

# PRORAČUN SPREMNIKA VODE I POTPORNE KONSTRUKCIJE

---

**Capan, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:910249>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-31**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

# PRORAČUN SPREMNIKA VODE I POTPORNE KONSTRUKCIJE

---

**Capan, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:910249>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-02-16**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Strojarsva

Stručni studij strojarstva

Ivan Capan

# **Proračun spremnika vode i potporne konstrukcije**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2019.

Karlovac University of Applied Sciences  
Mechanical Engineering Department

Professional undergraduate study of Mechanical Engineering

Ivan Capan

# **Design of water tank and the supporting structure**

Final paper

Karlovac, 2019.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Strojarsva

Stručni studij strojarstva

Ivan Capan

# **Proračun spremnika vode i potporne konstrukcije**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:  
Dr.sc Josip Hoster, v. pred.

Karlovac, 2019.

Izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru dr.sc. Josipu Hosteru na svojoj pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Na kraju se posebno zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom cijelog studiranja.

Ivan Capan

## SAŽETAK

Konstrukcija spremnika tekućine uveliko ovisi o njegovoj primjeni. Bitni čimbenici pri konstrukciji spremnika su vanjska djelovanja na spremnik, područje gdje se nalazi, što se skladišti.

U ovom radu prikazan je proračun spremnika koji je ispunjenom vodom. Opisano je kako se spremnik ponaša prilikom opterećenja vjetrom te prilikom potresa. Analizirati će se međusoban utjecaj jedne komponente na drugu. Opisati će se međusobno djelovanje potporne konstrukcije i spremnika.

U uvodnom dijelu objasniti će se osnovna svrha spremnika tekućine i osnovna podjela.

Drugo poglavlje će se odnositi na teoriju ploča. Osnovni proračun kružne ploče koja mora zadovoljiti uvjete u kojima se nalazi.

Treće poglavlje, ujedno i najvažnije za proračun, odnosi se na teoriju ljsaka. Opisati će se osnovni uvjeti i ograničenja ljske. Također, opisati će se i jednadžbe koje će se koristiti u glavnom proračunu.

Četvrto poglavlje obuhvaća teoriju štapova koja je bitna za proračun potporne konstrukcije. Razmatrati će se savijanje i izvijanje štapova.

Peto poglavlje se odnosi na europski standard EUROCODE, u kojem će se ukratko opisati osnovne jednadžbe koje se koriste za proračun spremnika. U ovom radu, prilikom završnog proračuna, se neće uzimati djelovanja vjetra i potresa.

U šestom poglavlju prikazati će se osnovni dijagrami koji će se dobiti nakon proračuna i opisi istih dijagrama.

Sedmo poglavlje odnosi se na prijedlog oslanjanja spremnika kako bi bio siguran zaokolinu.

U osmom, završnom, poglavlju sažeti će se prethodna poglavlja i izvući zaključak.

## SUMMARY

The construction of the water tanks depends in a great extent on its application.

Essential factors in the construction of the tank are external factors which affect the tank, tank location, type of materials it stores etc. This paper presents the calculation of a tank filled with water. It describes how the tank behaves during wind and earthquake loads. The mutual influence of one component on the other will be analyzed. The support structure and the tank will be described.

The introductory part will define the basic purpose of the fluid tank and carry out the basic distribution with respect to the purpose of the reservoir. The second chapter will refer to plate theory, more specifically, it will show a basic circular plate calculation that must meet the conditions in which it is located. The third chapter, also the most important for the calculation, refers to the theory of shell. The basic conditions and limitations for the shell will be described. Also, the equations that will be used in the main calculation will be explained.

The fourth chapter covers the theory of rods which is important for the calculation of the support structure. Bending and bending of the rods will be considered.

The fifth chapter refers to the European standard EUROCODE, which will briefly describe the basic equations used in the tank calculation. In this paper, no wind and earthquake effect will be taken into account when calculating the final calculation. The sixth chapter will show basic diagrams that will be derived from the calculation and will provide the explanations and descriptions of the mentioned diagrams.

The seventh chapter refers to the proposal of the tank support in order to be environmentally safe.

In the eighth, final chapter, all the chapters will be summarized and drawn to provide a unified conclusion.



**SADRŽAJ**

SAŽETAK .....	1
SUMMARY .....	2
SADRŽAJ .....	3
POPIS SLIKA .....	4
1. Uvod .....	5
2. Teorija ploča .....	6
3. Teorija ljusaka .....	8
3.1 Cilindrična ljuska.....	9
3.1.1 Naprezanje i pomaci usred membranskih sila .....	9
3.1.2 Naprezanje i pomaci usred savijanja .....	11
3.2 Konusna ljuska .....	13
3.2.1 Naprezanje i pomaci usred membranskih sila .....	13
3.2.2 Naprezanje i pomaci uslijed savijanja.....	15
3.3 Međusobno djelovanje ljusaka na spoju.....	16
4. Teorija savijanja i izvijanja štapova .....	19
4.1 Savijanje.....	19
4.2 Izvijanje .....	21
5. Europski standard "EUROCODE" .....	24
5.1 Djelovanje vjetra .....	24
5.1.1 Opterećenje vjetrom na plašt spremnika .....	26
5.1.2 Ukupna sila vjetra na plašt spremnika .....	27
5.2 Djelovanje potresa.....	28
6. Numerički proračun.....	31
6.1 Dijagram hidrostatskog tlaka.....	32
6.2 Dijagram momenta .....	33
6.3 Dijagram raspodjele naprezanja .....	34
6.4 Dijagram raspodjele pomaka .....	35
7. Potporna konstrukcija .....	36
7.1 Proračun štapova .....	37
7.2 Zavareni spojevi .....	39
8. Zaključak .....	43
9. Literatura .....	44

## POPIS SLIKA

Slika 1. Predodžba cilindričnog spremnika. Izvor [10].	5
Slika 2. Predodžba ploče. Izvor [1].	6
Slika 3. Predodžba progiba i kuta nagiba ploče. Izvor [4].	6
Slika 4. Predodžba ljuskastog kontinuuma. Izvor [4].	8
Slika 5. Predodžba raspodjele naprezanja po debljini ljuske. Izvor [1].	9
Slika 6. Predodžba membranskih pomak za različite debljine ljuske. Izvorno autor.	10
Slika 7. Predodžba konusne ljuske i njenih parametara. Izvor [1].	13
Slika 8. Predodžba konusne ljuske prilikom membranskog opterećenja. Izvor [1].	14
Slika 9. Predodžba konusne ljuske. Izvor [1].	15
Slika 10. Predodžba spoja ploče i cilindrične ljuske. Izvorno autor.	16
Slika 11. Predodžba spoja cilindrične i konusne ljuske. Izvorno autor.	17
Slika 12. Predodžba spoja konusne i cilindrične ljuske. Izvorno autor.	18
Slika 13. Predodžba čistog savijanja. Izvor [2].	20
Slika 14. Predodžba djelovanja kritične sile. Izvor [2].	22
Slika 15. Predodžba Ekscentrične sile. Izvorno autor.	22
Slika 16. Predodžba djelovanja ekscentrične sile. Izvorno autor.	23
Slika 17. Predodžba osnovne brzine vjetra za Hrvatsku. Izvor [12].	25
Slika 18. Predodžba dijagrama faktora izloženosti. Izvor [6].	26
Slika 19. Predodžba potresnih područja RH. Izvor [11].	30
Slika 20. Predodžba dijagrama tlaka. Izvorno autor.	32
Slika 21. Predodžba dijagrama momenta. Izvorno autor.	33
Slika 22. Predodžba ekvivalentnog naprezanje. Izvorno autor.	34
Slika 23. Predodžba dijagrama ukupnog pomaka. Izvorno autor.	35
Slika 24. Predodžba potporne konstrukcije. Izvorno autor.	36
Slika 25. Predodžba spremnika pod utjecajem opterećenja. Izvorno autor.	37
Slika 26. predodžba proračunskog modela deformiranja spremnika i štapova. Izvorno autor.	38
Slika 27. Predodžba raspodjele naprezanja. Izvorno autor.	38
Slika 28. Predodžba rasporeda opterećenja štapa a) i b). Izvorno autor.	38
Slika 29. Predodžba proračunskog modela deformiranja spremnika. Izvorno autor.	39
Slika 30. Predodžba detalja zavarenog spoja. Izvorno autor.	41

## 1. Uvod

Spremnici tekućine su vrlo raširene konstrukcije diljem svijeta. Svoju primjenu imaju u svim granama industrije. Služe za skladištenje dobara u strojarstvu, prehrambenoj industriji, petrokemiji, itd. U nekim primjenama ti spremnici su opterećeni velikim vanjskim silama (vjetar, potres, snijeg) i unutarnjim silama (tlak). Zbog toga spremnici moraju biti dobro i sigurno konstruirani. Tu se služimo raznim normama i standardima.

