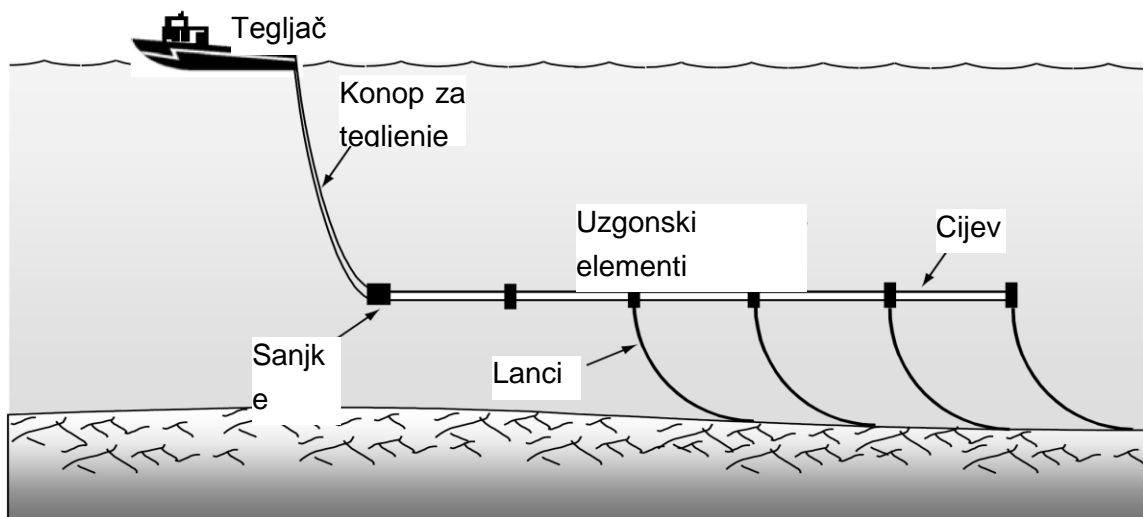
Slika 2.3.1.5 ilustrira metodu tegljenja ispod površine. U ovom slučaju zahtijeva se manje uzgonski elemenata (privremeno fiksirani čelični elementi na cijev kod potapanja koji se mogu kontrolirano balansirati). Cjevovod se spušta sam na dno kad se prestane pridržavati s tegljačima.



Slika 2.3.1.5 Metoda tegljenja ispod površine

### 2.3.1.7 Tegalj iznad dna

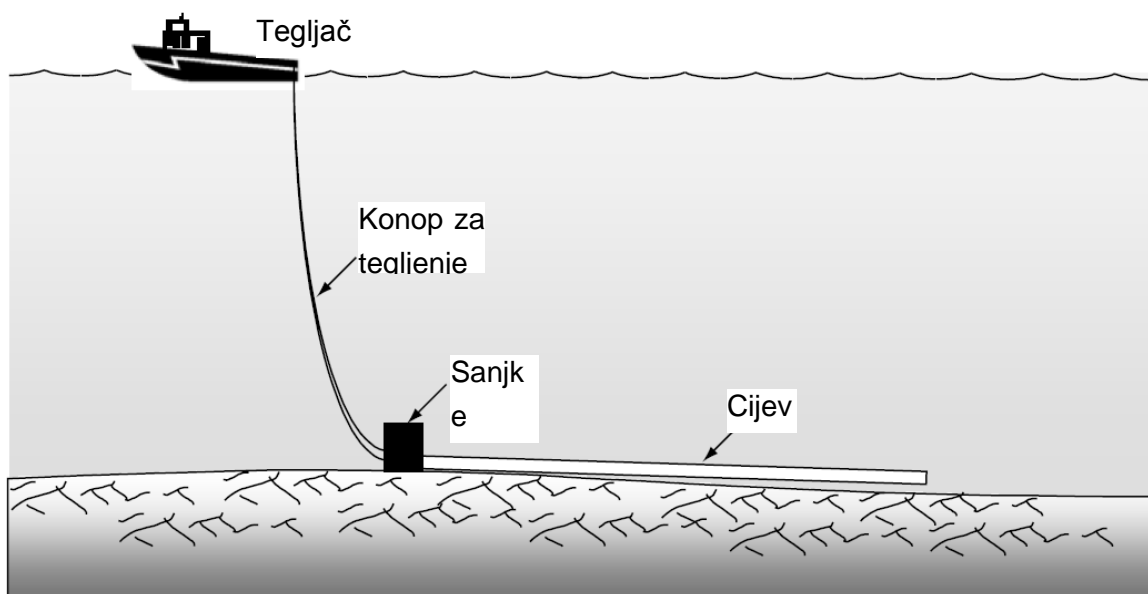
Na slici 2.3.1.6 prikazana je metoda tegljenja iznad dna. U ovom slučaju, uključeni su i uzgonski elementi i dodatna težina pomoću lanaca. Dovlačenjem cjevovoda na predviđeno mjesto, uzgonski elementi se uklanjaju i cjevovod se spušta na morsko dno.



Slika 2.3.1.6 Metoda tegljenja iznad dna

## 2.3.1.8 Tegalj po dnu

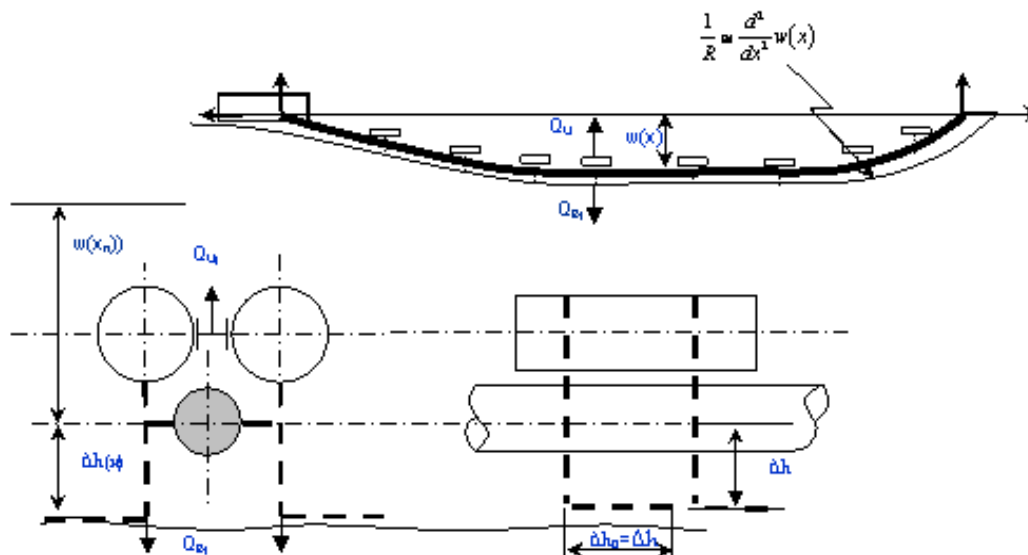
Slika 2.3.1.7 prikazuje metodu tegljenja po dnu. Dopušta se da cjevovod potone na dno, a zatim se tegli po morskom dnu. Prvenstveno se primjenjuje kada je morsko dno mekano i ravno i u plitkoj vodi.



Slika 2.3.1.7 Metoda tegljenja po dnu

## 2.3.1.9 Kontrolirana ravnoteža Pitati Čorića za korištenje!

Spajaju se sekcije od pojedinih cijevi na obali ili na prikladnoj usidrenoj barži u pravcu trase. Sljedeća faza sastoji se iz porinuća sekcije u koracima čija duljina odgovara duljini zavarivačke platforme. Adekvatnim balastiranjem sekcija se nalazi u približno neutralnom položaju i lebdi 1 do 1,5 m iznad morskog dna, slika 2.3.1.8.