Postoje mnogo različitih oblika spremnika. Najčešće, spremnici su cilindričnog oblika koji je prikazan na slici 1. U razne svrhe također koristimo i konusne, sferne i kuglaste spremnike. Spremnik također može biti vertikalno ili horizontalno položen na površinu. Uz sve te podjele najbitnija podjela spremnika je na nadzemne i podzemne. Nadzemnim spremnicima cijela konstrukcija izložena je djelovanju vanjskih sila. Neki od načina postavljanja su direktno na betonsku ploču ili uzdignuti na nosačima.

Podzemni spremnici su manjih dimenzija od nadzemnih. Obično se koriste za skladištenje goriva i raznih kemikalija jer ne smiju biti izravno izloženi utjecaju vanjskih sila. Nadalje spremnici se dijele na visokotlačne i niskotlačne. Kod visokotlačnih spremnika unutarnji tlak je puno viši od atmosferskog tlaka, dok je kod niskotlačnih spremnika tlak je malo iznad atmosferskog tlaka.

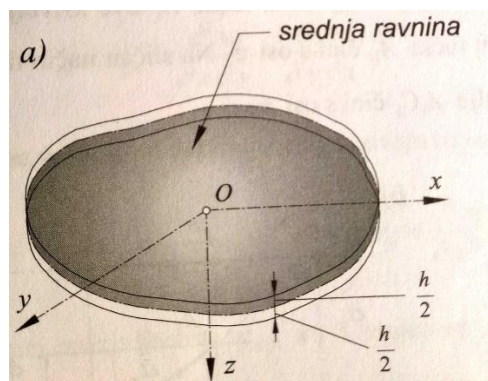


Slika 1. Predodžba cilindričnog spremnika. Izvor [10].

Napretkom svih grana strojarstva tehnologija izrade spremnika uvelike je napredovala, a samim time i ekonomičnost izrade. Spremnik koji će se razmatrati u radu bit će sastavljen od sljedećih djelova: ploča, donja cilindrična ljuska, konusna ljuska, gornja cilindrična ljuska. Na vrhu se nalazi sferni poklopac, ali on se ne razrađuje u ovome radu.

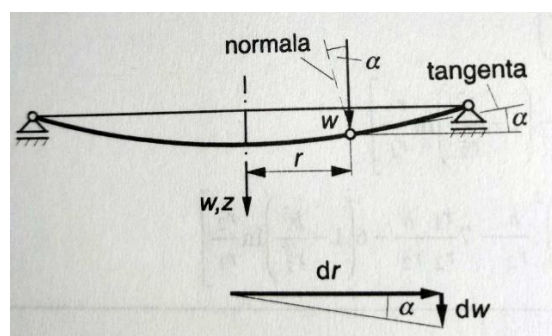
## 2. Teorija ploča

Ploča je plosnato tijelo koje je ograničeno dvjema ploham a njihova udaljenost je vrlo mala u odnosu na mjere u ravnini ploče. Između tih dviju ploha nalazi se ploha koja je jednako udaljena od obje plohe. Ta ploha se naziva srednjom plohom. Tu je razlika između ploče i ljuske kojoj je srednja ploha zakrivljena.



Slika 2. Predodžba ploče. Izvor [1].

Nakon što se ploča optereti, ona iz stanja ravne plohe prelazi u stanje zakrivljenje plohe. Zakrivljena ploha ima naziv elastične plohe. Slika 3 prikazuje kako se ploča ponaša prilikom opterećenja.



Slika 3. Predodžba progiba i kuta nagiba ploče. Izvor [4].

Ograničenja koja su nam važna u teoriji ploča su sljedeća:

- Ploča je tanka ako je [1]:

$$\frac{h}{R} < \frac{1}{10} \quad (1)$$

- Progib je mali:

$$\frac{w_{max}}{h} < \frac{1}{5} \quad (2)$$

- Ploča je osnosimetrična, osnosimetrično opterećena i učvršćena

Nadalje, za analizu naprezanja i deformacije moramo uzeti u obzir sljedeće pretpostavke:

- Prilikom deformiranja, normale na srednju plohu ostaju ravne i okomite na elastičnu plohu
- Elastična ploha je i neutralna ploha, tj. naprezanja su jednaka nuli
- U ploči vlada približno ravninsko stanje

Prilikom izračuna ukupnog kuta nagiba u obzir se mora uzeti sljedeći parametri:

- Djelovanje momenta  $M$ ,  $\alpha(M)$
- Djelovanje fluida na ploču unutar spremnika,  $\alpha(p_N)$

Ukupan kut nagiba dobit ćemo kada zbrojimo dva kuta nagiba navedena iznad. Izrazi koji se koriste u tu svrhu su sljedeći:

$$\begin{aligned} \alpha_{ploče} &= \alpha(M) + \alpha(p_N), \\ \alpha(p_N) &= \frac{pR}{16D} \left( R^2 \frac{3+v}{1+v} - R^2 \right), \\ \alpha(M) &= \frac{MR}{D(1+v)}, \end{aligned} \quad (3)$$

gdje je:

$p$  – tlak

$D$  – fleksijska krutost ploče

Nadalje, prilikom djelovanja tlaka i momenta javlja se i ukupni progib koji nije zanemariv. Izos progiba bi morao biti manji od debljine same ploče kako bi proračun zadovoljio. Izraz koji nam opisuje maksimalni progib za ploču na koju djeluje moment i tlak je sljedeći:

$$\begin{aligned} w &= w(M) + w(p_N), \\ w(M) &= \frac{6(1-v)}{Eh^3} MR^2, \\ w(p_N) &= \frac{pR^4}{64D} \left[ \frac{5+v}{1+v} + \left(\frac{r}{R}\right)^4 - \frac{6+2v}{1+v} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

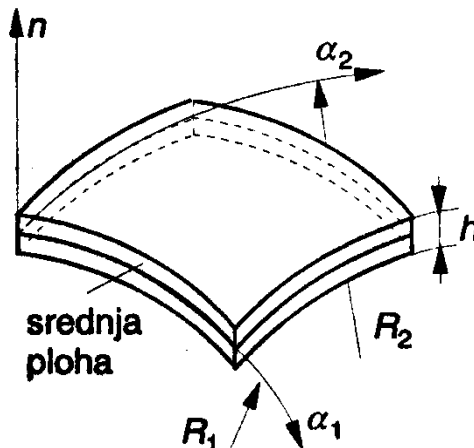
Oznaka  $r$  se odnosi na dio ploče koje je pod opterećenjem. Kako je ploča opterećena cijelom duljinom vrijedi sljedeća jednakost  $r = R$ .

Također bitna stavka kod proračuna ploče je i maksimalno naprezanje. Maksimalno naprezanje djeluje na gornjoj i donjoj površini ploče. Izrazi koji nam opisuju maksimalna naprezanja u ploči su sljedeća:

$$\sigma_{r,max} = \pm \frac{6M_r}{h^2}, \quad \sigma_{\varphi,max} = \pm \frac{6M_{\varphi}}{h^2}. \quad (5)$$

### 3. Teorija ljsaka

Ljuska je vrlo važan konstrukcijski element koji je vrlo raširen u području strojarstva. Zahvaljujući posebnom obliku ljuske, raspodjela sila na ljusku je vrlo povoljna. To nam omogućuje da imamo mali omjer debljine i duljine. Zbog toga nam ljuske služe kao konstrukcijski elementi za spremnike, hale, krovne konstrukcije za velike dvorane. Geometrija ljuske je potpuno određena ako je poznat oblik srednje plohe i debljina  $h$  u svakoj njoj točki. Slika 2 nam prikazuje ljuskasti kontinuum koji ima neku debljiju i srednju plohu.



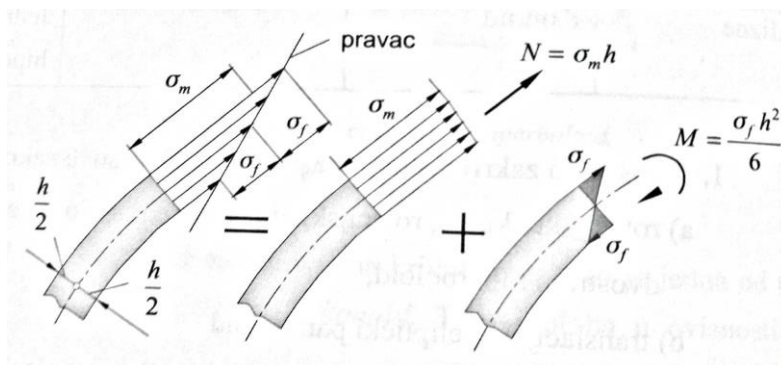
Slika 4. Predodžba ljuskastog kontinuuma. Izvor [4].

Raspodjela naprezanja po normali na srednju plohu ljuske može biti nejednolika. Naprezanja su raspodijeljena približno po hiperboličkom zakonu.

Naprezanje se može rastaviti na dva dijela:

- Membransko naprezanje, koje je jednoliko raspoređeno po plohi
- Fleksijsko naprezanje (naprezanje savijanja), koje se mijenja po linearnom zakonu

Membransko naprezanje reducira se na normalnu silu, dok se naprezanje savijanja reducira na spreg. Prema tome može se reći da naprezanje savijanja potječe od momenta savijanja, dok membransko naprezanje od membranske ili normalne sile.



Slika 5. Predodžba raspodjele naprezanja po debljini ljuske. Izvor [1].

### 3.1 Cilindrična ljuska

Već je spomenuto kako je ljuska potpuno zadana ako je poznata srednja ploha i debljina ljuske  $h$ . Srednja ploha osnosimetrične ljuske dobiva se rotacijom ravninske krivulje. Također svaki oblik ljuske ima svoje membransko i savojno naprezanje, pa tako i cilindrična ljuska.

#### 3.1.1 Naprezanje i pomaci usred membranskih sila

Proučavanje membranskog naprezanja jako nam je važno iz sljedećih razloga:

- Ljuske s membranskim naprezanjem imaju najpovoljniji omjer čvrstoće prema težini te krutosti prema težni, pa je poželjno da u ljusci vlada membransko naprezanje
- Ukoliko je konstrukcija napravljena od duktilnog materijala ljuska se analizira samo na temelju membranskog naprezanja
- Membranska analiza je mnogo jednostavnija od fleksijske analize

Osnovne pretpostavke za membransko naprezanje:

- Ljuska je tanka ako:

$$\frac{h}{r_1} \leq \frac{1}{20}; \frac{h}{r_2} \leq \frac{1}{20} \quad (6)$$

- Ljuska je opterećena i učvršćena na taj način da u njoj mora vladati membransko naprezanje

Kod prve pretpostavke javlja se problem s  $r_2$  jer se nalazi blizu tjemena pa je iznos vrlo mali. Treba napomenuti da bi uopće došlo do membranskog pomaka, ljuska mora biti učvršćena tako da se omogući membranski pomak. Također, ukoliko je povezano dvije ili više ljuski, sve ljuske moraju imati jednake radijalne i kutne membranske pomake.

Jednadžba koja opisuje membranske pomake cilindričnoj ljusci sljedećeg je oblika:

$$w_c^m = \frac{\rho g R^2}{E h_c} (H - x) \quad (7)$$

gdje je:

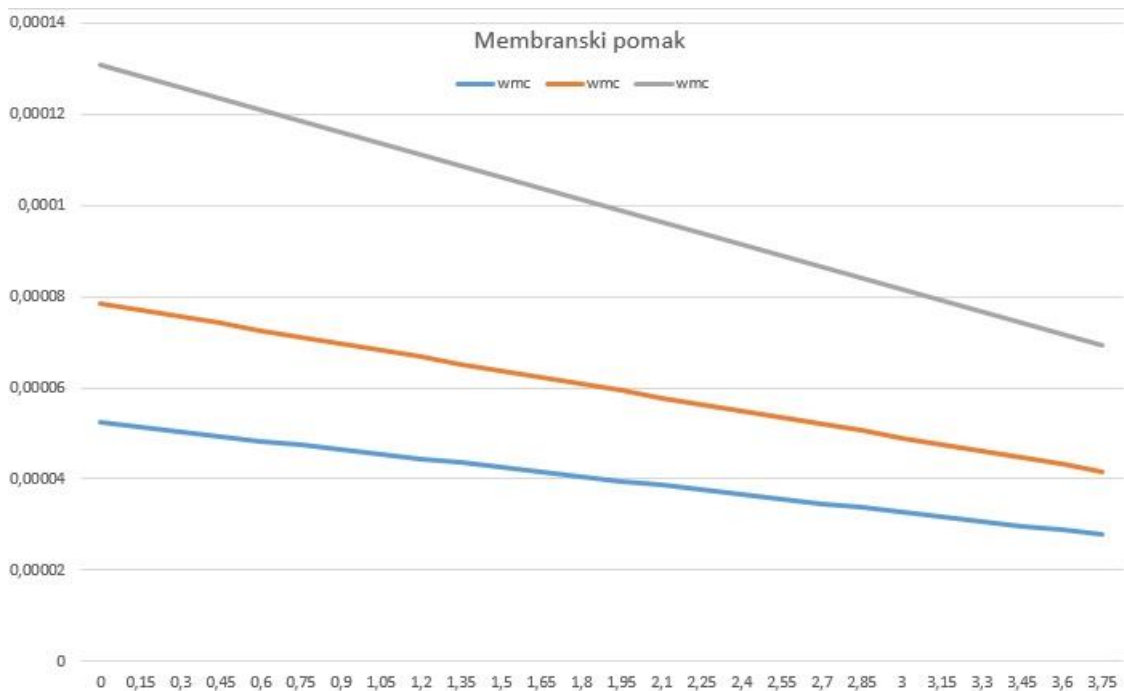
$\rho$  – gustoća fluida

$R$  – polumjer

$E$  – Youngov modul elastičnosti

$h_c$  – debljina cilindrične ljuske

Membranski pomaci uveliko ovise o debljini cilindrične ljuske. To se najbolje vidi na sljedećoj slici koja prikazuje membranski pomak cilindrične ljuske za tri različite debljine ljuske.



Slika 6. Predodžba membranskih pomak za različite debljine ljuske. Izvorno autor.

Gornja linija na grafu prikazuje membranski pomak kada je debljina ljuske 12mm, srednja linija se odnosi na cilindričnu ljusku debljine 20mm a donja linija na cilindričnu ljusku debljine 30mm.

Naprezanja tijekom membranskih sila imaju sljedeće izraze:

$$\sigma_{r,max} = \frac{N_x}{h}, \quad \sigma_{\varphi,max} = \frac{N_{\varphi}}{h}. \quad (6)$$



### 3.1.2 Naprezanje i pomaci usred savijanja

Savijanje tankih cilindričnih ljuski opisujemo pomoću linearne diferencijalne jednadžbe četvrtoga reda. Njezino opće rješenje se sastoji od kombinacije eksponencijalnih i trigonometrijskih funkcija. Diferencijalna jednadžba savijanja cilindrične ljuske glasi

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = 0 \quad (9)$$

Funkcija koja predstavlja rješenje diferencijalne jednadžbe ima svojstvo da je četvrta derivacija funkcije proporcionalna samoj funkciji i da je suprotnog predznaka. To svojstvo imaju eksponencijalno-trigonometrijske funkcije i one imaju sljedeći oblik:

$$\begin{aligned} f_1(\beta x) &= e^{-\beta x}(\cos\beta x + \sin\beta x) \\ f_2(\beta x) &= e^{-\beta x}\sin\beta x \\ f_3(\beta x) &= e^{-\beta x}(\cos\beta - \sin\beta x) \\ f_4(\beta x) &= e^{-\beta x}\cos\beta x \end{aligned} \quad (10)$$

Sve četiri funkcije međusobno su zavisne.