Slika 2.3.1.8 Metoda kontrolirane ravnoteže

Kod metode kontrolirane ravnoteže potrebno je osigurati radnu površinu okomitu na obalu, u pravcu trase. Cjevovod se polaže na trasu u koracima. Veća duljina površine (okomito na obalu) osigurava veći korak polaganja cjevovoda podmorske sekcije i skraćuje ukupni proces. Ukoliko ne postoji mogućnost osiguranja adekvatne radne površine, ona se može osigurati i na usidrenoj barži dovoljne veličine. Na zavarivačkoj platformi spajaju se cijevi koje su na poprečnim valjcima. Nakon kontrole spoja i njegove zaštite, sekcija koja je jednaka duljini zavarivačke platforme, povlači se po trasi u lebdećem stanju iznad morskog dna. Neutralna ravnoteža cjevovoda postiže se balansiranjem uzgonskih elemenata i lanaca koji su obješeni u pravilnim razmacima na cjevovodu. Vertikalnim pomacima presjeka cjevovoda, mijenja se duljina obješenih lanaca čiji se višak vuče po morskome dnu i time se uravnotežuje cijela sekcija. Kod ove metode važno je voditi pažljivu kontrolu težine obloženih cijevi (vaganje tereta prije ugradnje).

### 2.3.2 Kontrola naprezanja

Kontrole naprezanja cjevovoda vrše se za dvije faze u životnom vijeku cjevovoda:

- faza polaganja kada je cijev dijelom na dnu, a dijelom pluta ispod i na vodi (kratkotrajna) i
- faza eksploatacije kada cijev leži na dnu i oslanja se na temeljno tlo od mula, pijeska ili kamena (dugotrajna faza).



Ovdje će se dati osnove kontrole naprezanja u fazi polaganja koje se dobrim dijelom daju primijeniti i na fazu eksploatacije.

### Proračunski modeli za fazu polaganja

Najopćenitiji proračunski model je model „S“ polaganja cjevovoda. Cijev kod polaganja u početku pluta na vodi, zajedno sa svojom opteživačkom masom, prazna. Polaže se tako da se u početak cijevi, idući od obalne crte prema moru, počne upuštati voda koja ju potapa. Istovremeno se na kraju cijevi, kontrolirano ventilom, izpušta zrak kako bi nova voda mogla ulaziti. Dakle u cijevi se ostavlja neki tlak zaka, veći od atmosferskog, pa je razina vode u cijevi nešto ispod morske razine. Upuštanje vode obavlja se kontrolirano zračnim ventilom tako da razina vode u cijevi bude ispod morske razine u skladu s proračunom za neku dubinu. No voda nikada ne napuni cijelu cijev, jer je njezin kraj na brodu ili montažnoj platformi iznad vode. U stvari pridneni dio „S“ krivulje je pun vode, a površinski dio „S“ krivulje je pun zraka. Dakle „statički model“ je cijev s horizontalnim čvrstim osloncima na početku (kontakt pridnenog dijela „S“ krivulje s dnom), s horizontalnim čvrstim osloncima na kraju cijevi (površinski dio „S“ krivulje na zatezaču smještenom na brodu ili montažnoj platformi) i cijev u moru koja leži na elastičnoj podlozi. Reakcija podloge je vertikalna prema gore i ima veličinu uzgonu. Vertikalno opterećenje cijevi ima dvije veličine: težina pridnenog dijela „S“ krivulje koji je pun vode i površinski dio „S“ krivulje koji je pun zraka. Na obadva ležaja stalno djeluje horizontalna sila zatezača koja se postiže finom kontrolom zatezača i baznom silom brodskog vijka.

Proračun se vrši za razne dubine mora koje se javljaju uzduž trase cjevovoda. Valovi se zanemaruju jer se polaganje planira u vrijeme mirnog mora, i stoga mora biti kratko.

Proračun započinje odabirom:

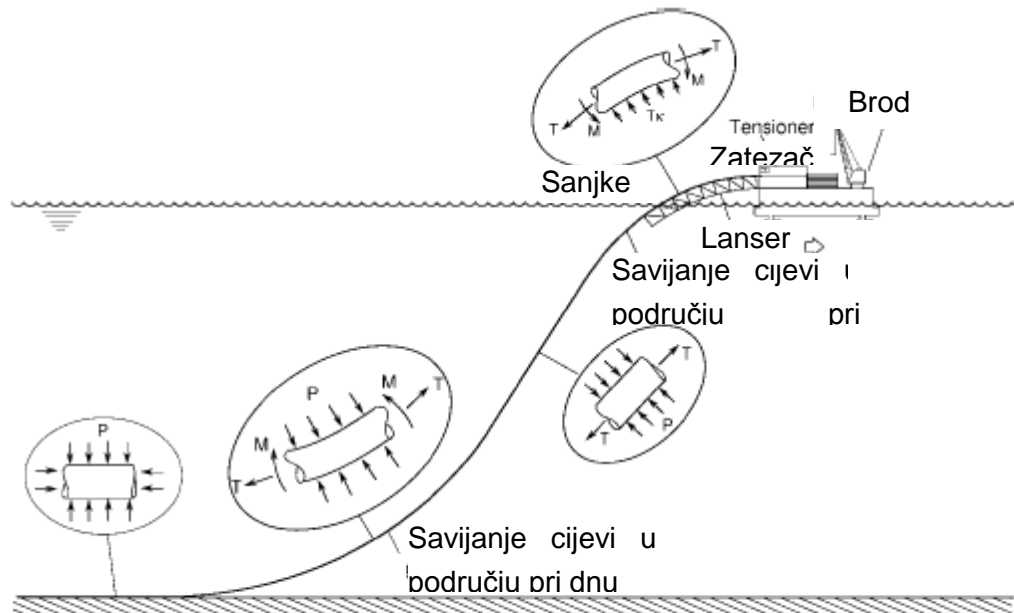
- nazivnog (unutarnjeg) promjera cijevi na temelju hidrauličkog proračuna,
- odabirom materijala cijevi; t.j. njegove granice popuštanja (koristi se samo njenih 85%) i drugih mehaničkih parametara za proračun naprezanja,
- izračunom težine cijevi ispunjene zrakom; t.j. na suhom (uključivo masu za opteživanje),
- izračunom težine cijevi ispunjene vodom (uključivo masu za opteživanje).

Proračun rezultira:

- dozvoljenim radijusom zakrivljenosti cijevi prilikom polaganja,
- veličinom sile zatezača.

Budući da se većina podmorskih cjevovoda polaže prazna u nadvodnom dijelu, i manjem dijelu cijevi idući ispod površine u dubinu, oni su izloženi tijekom polaganja (potapanja) visokom hidrostatskom tlaku, zajedno sa naprezanjem uslijed savijanja na dijelovima cjevovoda gdje se savijanje događa.

Na slici 2.3.2.1 prikazana je cijev u fazi polaganja (potapljanja) s broda na morsko dno. Uočljiva su dva područja savijanja: savijanje cijevi pri površini mora i savijanje cijevi pri dnu mora. Prvo područje savijanja proteže se od zatezača smještenog na palubi broda do točke infleksije cijevi u moru. Drugo područje savijanja proteže se od točke infleksije do dodirne točke na dnu.



Slika 2.3.2.1 Shematski prikaz S – polaganja i pripadna naprezanja

Zakrivljenost cijevi u području savijanja pri površini se obično kontrolira zakrivljenošću kotrljajućih oslonaca na brodskoj rampi i zakrivljenošću čeličnog konzolnog lansera na krmu broda preko kojeg se cijev potapa. Općenito, radijus zakrivljenosti u ovom slučaju (uključujući čelični lanser) odabire se tako da maksimalno naprezanje na savijanje cijevi ne premaši vrijednost od 85% od minimalne granice popuštanja. Ova vrijednost je odgovarajuća proračunskom faktoru. Deformacija savijanja dana je pomoću sljedećeg izraza:

$$\varepsilon = \frac{D}{2R} \quad (1)$$

U izrazu (1) je:

- D vanjski promjer cijevi,
- R radijus zakrivljenosti cijevi savijane u području pri površini.

Napominje se da jedinice za D i R moraju biti iste. Odgovarajuće naprezanje na savijanje dano je prema sljedećem izrazu:

$$\sigma = \varepsilon E = \frac{ED}{2R} \quad (2)$$

U izrazu (2) je E modul elastičnosti.

Prema tome, minimalni radijus za savijanje cijevi pri površini može se odabrati prema sljedećem:

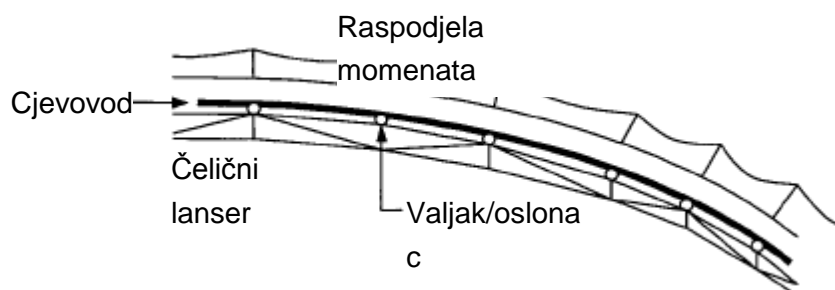
$$R = \frac{ED}{2\sigma_0 DF} \quad (3)$$

U izrazu (3) je:

$\sigma_0$  minimalna granica popuštanja cijevi,

DF proračunski faktor, uobičajeno usvojen s vrijednosti 0,85.

U prikazanoj analizi pretpostavlja se da cijev ima jednolik radijus savijanja preko rampe na brodu i sljedećih oslonaca čeličnog lansera. U stvarnosti, cijev se savija više iznad oslonaca nego između njih. Shodno tome, povećava se naprezanje više na osloncima nego između njih, slika 2.3.2.2.

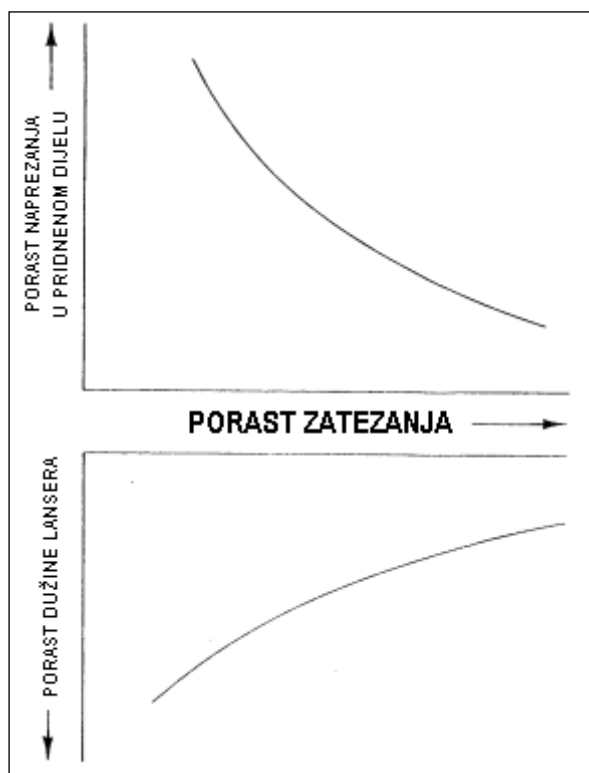


Slika 2.3.2.2 Raspodjela momenata po čeličnom nosaču

Za točniju analizu savijanja u ovom području rabe se odgovarajući kompjutorski programi i provjerene metode. U ovim slučajevima, primjenjuju se manje konzervativni kriteriji proračuna da bi se odredio minimalni radijus krivulje. U određenim slučajevima, dozvoljava se prekoračenje granice popuštanja cijevi u području savijanja i rabi se kriterij deformacije (budući da se kontroliraju progibi) umjesto kriterija graničnog naprezanja.

Analiza naprezanja u zoni savijanja pri dnu uglavnom se provodi da bi se odredio vlak na zatezaču (vlačno naprezanje) i zahtjev na dužinu čeličnog lansera za sigurno polaganje (potapanje). Općenito, što je veći vlak, to se treba rabiti kraći čelični lanser. Često se za naprezanja u ovoj zoni savijanja rišu odnosi zahtijevanih duljina čeličnih nosača i vlaka na

zatezaču, slika 2.3.2.3. Ovakav grafički prikaz se koristi za određivanje vlaka i duljine čeličnog nosača.



Slika 2.3.2.3 Tipična varijacija odnosa vlak na zatezaču – dužina čeličnog lansera

Postoji nekoliko metoda za provedbu analize napreznja cijevi u području savijanja pri dnu kao na primjer:

- metoda nosača,
- metoda lančanice,
- ukružena lančanica,
- nelinearna metoda nosača,
- metoda konačnih elemenata.

Svaka od metoda ima svoje područje primjene s obzirom na točnost dobivenih rezultata. Tablica 3. prikazuje sažetu usporedbu različitih metoda analize.

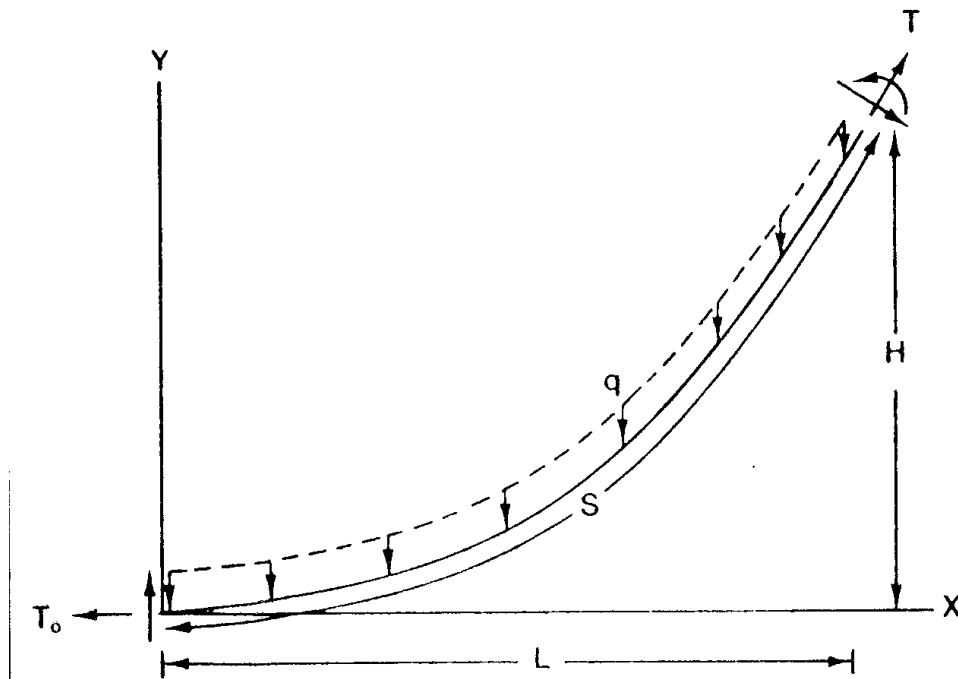
Tablica 3. Usporedba metoda za provedbu analize napreznja cijevi u području savijanja pri dnu

Metoda	Primjene	Rubni uvjeti	Važenje
Metoda nosača	Plitka voda	Zadovoljeni	Mala progibanja
Nelinearna metoda nosača	Sve dubine	Zadovoljeni	Općenito
Metoda lančanice	Duboka voda	Nisu zadovoljeni	Udaljeno od krajeva, male krutosti

Metoda ukružene lančanice	Duboka voda	Zadovoljeni	Mala krutost
Metoda konačnih elemenata	Sve dubine	Zadovoljeni	Općenito

### 2.3.2.1 Metoda nosača (mala progibanja)

Prema ovoj metodi, raspon ovješene cijevi u savijanju pri dnu modeliran je kao segment nosača kako je prikazano na slici 2.3.2.4.