Jednadžbe koje ćemo izvesti u ovom dijelu rada vrijedi će uz sljedeća ograničenja:

- Ljuska je tanka

$$\frac{h}{R} < \frac{1}{20} \quad (11)$$

- Progibi su mali

$$\frac{w_{max}}{h} < \frac{1}{5} \quad (7)$$

- Ljuska je osnosimetrična, osnosimetrično oslonje i opterećena
- Komponente opterećenja su konstantne ili se mijenjaju po zakonu pravca

Jednadžba koja opisuje progib cilindrične ljuske prilikom savijanja ima sljedeći oblik:

$$w^f = \frac{Q_0}{2D\beta^3} f_4(\beta x) + \frac{M_0}{2D\beta^2} f_3(\beta x) \quad (12)$$

Nakon što se sada uvedu eksonencijalno-trigonometrijske funkcije, kompletni oblik jednadžbe ima sljedeći oblik:

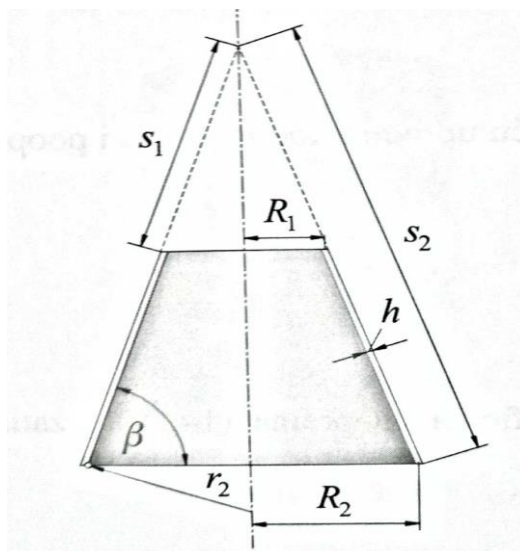
$$w^f = \frac{Q_0}{2D\beta^3} e^{-\beta x} \cos\beta x + \frac{M_0}{2D\beta^2} e^{-\beta x} (\cos\beta x - \sin\beta x) \quad (13)$$

Naprezanja koja se javljaju tijekom savojnih sila imaju dvije komponente. Uzima se u obzir naprezanje tijekom membranskih sila i tome dodajemo savojnu komponentu naprezanja. Kada se to spoji u jedan izraz, ti izrazi imaju sljedeći oblik:

$$\sigma_{r,max} = \frac{N_x}{h} \pm \frac{6M_x}{h^2}, \quad \sigma_{\varphi,max} = \frac{N_{\varphi}}{h} \pm \frac{6M_{\varphi}}{h^2} \quad (8)$$

### 3.2 Konusna ljuska

Konusne ljuske su još jedna posebna vrsta rotacijskih ljuski. Srednja površina konusne ljuske se dobiva rotiranjem ravne linije oko osi koja nije paralelna sa samom linijom. Na slici 7 se vidi s kojim je parametrima konusna ljuska određena.



Slika 7. Predodžba konusne ljuske i njenih parametara. Izvor [1].

Da bi se ljuska mogla smatrati dugom, potrebno je odrediti uvjet za to. Jedan od uvjeta, koji je ujedno i ispunjen je zadan sljedećim izrazom:

$$\beta l > 3$$

Ako se izraz za geometrijsku materijalnu značajku raspiše dobit ćemo sljedeći izraz:

$$l > 2,33R \sqrt{\frac{h}{R}}$$

#### 3.2.1 Naprezanje i pomaci usred membranskih sila

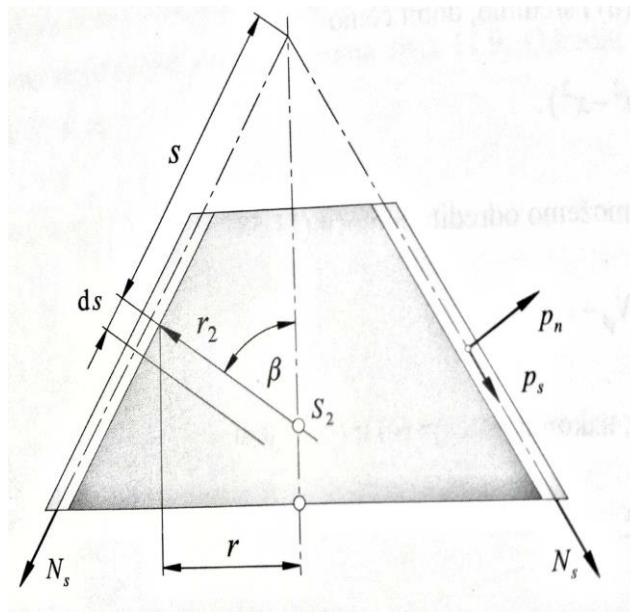
Membranska naprezanja u konusnoj ljusci dolaze zbog djelovanja tlaka na stijenku konusne ljuske. Na slici 8 vidimo djelovanje sila, a u ovom radu zanemarujemo  $p_s$ . Koordinata  $s$  i polumjeri zakrivljenosti povezani su sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} r_1 &= \infty, \\ r_2 &= s \cot(\beta), \\ r &= s \cos(\beta), \\ s &= r_2 \tan(\beta), \end{aligned} \tag{15}$$

$$s = \frac{r}{\cos(\beta)}$$

Izraz koji nam potvrđuje kako membransko naprezanje ovisi o tlaku koji djeluje na stijenku određene debljine ima sljedeći oblik:

$$w_m^k = \frac{\rho g R^2}{Eh} (H - x). \quad (16)$$



Slika 8. Predodžba konusne ljuske prilikom membranskog opterećenja. Izvor [1].

### 3.2.2 Naprezanje i pomaci uslijed savijanja

Prvo je potrebno odrediti neka ograničenja koja će morati biti zadovoljena prije razmatranja savijanja konusne ljuske, a ta ograničenja su:

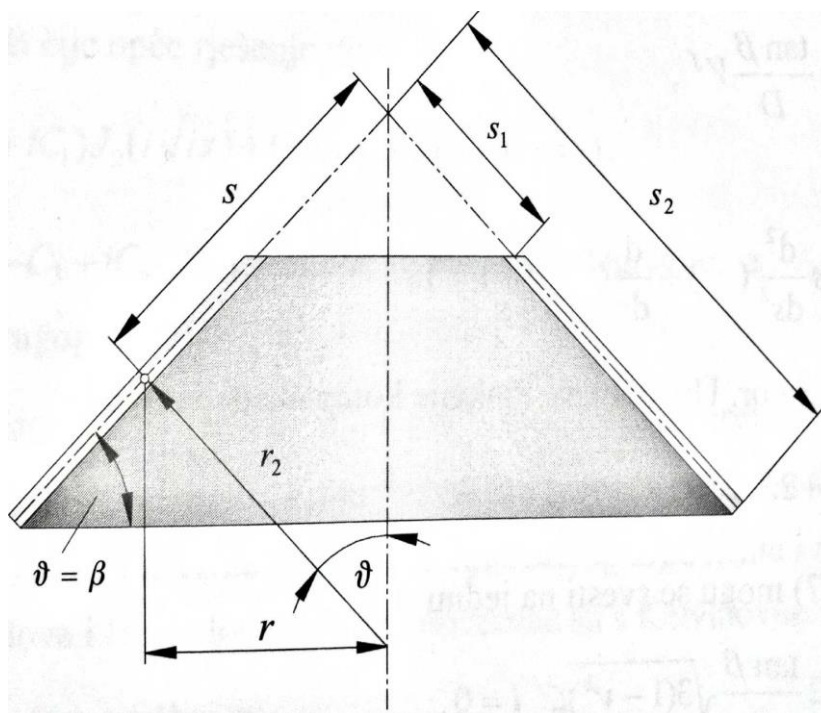
- Ljuska je tanka

$$\frac{h}{r_1} \leq \frac{1}{20}; \frac{h}{r_2} \leq \frac{1}{20}, \quad (17)$$

- Ljuska je osnosimetrična, osnosimetrično opterećena i učvršćena

Također, kao i kod cilindričnih ljuski imamo i neke pretpostavke. Te pretpostavke su:

- Normale na srednju plohu u toku deformiranja ostaju ravne i okomite na deformiranu srednju plohu
- U ljusci vlada približno dvoosno stanje naprezanja u kojem je naprezanje  $\sigma_z$  zanemarivo malo u usporedbi s naprezanjima  $\sigma_\vartheta$  i  $\sigma_\varphi$



Slika 9. Predodžba konusne ljuske. Izvor [1].

Na pomake prilikom savijanja glavni utjecaj ima moment savijanja i sila. To vidimo iz sljedeće jednadžbe:

$$w_k^f = \frac{Q}{2D_k \beta_k^3} f_4(\beta x) + \frac{M}{2D_k \beta_k^2} f_3(\beta x) \quad (18)$$

### 3.3 Međusobno djelovanje ljusaka na spoju

Prilikom numeričke analize, u obzir se mora uzeti međusobna djelovanja jedne komponente konstrukcije na drugu. Kako bi se u obzir uzele odgovarajuće sile i momenti na pojedinim spojevima mora se izjednačiti progib i kut nagiba. Prvo je potrebno izračunati iznos sile i momenta na spoju cilindrične ljuske i ploče. Membranske pomake ćemo zanemariti jer su jako mali i nemaju nikakav utjecaj na proračun. Sljedeći izrazi nam pokazuju međusobni odnos tih dviju komponenti:

$$M = \frac{1}{u} \left( \alpha_c^m(0) + \beta_c w_c^m(0) + \frac{p(H)R^3}{8D_p(1+\nu)} \right),$$

$$Q = 2D_c \beta_c^3 (-w_c^m(0) + \frac{M}{2D_c \beta_c^2}),$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)},$$

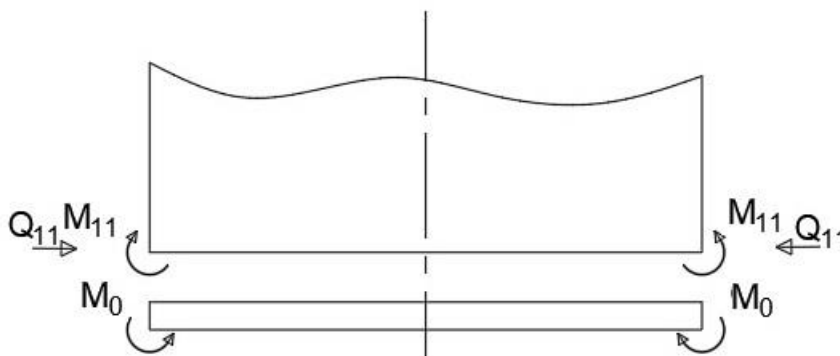
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Eh}{4DR^2}}, \quad (19)$$

gdje je:

D – fleksijska krutost ploče

B – geometrijska materijalna značajka

Slika 10 nam prikazuje smjerove sila i momenata.



Slika 10. Predodžba spoja ploče i cilindrične ljuske. Izvorno autor.

Iz prijašnjeg dijela rada znamo da se svaki pomak sastoji od membranskog pomaka i savojnog pomaka. Sljedeći korak je izjednačiti progibe i kuteve nagiba između gornjeg dijela donje ljuske i donjeg dijela konusne ljuske. U svrhu dobivanja jednakog ukupnog progiba na njihovom spoju. Slika 10 nam prkazuje

smjerove sile i momenata na njihovom spoju. Izrazi od kojih se mora početi izračun su sljedeći:

$$\begin{aligned} w_c &= w_k, \\ \alpha_c &= \alpha_k \end{aligned} \quad (20)$$

Oznake koje sadrže indeks c odnose se na cilindričnu ljusku, a oznake koje sadrže indeks k odnose se na konusnu ljusku. Nadalje vrlo je bitno uzeti u obzir smjerove sile i momenata. Ako smjer sile ide u pozitivnom smjeru osi x sila će biti negativna, ako ide u negativnom smjeru osi x sila će biti pozitivna. Ako se promatra samo lijeva strana spremnika, tada će sila Q imati negativan predznak. Razlog tome je što sila Q na spoju donjeg djela konusne ljuske i donjeg dijela cilindrične ljuske ima pozitivan predznak. Jednadžbe koje se koriste za uvrštavanje u jednadžbu (19) su sljedeće:

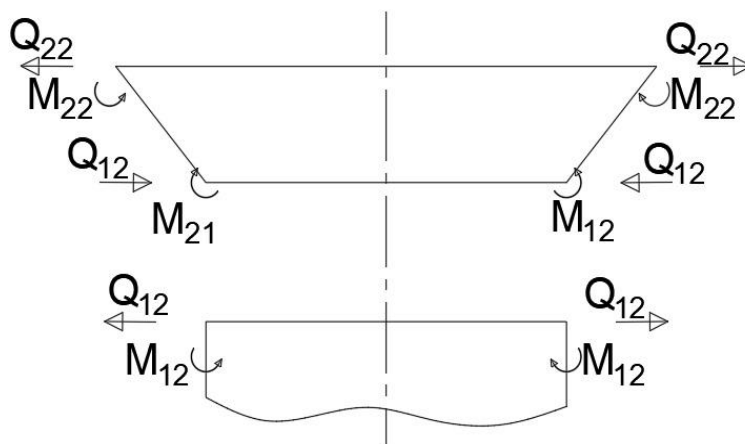
Cilindrična ljuska:

$$\begin{aligned} w_c &= \frac{Q}{2D_c\beta_c^3} f_4(\beta x) - \frac{M}{2D_c\beta_c^2} f_3(\beta x) + \frac{\rho R^2(H-x)}{Eh_c}, \\ \alpha_c &= -\frac{Q}{2D_c\beta_c^2} f_3(\beta x) + \frac{M}{D_c\beta_c} f_4(\beta x) + \frac{\rho g R^2}{Eh_c}. \end{aligned} \quad (21)$$

Konusna ljuska:

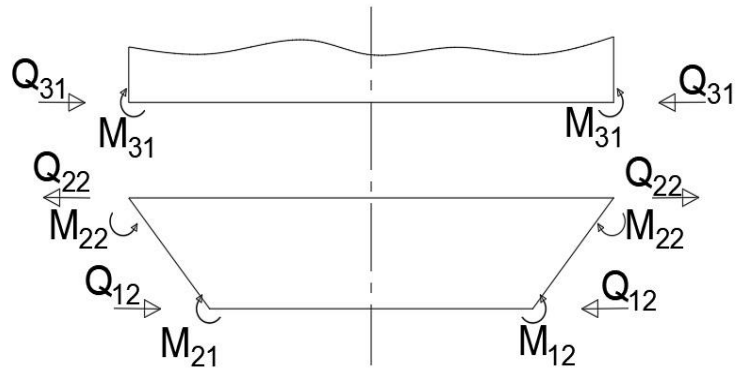
$$\begin{aligned} w_k &= -\frac{Q}{2D_k\beta_k^3} f_4(\beta x) + \frac{M}{2D_k\beta_k^2} f_3(\beta x) + \frac{\rho R^2(H-x)}{Eh_k}, \\ \alpha_k &= \frac{Q}{2D_k\beta_k^2} f_3(\beta x) - \frac{M}{D_k\beta_k} f_4(\beta x) + \frac{\rho g R^2}{Eh_k}. \end{aligned} \quad (22)$$

Kada se zadane jednadžbe izjednače dobijemo dvije jednadžbe s dvije nepoznanice. Kada dobijemo rezultate za Q i M, te vrijednosti se moraju unesti u proračun kako bi se vrijednosti progiba izjednačili.