Slika 2.3.2.4 Prikaz modela

Međutim, pretpostavljaju se mali progibi, to jest:

$$\frac{dx}{dy} \ll 1$$

Jednadžba savijanja ima sljedeći oblik:

$$-q = EI \frac{d^4 y}{dx^4} - T_0 \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4)$$

U gornjem izrazu je:

$q$  težina potpoljene cijevi po jedinici duljine,

$EI$  krutost cijevi na savijanje,

$T_0$  vlačna sila cijevi na dnu.

Rubni uvjeti glase:

$$y(0) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dy}{dx}(0) = \theta \text{ (nagib morskog dna)} \quad (6)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2}(0) = 0 \quad (7)$$

$$y(L) = H \quad (8)$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2}(L) = M \quad (9)$$

( $M = 0$  u točki infleksije)

$$T = T_0 + qH \quad (10)$$

Teorija je primjenjiva samo za male progibe kao i za plitku vodu.

### 2.3.2.2 Nelinearna metoda nosača

U ovoj teoriji razmatra se nelinearna jednačba savijanja nosača kako bi se opisalo savijanje cijevi na promatranom rasponu. Primjenjuje se i u plitkim i u dubokim vodama kao i za velike progibe.

Jednačba ima sljedeći oblik:

$$-q = EI \frac{d}{ds} \left( \sec \theta \frac{d^2 \theta}{ds^2} \right) - T_0 \sec^2 \theta \frac{d\theta}{ds} \quad (11)$$

U gornjem izrazu je:

$s$  duljina zakrivljene cijevi,

$\theta$  kut između tangente na  $s$  i osi  $x$ .

$$\sin \theta = \frac{dy}{ds} \quad (11a)$$

Budući da rubni uvjeti uobičajeno uključuju pomak na oba kraja raspona cijevi, gornju diferencijalnu jednadžbu bolje je izraziti pomoću  $y$  nego pomoću  $\theta$ . Zamjenjivanje  $\theta$  s varijablama  $y$  i  $s$  u jednadžbi (11) rezultira s složenijom diferencijalnom jednadžbom za  $y(s)$  nego za  $\theta(s)$ .

Potrebna su četiri rubna uvjeta za rješenje diferencijalne jednadžbe i potrebno je dodatnu rubnu jednadžbu riješiti za duljinu raspona koja a priori nije poznata.

Gornja diferencijalna jednadžba i odgovarajuće rubne jednadžbe uobičajeno se tretiraju kao problem rubne vrijednosti i rješava se numerički. Metoda konačnih diferenci može pružiti zadovoljavajuće rješenje.

### 2.3.2.3 Metoda lančanice

Ova metoda može se koristiti za opisivanje konfiguracije raspona cijevi od točke na morskom dnu do točke blizu čeličnog nosača. Primjenjuje se u slučajevima kada je krutost cijevi vrlo mala, a rubni uvjeti po rasponu cijevi nisu zadovoljeni.

Da bi se ilustrirala metoda, neka je  $EI = 0$  u nelinearnoj jednadžbi savijanja nosača (11). Dobiva se sljedeća jednadžba:

$$q = T_0 \sec^2 \theta \frac{d\theta}{ds} \quad (12)$$

Jednadžba ima rješenje:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{qs}{T_0} \quad (13)$$

U gornjem izrazu je:

$C$  konstanta ( $C = 0$ , ako je nagib cijevi = 0 na morskom dnu).

Jednadžba (13) predstavlja mjerodavnu jednadžbu za prirodnu lančanicu.

Duljina raspona ( $s$ ) dana je sljedećim izrazom:

$$s = \sqrt{y^2 + \frac{2yT_0}{q}} = \frac{T_0}{q} \sinh\left(\frac{qx}{T_0}\right) \quad (14)$$

Maksimalna deformacija savijanja cijevi pri dnu,  $\varepsilon$ , može se aproksimirati minimalnom zakrivljenošću prema sljedećem:

$$\varepsilon = \frac{Dq}{2T_0} \quad (15)$$

U izrazu (15)  $D$  je vanjski promjer čelične cijevi. Također, u izrazu (15) sve jedinice moraju biti konzistentne.

Jednadžbe lančanice mogu se rabiti da se procijeni konfiguracija cijevi između njezinih krajeva u slučajevima gdje je krutost cijevi mala, u dubokoj vodi, ili gdje je vlačno naprezanje vrlo veliko tako da je vlačni član u jednadžbi (11) dominantan u odnosu na član krutosti.

#### 2.3.2.4 Metoda ukrućene lančanice

Kod ove metode rubni uvjeti su zadovoljeni i ovo je čini različitom u odnosu na metodu lančanice. Diferencijalna jednadžba nelinearnog nosača se u ovoj metodi rješava asimptotski uz pretpostavljanje da je bezdimenzijski član ( $\alpha^2$ ) vrlo mali:

$$\alpha^2 = \frac{EI}{qS^3} \ll 1 \quad (16)$$

U gornjem izrazu  $S$  je duljina raspona cijevi (karakteristična duljina).

Ovom metodom dobivaju se točni rezultati konfiguracije cijevi, uključujući područja cijevi blizu krajeva. Međutim, primjenjiva je u slučajevima gdje je krutost cijevi mala ili u dubokim vodama.

#### 2.3.2.5 Metoda konačnih elemenata

Kao i u slučaju metode nelinearnog nosača, metoda konačnih elemenata primjenjiva je za sve dubine voda za male i velike progibe.

Raspon cijevi modeliran je kao sustav spojenih konačnih 'beam' elemenata. Jednadžbe savijanja izvedene su za svaki element cijevi i rubni uvjeti između elemenata su usklađeni. Sustav jednadžba je potom razvijen u matričnom obliku i riješen rabeći matrične metode.

S prikladnim odabirom duljine elementa cijevi, progibi svakog elementa cijevi zadržavaju se mali, obično s obzirom na lokalni koordinatni sustav. Ovime je moguće rabiti linearni



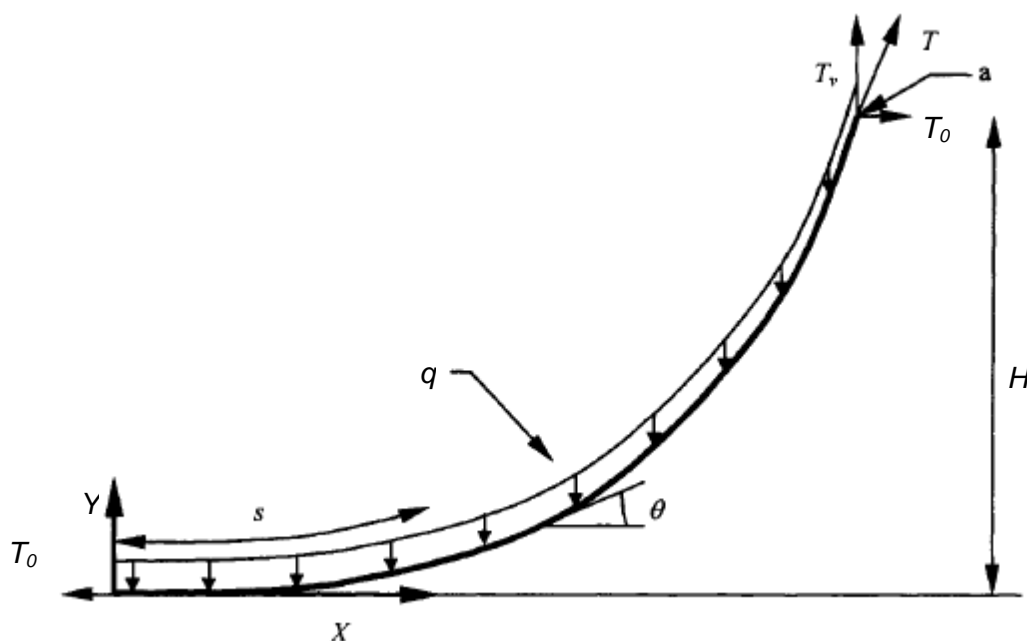
oblik diferencijalne jednačbe savijanja za svaki element cijevi kako je opisano u točki 2.3.2.1.

### 2.3.2.6 Zakrivljenost cijevi u području savijanja pri dnu

U prethodnom tekstu su obrađene metode kojima se može provesti analiza naprezanja cijevi u području savijanja pri dnu. U nastavku je detaljnije prikazana metoda lančanice.

#### 2.3.2.6.1 Metoda lančanice

Pod djelovanjem vlačne sile i težine cijevi, cjevovod se značajno progiba. Za zakrivljenost cjevovoda u području savijanja pri dnu mjerodavna je vlačna sila koja djeluje na cijev. Najjednostavniji model za proračun odnosa između vlačne sile i zakrivljenosti je model lančanice. Model lančanice zanemaruje krutost na savijanje cjevovoda. Horizontalna vlačna komponenta,  $T_0$ , je konstantna od točke gdje cjevovod dodiruje morsko dno sve do vrha čeličnog lansera. Vertikalna komponenta,  $T_v$ , raste od točke dodirivanja morskog dna do čeličnog lansera zbog težine potopljene cijevi ovješnog dijela, slika 2.3.2.5.



Slika 2.3.2.5. Model lančanice

Oblik lančanice može se izraziti kao:

$$y = \frac{T_0}{q} \left[ \cosh\left(\frac{qx}{T_0}\right) - 1 \right] \quad (17)$$

- $x$  horizontalna udaljenost od dodirne točke,  
 $y$  visina iznad morskog dna,  
 $T_0$  horizontalna sila pri morskome dnu,  
 $q$  težina potpoljene cijevi po jedinici duljine.

Zakrivljenost je onda dan sljedećim izrazom:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{d^2y}{dx^2} \cos\theta = \frac{q}{T_0} \cosh \frac{xq}{T_0} \cos\theta \quad (18)$$

- $\theta$  kut prema x-osi, vidi sliku x1.,  
 $s$  duljina luka.

Najveća zakrivljenost je u točki dodirivanja morskog dna:

$$\frac{1}{R} = \frac{q}{T_0} \quad (19)$$

Odnos između zakrivljenosti i deformacije cijevi iznosi:

$$\varepsilon = \frac{D}{2R} \quad (20)$$

- $D$  promjer cijevi.

Vertikalna komponenta,  $T_v$ , jednaka je težini potopljenog dijela cjevovoda:

$$T_v = qs \quad (21)$$

U izrazu (21)  $s$  je duljina ovješeneog dijela cjevovoda i može se izraziti kao:

$$s = y \sqrt{1 + 2 \frac{T_0}{yq}} \quad (22)$$

Kut između cjevovoda i x-z ravnine je:

$$\tan\theta = \frac{T_v}{T_0} \quad (23)$$

Horizontalna sila,  $T_0$ , može se izraziti pomoću  $\theta$ ,  $q$  i  $y$  uvrštavajući  $T_v$  u izraz za  $\tan\theta$ :

$$T_0 = \frac{yq}{\tan^2 \theta} \left( 1 + \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \right) \quad (24)$$

Polazni kut i visina iznad morskog dna kod vrha čeličnog lansera poznate su vrijednosti za primjenjeni brod (ili platformu) za polaganje cjevovoda i za radijus čeličnog lansera. Međutim, položaj točke infleksije je nepoznat. Za duboke vode je razumno usvojiti da su polazni kut kod vrha čeličnog lansera i kut u točki infleksije približno jednaki. Prema tome, horizontalna vlačna sila može se procijeniti pomoću jed. (24). Budući da su točka infleksije i njezin položaj nepoznati, vlačna sila može se procijeniti pomoću korištenja polaznog kuta i visine iznad morskog dna kod vrha čeličnog lansera. Predviđena vlačna sila je precijenjena jer je  $\theta$  manji i  $y$  je veći kod vrha čeličnog lansera nego u točki infleksije. Vlačna sila je također precijenjena jer je zanemarena krutost na savijanje cjevovoda. Proračunata zakrivljenost i deformacija,  $\varepsilon$ , u području savijanja cjevovoda pri dnu bit će također konzervativni jer je zanemarena krutost cjevovoda na savijanje.

Da bi se dobio točan model, potrebno je u analizu uključiti krutost cjevovoda na savijanje. Uobičajeno se koristi metoda konačnih elemenata.

#### 2.3.2.6.2 Hidrostatski tlak

Cjevovod je izložen hidrostatskom vanjskom tlaku kada je potopljen. Za vrijeme polaganja (potapanja) nema unutarnjeg tlaka. Vanjski tlak ima učinak na odgovor cjevovoda. Radijalni tlak će inducirati uzdužnu deformaciju prema sljedećem:

$$\varepsilon_{xx} = -\frac{\nu}{E} (\sigma_{\eta} + \sigma_r) \quad (25)$$

$\varepsilon_{xx}$	uzdužna deformacija,
$\nu$	Poissonov broj,
$\sigma_{\eta}$	longitudinalno naprezanje,
$\sigma_r$	radijalno naprezanje,
$E$	modul elastičnosti.

Naprezanja  $\sigma_{\eta}$  i  $\sigma_r$  dana su Lamé-ovim jednadžbom. Ako je kraj cijevi slobodan, deformacija neće rezultirati naprezanjem. Međutim, ako su krajevi pridržani, pojavit će se uzdužna sila. Ovaj učinak sličan je termičkim opterećenjima.

Kada je cijev pridržana, inducirana je sljedeća sila:

$$T_p = p_0 A_0 - p_i A_i \quad (26)$$

$p_0$  vanjski tlak,

$p_i$  unutarnji tlak,

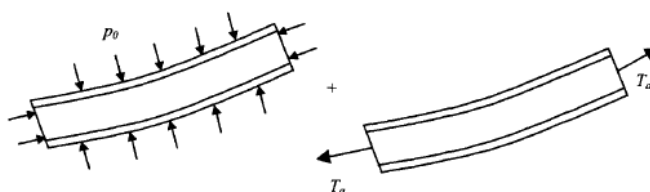
$A_0$  vanjska površina poprečnog presjeka,

$A_i$  unutarnja površina poprečnog presjeka.

Raspodijeljeni tlak na deformirani cjevovod će mijenjati vlačni ukrućujući učinak i indirektno utjecati na zakrivljenost cjevovoda.

Efektivna uzdužna vlačna sila u cjevovodu definirana je prema sljedećem, vidi sliku 2.3.2.6:

$$T_e = T_a + T_p \quad (27)$$



Slika 2.3.2.6. Efektivni uzdužni vlak

Prava vlačna sila dobije se integracijom naprezanja preko poprečnog presjeka čelične stijenke. U dubokoj vodi,  $T_p$  je obično veći od  $T_a$ . Rezultat ovoga je da  $T_e$  poprima negativnu vrijednost a presjek cijevi, kao nosač, bit će u tlaku umjesto u vlaku. Sila  $T_p$  je funkcija od dubine vode tako da će  $T_e$  uvijek biti pozitivna pri morskoj površini i bit će pozitivna ili negativna pri morskom dnu, ovisno o odnosu između  $T_a$  i  $T_p$ .