Slika 11. Predodžba spoja cilindrične i konusne ljuske. Izvorno autor.

Nakon što se izračuna spoj donjeg dijela konuse ljuske i gornji dio cilindrične ljuske, potrebno je na isti način učiniti i s gornjim dijelom konusne ljuske i donjeg dijela gorne cilindrične ljuske. Samo što je potrebno uzeti u obzir da sile  $Q$  djeluju u drugom smjeru pa tako treba promijeniti predznake u jednadžbama. Slika 12 nam prikazuje smjerove tih sila.



Slika 12. Predodžba spoja konusne i cilindrične ljuske. Izvorno autor.



## 4. Teorija savijanja i izvijanja štapova

Štap je tijelo koje ima manju poprečnu dimenziju u odnosu na uzdužnu dimenziju. Štapovi mogu biti ravni ili zakrivljeni, konstantnog ili promijenjivog presjeka. Koristimo ih u svrhu izrade okvirnih konstrukcija koje su nosivi elementi u svrhu izrade raznih industrijskih građevina kao npr. hale, spremišta, pogona, itd. Pod djelovanjem vanjskih čimbenika štapovi se deformiraju, tj. mijenjaju svoj oblik i dimenziju. Zato je bitno kvalitetno proračunati štapove na savijanje i izvijanje.

### 4.1 Savijanje

Savijanje ili fleksija štapa je djelovanje opterećenja na cijelu dužinu štapa. Osnovna podjela savijanja štapova je sljedeća:

- čisto savijanje – savijanje pri kojem se se u poprečnom presjeku štapa javlja samo moment savijanja
- poprečno savijanje – savijanje pri kojem se uz moment savijanja javlja i poprečna sila
- obično savijanje – djelovanje momenta savijanja oko glavne osi tromosti
- koso savijanje – moment savijanja ne djeluje u glavnoj osi tromosti

Bitno je navesti da svaki štap ima svoju elastičnu liniju, a to je os koja prolazi kroz težište štapa. Nakon što se štap optereti određenim opterećenjem, elastična linija se deformira i tada se javljaju progib i kut zakreta.

Pretpostavke o deformiranju i raspodjeli naprezanja koje moramo uzeti u obzir prilikom analize savijanja štapova su sljedeće:

- Poprečni presjeci nakon deformiranja ostaju ravni i okomiti na elastičnu liniju
- Sve komponente naprezanja osim  $\sigma_x$  jednake su nuli

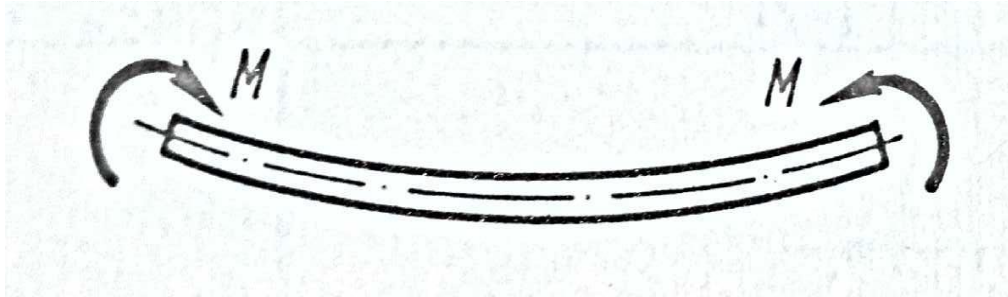
Da bi mogli izvesti analizu pomoću pretpostavki, postoje i neka ograničenja:

- Visina štapa malena je u usporedbi s rasponom
- Maksimalni nagib tangente na elastičnu liniju je malen
- Razmatraju se naprezanja u presjecima koji su dovoljno udaljeni od krajeva štapa, oslonaca i mjesta gdje djeluje koncentrirano opterećenje

Diferencijalna jednadžba koja opisuje savijanje štapova ima sljedeći izraz:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{M_y}{EI_y} \quad (23)$$

Iz diferencijalne jednačbe vidimo kako zakrivljenost elastične linije ovisi o momentu savijanja  $M_y$  i savojnoj krutosti nosača  $EI_y$ . Ako integriramo jednačbu 13 dobiti će se izrazi za progib i nagib u bilo kojoj točki štapa.



Slika 13. Predodžba čistog savijanja. Izvor [2].

Bitna stvar kod proračuna čvrstoće štapa je naprezanje. U općim slučajevima savijanja pojavljuju se normalna i posmična naprezanja. Za uobičajene raspone i oblike poprečnog presjeka normalna naprezanja su mnogo veća u odnosu na posmična naprezanja, pa se proračun čvrstoće izvodi prema najvećem normalnom naprezanju. Da bi se uvjet čvrstoće zadovoljio, maksimalno normalno naprezanje mora biti manje ili jednako od dopuštenog naprezanja.

## 4.2 Izvijanje

Izvijanje, u ovom slučaju štapa, je gubitak stabilnosti pod utjecajem velike tlačne sile. Rešetkaste konstrukcije sastavljene od velikog broja štapova potrebno je tako proračunati da se pozornost pridaje najopterećenijim tlačno opterećenim štapovima. Zbog izvijanja cijela konstrukcija gubi stabilnost. Diferencijalna jednačba koja opisuje elastičnu liniju prilikom izvijanja ima sljedeći oblik, slika 14:

$$\begin{aligned} \frac{d^2w}{dx^2} + \alpha^2 w &= 0, \\ \alpha &= \sqrt{\frac{F}{EI_{min}}}, \\ w &= C_1 \cos(\alpha x) + C_2 \sin(\alpha x), \\ F = F_{kr} &= \pi^2 \frac{EI_{min}}{l_0^2}, \end{aligned} \quad (24)$$

gdje je:

- $I_{min}$  – moment tromosti
- $F_{kr}$  – Eulerova kritična sila izvijanja
- $l_0$  – slobodna duljina izvijanja

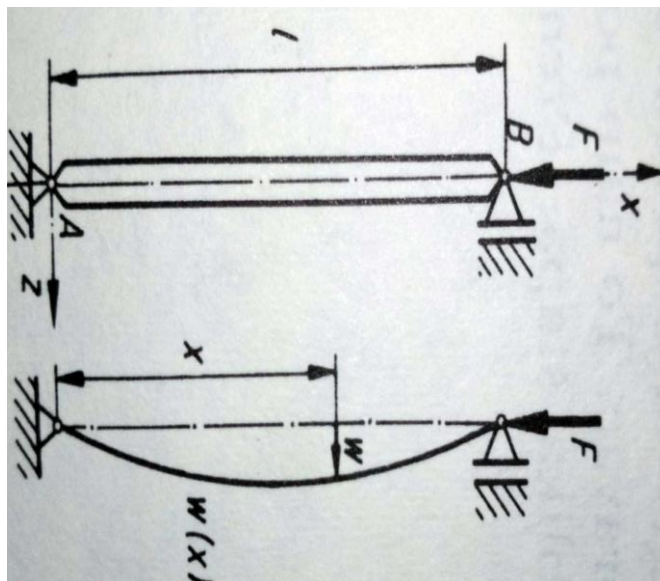
Kako bi se moglo izračunati kritično naprezanje štapa potrebno je uvesti pojam vitkost štapa. Vitkost štapa je omjer duljine izvijanja i minimalnog polumjera tromosti, a zadana je izrazom:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{l_0}{i_{min}}, \\ i_{min} &= \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Kada smo uveli i vitkost štapa, može se izračunati kritično naprezanje prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_{kr} = \pi^2 \frac{E^2}{\lambda^2} \quad (26)$$

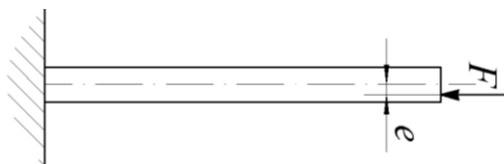
Kritičnu silu  $F_{kr}$ , koja nam je bitna u ovom poglavlju, uveo je L. Euler 1757. godine. To je sila koja djeluje na štap, a nakon prestanka djelovanja kritične sile štap se ne vraća u početni položaj. Tada se javlja bočno izvijanje a uzdužna os štapa prelazi u elastičnu liniju. Na Slici 14 prikazano je prijelaz osi štapa u elastičnu liniju. Na visini  $x$  javlja se moment savijanja  $M_y$ .