### 2.3.2.6.3 Zahtjevi normi

Za analizu polaganja cjevovoda zahtjevi norme mogu se odnositi na zakrivljenost cjevovoda kod čeličnog lansera i u području savijanja cjevovoda pri dnu u slučaju S-polaganja. Tipična takva norma je Statoil Specification FSD-101. Za čelični materijal koji udovoljava uvjetima API-5L-X65, zahtjevi su sljedeći:

- savijanje cjevovoda u području pri površini (čelični lanser) dopuštena deformacija iznosi 0,20%,
- savijanje cjevovoda u području pri dnu (rasponski odsječak) dopuštena deformacija iznosi 0,15%.

**Pitati Skansija za korištenje!****NORME**

- (1) - HRN EN 14161 (ICS: 75.200): Industriju nafte i prirodnog plina – Sustav transporta cjevovodima (ISO 13623:2000 modificiran; EN 14161:2003); HZN veljača 2006
- (2) - Offshore Standard Det norske Veritas DnV-OS-F101: Submarine Pipeline Systems october 2007 © Det Norske Veritas
- (3) - Offshore Standard Det norske Veritas DnV-OS-F101: Appendix C - DNV OS-F101 design approach; © Det Norske Veritas
- (4) - Recommended Practice Det norske Veritas DnV-RP-F110: Global Buckling of Submarine Pipelines Structural Design due to High Temperature / High Pressure; © Det Norske Veritas
- (5) - ISO 13623 Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems; Reference number ISO 13623:2000(E)
- (6) - Guide for Building and Classing Subsea Pipeline Systems; American Bureau of Shipping; Houston, 2004
- (7) Code Practice for Pipelines; British Standard BS 8010; Part 3, 1993.
- (8) Recommended Practice DnV-RP-F105; Free Spanning Pipelines; DnV 2006
- (9) HRN EN 14163 Industrija nafte i prirodnog plina – Sustav transporta cjevovodima - Zavarivanje cjevovoda
  
- (10) HRN EN 10208-2 Čelične cijevi za cjevovode zapaljivih medija – Tehnički uvjeti isporuke – 2. Dio: Cijevi razreda B.
- (11) HRN EN 13480-2 Čelični industrijski cjevovodi – Materijali
- (12) HRN EN 13480-4 Čelični industrijski cjevovodi – Proizvodnja i instalacija
- (13) HRN EN 13480-5 Čelični industrijski cjevovodi – Inspekcija i testiranje
- (14) HRN EN ISO 14731 Koordinacija zavarivanja -- Zadaci i odgovornosti
- (15) HRN EN ISO 4063: Zavarivanje i srodni postupci; Nomenklatura referentni brojevi,
- (16) HRN EN 287: Provjera osposobljenosti zavarivača -- Zavarivanje taljenjem – - 1. dio: Čelici,
- (17) HRN EN ISO 15614: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale -- Ispitivanje postupka zavarivanja -- 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla,
- (18) HRN EN ISO 3834-1: Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 1. dio: Kriteriji za izbor odgovarajuće razine zahtjeva za kvalitetu,
- (19) HRN EN ISO 3834-2: Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 2. dio: Sveobuhvatni zahtjevi za kvalitetu,
- (20) HRN EN ISO 6520-1: Zavarivanje i srodni procesi -- Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima -- 1. dio: Zavarivanje spajanjem,
- (21) HRN EN 473: Kvalifikacija i potvrđivanje NDT-osoblja -- Opća načela,
- (22) HRN EN 970: Nerazorno ispitivanje zavara nastalih taljenjem -- Vizualno ispitivanje,
- (23) HRN EN 444: Osnove ispitivanja metalnih materijala prozračivanjem rendgenskim i gama-zrakama,
- (24) HRN EN 584-1: Film za industrijsku radiografiju -- 1. dio: Razredba film-sustava za industrijsku radiografiju,
- (25) HRN EN 1435/A1: Nerazorno ispitivanje zavara -- Radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva
- (26) HRN EN ISO 5817: Razine kvalitete s obzirom na nepravilnosti
- (27) HRN EN 12517: Vrednovanje zavarenih spojeva čelika, nikla, titana i njihovih legura radiografijom -- Razine prihvatljivosti
- (28) HRN EN 10204 Vrste certifikata
- (29) DNV RP F109 - On-bottom Stability Design pf Submarine Pipelines; 2010

Norme za paralelan proračun stabilnosti cjevovoda na morskom dnu:

HRN EN 1991 Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukciju

HRN EN 1997 - Geotehničko projektiranje – 1. Dio: Opća pravila

HRN EN 1998-4 – Projektiranje konstrukcija otpornih na potres – 4. Dio:  
Silosi, spremnici i cjevovodi

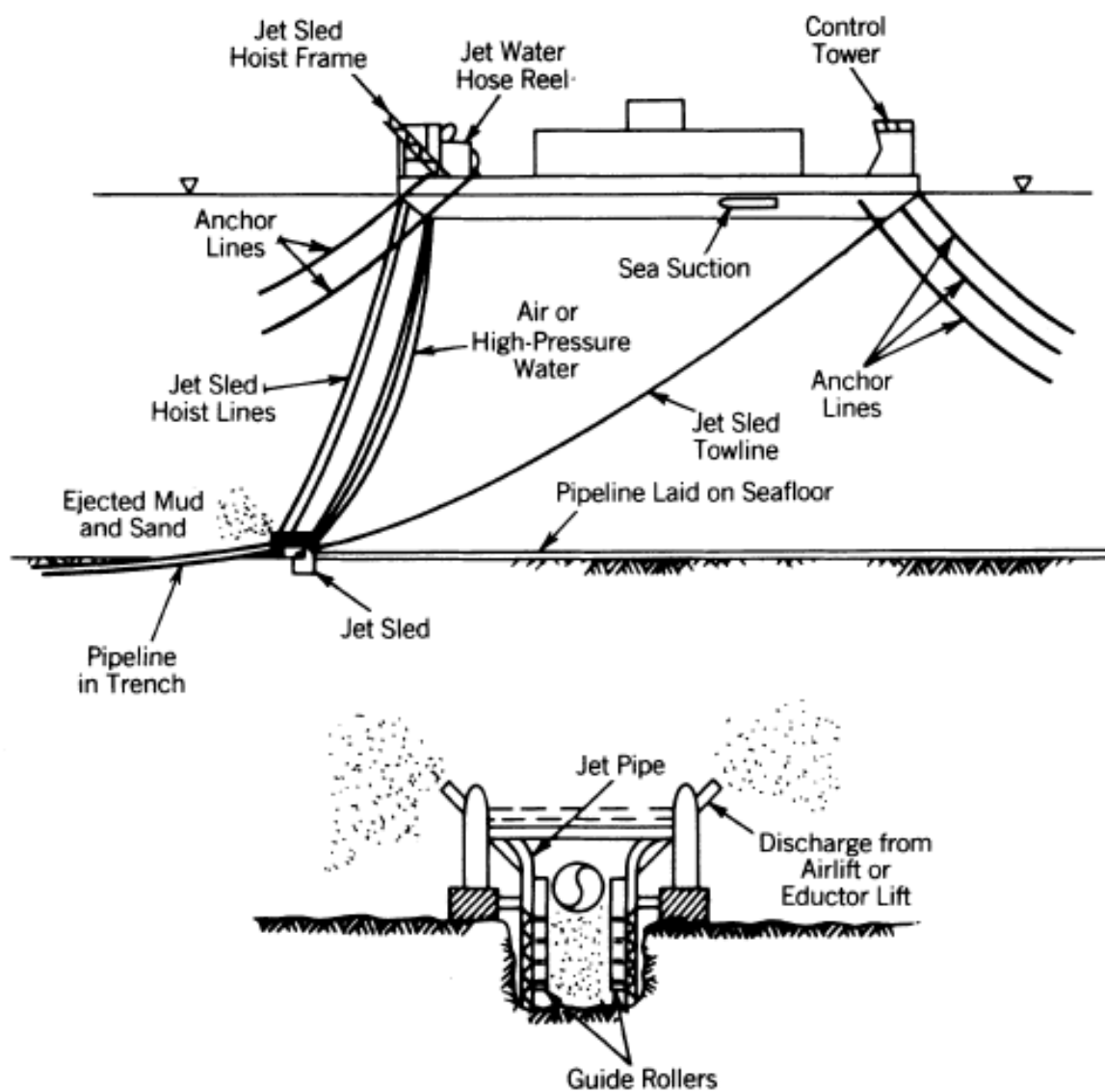
#### **AMERIČKI PROPISI I NORME**

1. ANSI/ASME B31.4 Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids
2. API 5L Specification for Line Pipe
3. ASME VIII Boiler & Pressure Vessel Code
4. API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities,
5. API 1110 Pressure Testing of Liquids Petroleum Pipelines
6. ASME B 36.10M Welded and seamless Wrought Steel Pipe

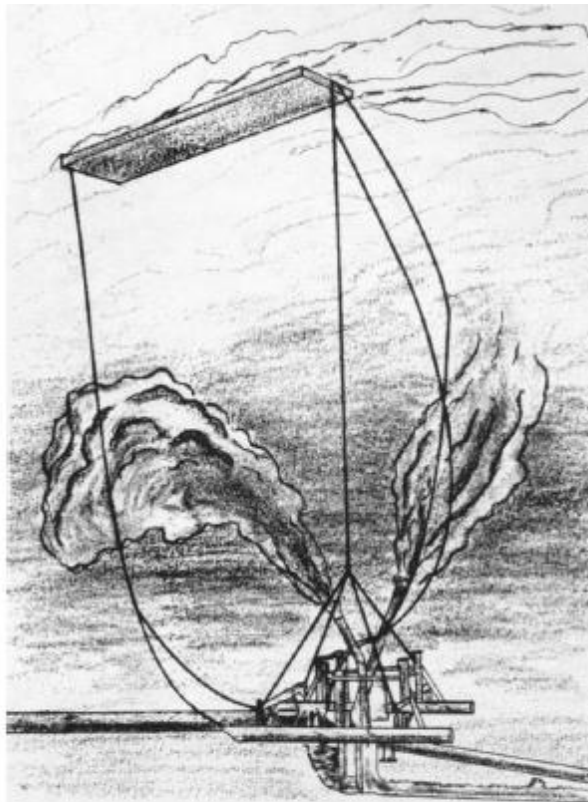
#### 2.3.3. Zaštita cjevovoda: ukopavanje i pokrivanje kamenom

Nekoliko faktora se razmatra da bi se odredili zahtjevi za ukopavanje podmorskih cjevovoda. Ovi faktori obuhvaćaju hidrodinamičke sile na cjevovod tijekom životnog vijeka, raspone, prepreke, izbijanje stijena na površinu i stijene koje se mogu nalaziti duž trase cjevovoda, uvjeti morskih struja, potencijalni ribolov mrežama potegačama kao i potencijalni kontakt sa sidrom prilikom njegovog spuštanja ili povlačenja.

Na slijedećim slikama prikazani su različiti načini zaštite cjevovoda.