Slika 14. Predodžba djelovanja kritične sile. Izvor [2]

Na slici je prikazano kada je  $n=1$ , odnosno izvijanje nastaje odmah nakon djelovanja sile  $F$ . Ukoliko je  $n>1$ , štap će se izvijati u obliku "vala". U tom slučaju štap je potrebno osloniti na drugi način i s drugom vrstom oslonca.

Nadalje, bitna stvar kod izvijanja je i pojam ekscentrične sile. To je sila koja djeluje na štap, ali zamaknuta za neku udaljenost  $e$  od središnje linije.



Slika 15. Predodžba Ekscentrične sile. Izvorno autor.

Izraz koji opisuje ekscentričnu silu ima sljedeći oblik:

$$\frac{F}{A} = \frac{\sigma_{max}}{1 + \frac{ec}{r^2} \sec\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{FL'}{EA}}\right)}, \quad (27)$$

gdje je:

$F$  – sila koja djeluje na štap

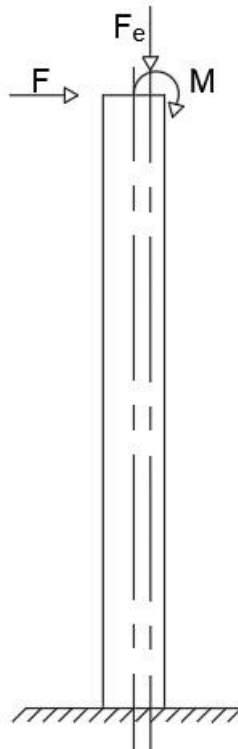
$L'$  – duljina štapa

$e$  – udaljenost od elastične linije štapa

$r$  – minimalni radijus okretanja

Jednadžbu 27 potrebno je riješavati iterativnim postupkom (pokušaji i pogreške) kako bi dobili rješenje za silu  $F$ .

Nadalje, vrlo čest slučaj je višestruko djelovanje sila i momenata na štap. Primjer toga je djelovanje ekscentrične sile, bočne sile i sprega na vrh štapa. Vertikalnu silu dobivamo tako da na vrh štapa djeluje težina gornjeg dijela spremnika, k tome moguće je i opterećenje snijegom. Time je štap opterećen na izvijanje. Do djelovanja bočne sile doći će primjerice prilikom djelovanja vjetra. Tu se javlja i moment koji savija štap. Kada sva tri djelovanja uzmemo u obzir, ovisno o namjeni štapa, može doći do pucanja samoga štapa. Primjerice, pri naletu vjetra bočna sila dolazi više do izražaja. Što je bočna sila veća, to je veći progib. Sukladno tome rasti će i moment savijanja.



Slika 16. Predodžba djelovanja ekscentrične sile. Izvorno autor.

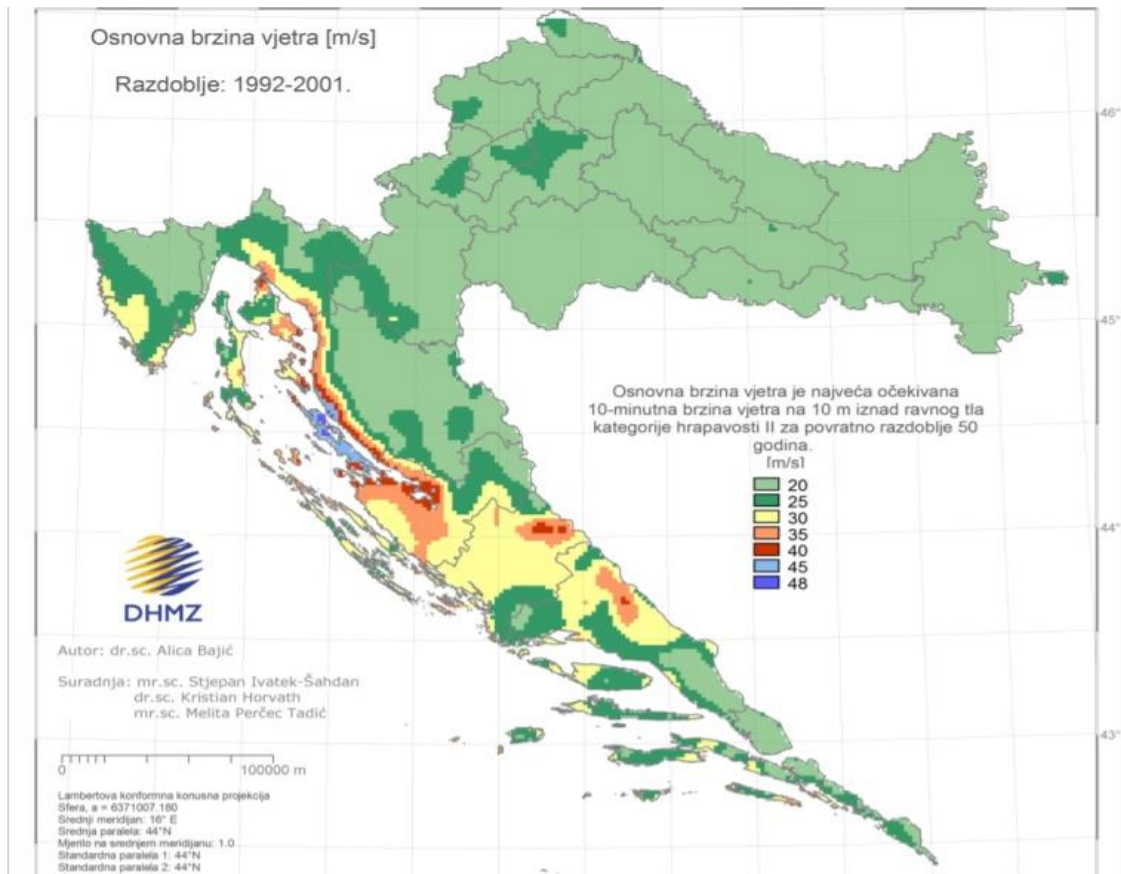
## 5. Europski standard "EUROCODE"

Europski odbor za standardizaciju, ovlašten od strane Europske unije, objavio je skup standarda, poznatiji kao Eurocodovi, sa zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcija unutar Europske unije. Eurocode standardi su standardi kojima se služimo prilikom konstruiranja različitih komponenti u strojarstvu. U ovome slučaju koristit ćemo Eurocode standarde koji nam opisuju što je sve potrebno uzeti u obzir prilikom konstruiranja. U radu ćemo koristiti sljedeće standarde:

- EN 1991-4:2004 – "Actions on structures – General actions – Part 1-4: Wind action"
- EN 1993-4-2 – "Design of steel structures – Part 4 – 2: Tanks"
- EN 1993-1-6 – "Design of steel structures – Part 1 - 6 : General – Strength and Stability of Shell Structures"
- EN 1998 – 4 (2006) – "Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines"

### 5.1 Djelovanje vjetra

Djelovanje vjetra mijenja se s vremenom. Djeluje izravno na vanjsku površinu spremnika i neizravno na unutarnje površine. Ukoliko spremnik ima otvore, vjetar djeluje izravno i na unutarnje površine. Djelovanje vjetra uvelike ovisi i o području gdje se neki konstrukcijski objekt nalazi. Slika 17 prikazuje nam specifičnu brzinu vjetra za Hrvatsku, koja nam je bitna za proračun i sigurnost spremnika prema Eurocodu.



Slika 17. Predodžba osnovne brzine vjetra za Hrvatsku. Izvor [12].