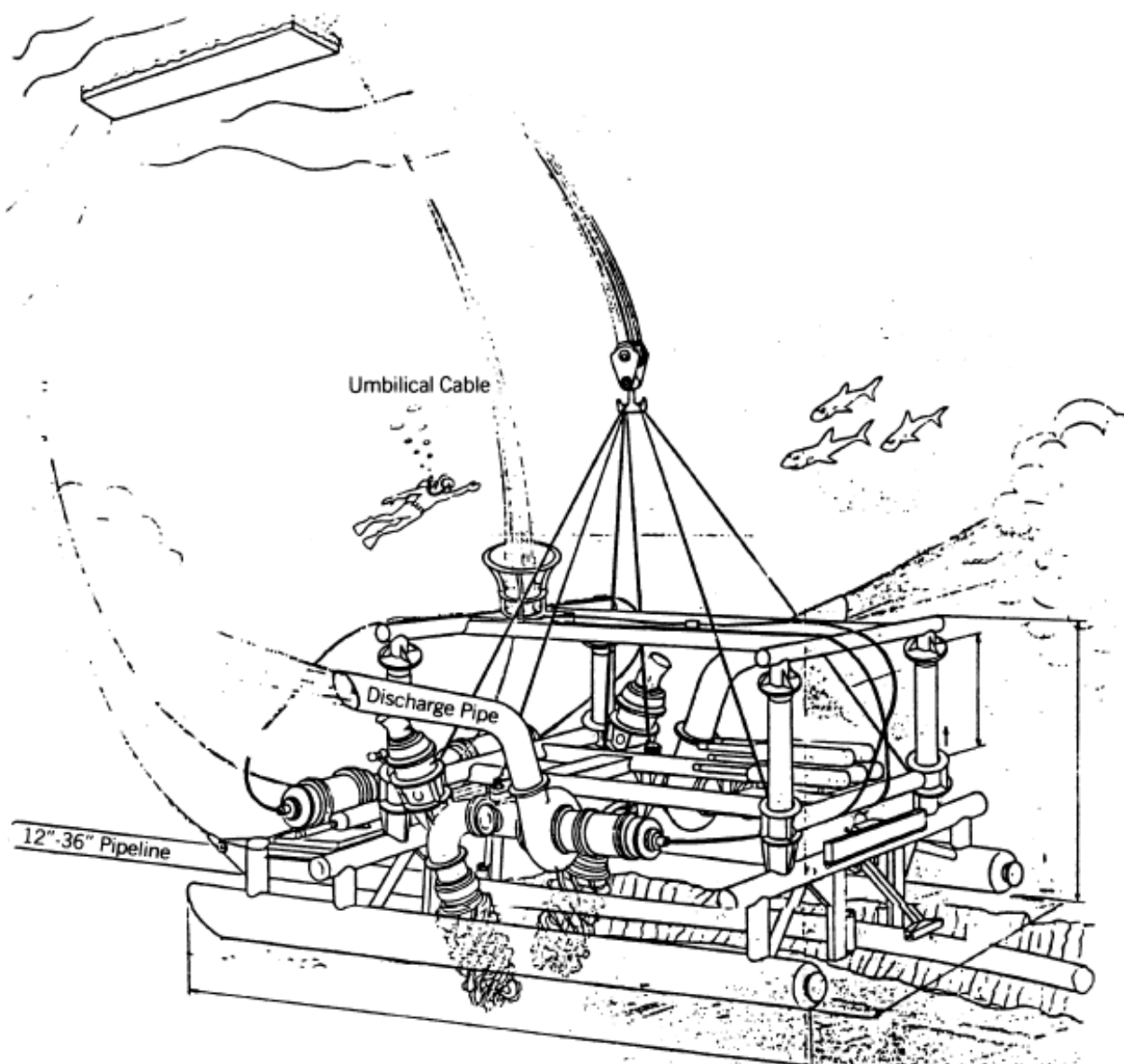


Slika 2.3.3.1 Mlazno ukopavanje cijevi u marinski sediment

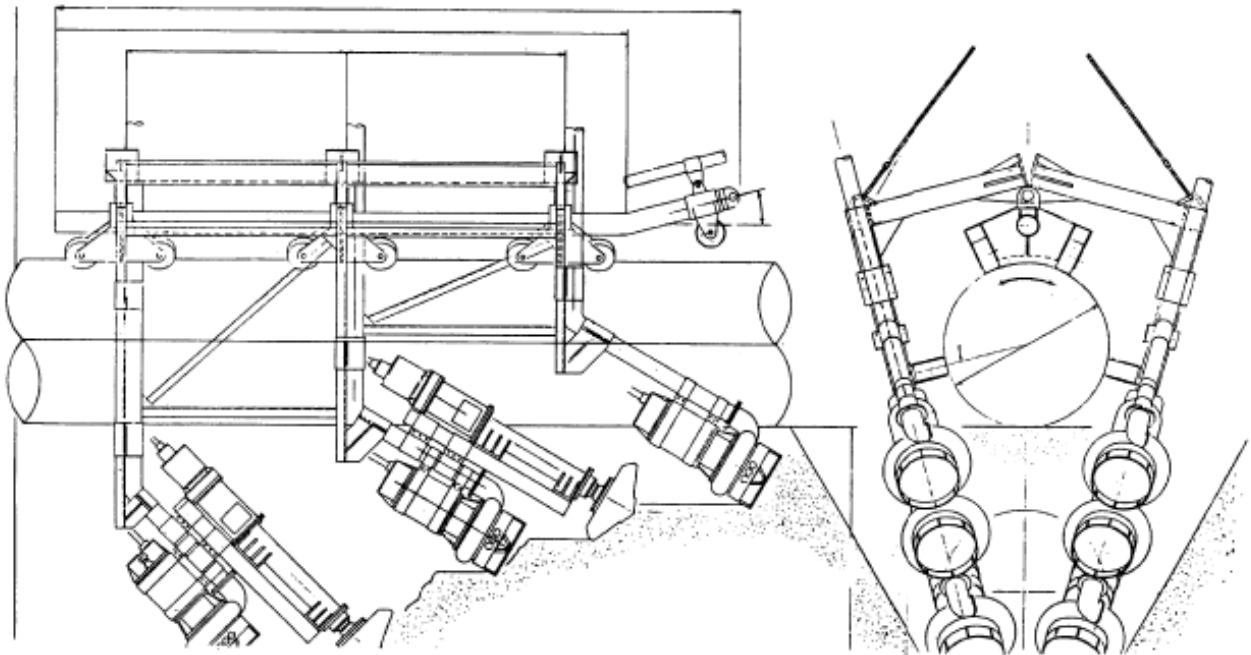


Slika 2.3.3.2 Dubokovodno ukopavanje cijevi u marinski sediment u dvije faze teškim mlaznim uređajem

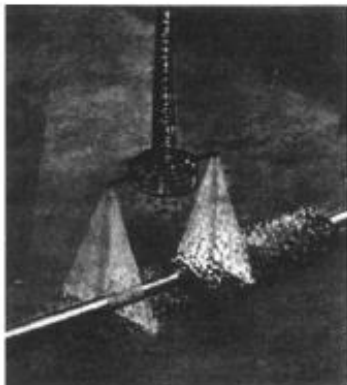
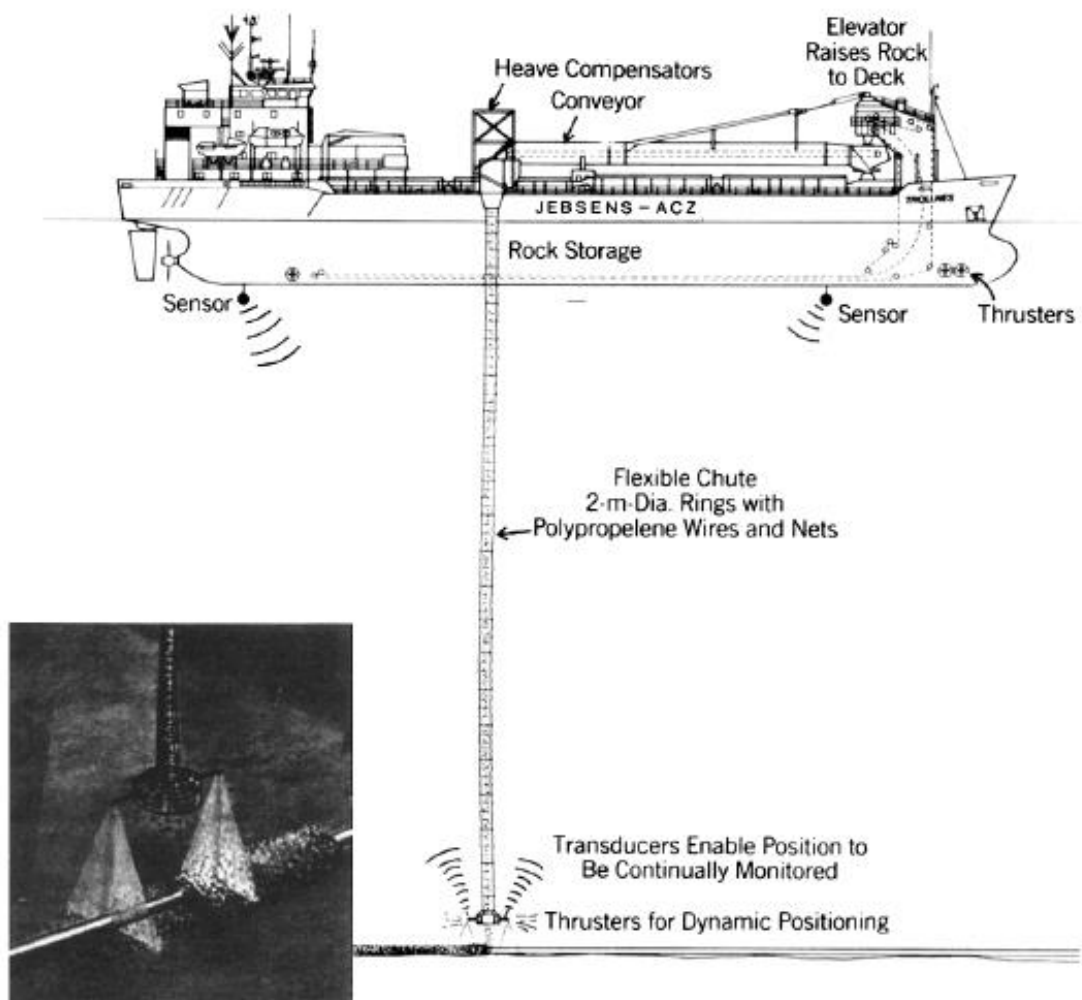




Slika 2.3.3.3 Dubokovodno ukopavanje cijevi u marinski sediment u dvije faze teškim mlaznim uređajem



Slika 2.3.3.4 Dubokovodno ukopavanje cijevi u marinski sediment teškim mlaznim uređajem s više pumpi koje proizvode mlaz



Slika2.3.3.5 Metoda zasipavanja cijevi „fallpipe“ sipanja drobljenog kamena s broda slobodnim padom kroz cijevi precizno pozicionirane GPS sustavom broda u kombinaciji s TV navođenjem robota na kraju cijevi. Brod i robot se pozicioniraju softverski upravljanim turbinama (thrusterima)



Slika2.3.3.6 Metoda zaštite cijevi prekrivanjem madracom od bet. elemenata povezanih u madrac sajlama

Literatura:

[] Viser, R., Van der Meer J., Immediate Displacement of the Seabed During Subsea Rock Installation (SRI), Terra et Aqua, Number 110, 2008

[]

[]

[]

[]

[]

[]

[]

[]

[]

[] Kostrenčić, Z.: Polaganje savitljivih cijevi na morsko dno-modelsko ispitivanje, Građevinar, 1975.

### 3 HIDRAULIČKI PRORAČUN BRODSKE PREVODNICE