Izraz koji nam određuje koliki je pritisak vjetra na spremnik ima sljedeći oblik:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad (28)$$

gdje je:

$\rho$  – gustoća zraka

$V_b$  – osnovna brzina vjetra

Osnovna brzina vjetra računa se prema sljedećem izrazu:

$$V_b = C_{dir} C_{season} V_{b,0} \quad (29)$$

gdje je:

$C_{dir}$  – faktor smjera vjetra (obično se uzima 1)

$C_{season}$  – faktor godišnje doba (obično se uzima 1)

$V_{b,0}$  – vrijednost brzine vjetra očitana iz karte

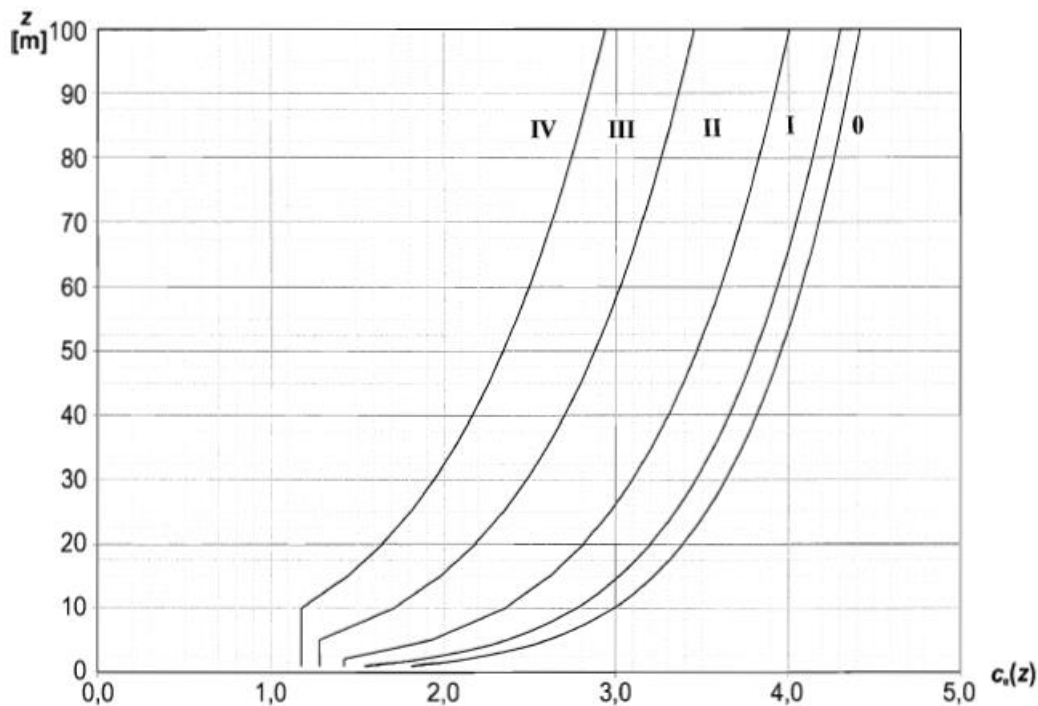
Pritisak brzine vjetra pri udaru  $q_p(z)$  računa se na sljedeći način:

$$q_p(z) = c_e(z)q_b \quad (30)$$

gdje je:

$c_e(z)$  – faktor izloženosti, ovisi o visini i kategoriji terena

Faktor izloženosti može se očitati iz sljedeće slike



Slika 18. Predodžba dijagrama faktora izloženosti. Izvor [6].

### 5.1.1 Opterećenje vjetrom na plašt spremnika

Koeficijenti koji utječu na plašt spremnika ovise o Reynolds-ovom broju. Reynolds-ov broj definiran je sljedećim izrazom [6]:

$$Re = \frac{bv(z_e)}{v} = \frac{b\sqrt{\frac{2q_p(z_e)}{\rho}}}{v}, \quad (31)$$

gdje je:

$b$  – promjer cilindra

$q_p(z_e)$  – pritisak brzine vjetra pri udaru



$v(z_e)$  – vršna brzina vjetra na visini  $z_e$

$u$  – kinematička viskoznost zraka ( $u=15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )

$\rho$  – gustoća zraka

Koeficijent vanjskog pritiska na kružne cilindre računa se prema izrazu:

$$c_{pe} = c_{p,0} \times \psi_{\lambda\alpha} \quad (32)$$

gdje je:

$c_{p,0}$  – koeficijent vanjskog pritiska bez strujanja u zoni slobodnog kraja cilindra

$\psi_{\lambda\alpha}$  – faktor djelovanja strujanja u rubnoj zoni cilindra

### 5.1.2 Ukupna sila vjetra na plašt spremnika

Sila djelovanja na plašt spremnika računa se prema EN 1991-1-4. Sila se računa prema sljedećem izrazu:

$$F_w = c_s c_d \sum_{\text{ljuske}} c_f q_p(z_e) A_{ref}, \quad (33)$$

gdje je:

$F_w$  – ukupna sila

$c_s c_d$  – konstrukcijski faktor

$c_f$  – koeficijent sile

$q_p(z_e)$  – pritisak vjetra na visini  $z_e$

$A_{ref}$  – referentna površina

Koeficijent sile za kružne cilindre određuje se prema sljedećem izrazu:

$$c_f = c_{f,0} \times \psi_{\lambda} \quad (34)$$

Gdje je:

$c_{f,0}$  – koeficijent sile kružnog cilindra, ovisi o Reynolds-ovom broju i ekvivalentnoj hrapavosti  $k/b$

$\psi_{\lambda}$  – faktor umanjenja na osnovi vitkosti

Ekvivalentna hrapavost je omjer koeficijenta hrapavosti površine i promjera cilindra. Hrapavost površine je određena s obzirom na materijal koji se koristi za spremnik, a promjer je zadan zadatkom.

## 5.2 Djelovanje potresa

Konstrukcije koje će se nalaziti na potresno aktivnom području moraju biti tako proračunate da ne izgube svoja svojstva nakon što se završi potresno djelovanje. Također konstrukcije moraju biti sigurno proračunate i izrađene kako nebi došlo do štetnih utjecaja za prirodu i čovjeka.

Kako bi se zadovoljio zahtjev "cijelovitosti" spremnika prilikom potresnih djelovanja imamo neka ograničenja:

- Mora se provjeriti nepropusnost spremnika,
- Mora se spriječiti proljevanje tekućine ako do toga dođe,
- Mora se osigurati oprema na takav način da ne dođe do njezinog oštećenja prilikom pomaka

Prema EUROCODE standardu, djelovanje potresa analizira se na pojednostavljen način. Spremnik se prikazuje kao model sa jednim stupnjem slobodne. Jedan stupanj odgovara impulsnoj komponenti, a jedan konektivnoj komponenti. Impulsni i konvektivni odzivi se kombiniraju i uzima se njihova suma. Izrazi koji nam opisuju te dvije komponente su sljedeći:

- Impulsna komponenta

$$T_{imp} = C_i \frac{\sqrt{\rho}H}{\sqrt{\frac{s}{R}}\sqrt{E}}, \quad (35)$$

- Konvektivna komponenta

$$T_{con} = C_c\sqrt{R}. \quad (36)$$

Gdje je:

H – visina do slobodne površine tekućine

R – radijus spremnika

s – srednja debljina svih ljusaka spremnika

C<sub>i</sub>, C<sub>c</sub> – prirodni koeficijenti koji se uzimaju iz tablice

Tablica se nalazi u EUROCODE standardu [8], oznaka A.2.

Ukupna base shear sila, tj ukupna poprečna sila računa se prema sljedećem izrazu:

$$Q = (m_i + m_r + m_w)S_e(T_{imp}) + m_c S_e(T_{con}), \quad (37)$$

gdje je:

$m_i$  – masa vode koja se giba impulsno

$m_r$  – masa krova

$m_w$  – masa stijenke spremnika

$S_e(T_{imp})$  - impulsno spektralno ubrzanje

$S_e(T_{con})$  - konvektivno spektralno ubrzanje

Vrlo važan izraz koji se mora uzeti u obzir je moment prevrtanja. Postoje momenti prevrtanja iznad i ispod osnovne ploče. Izrazi koji nam opisuju momente prevrtanja su sljedeći:

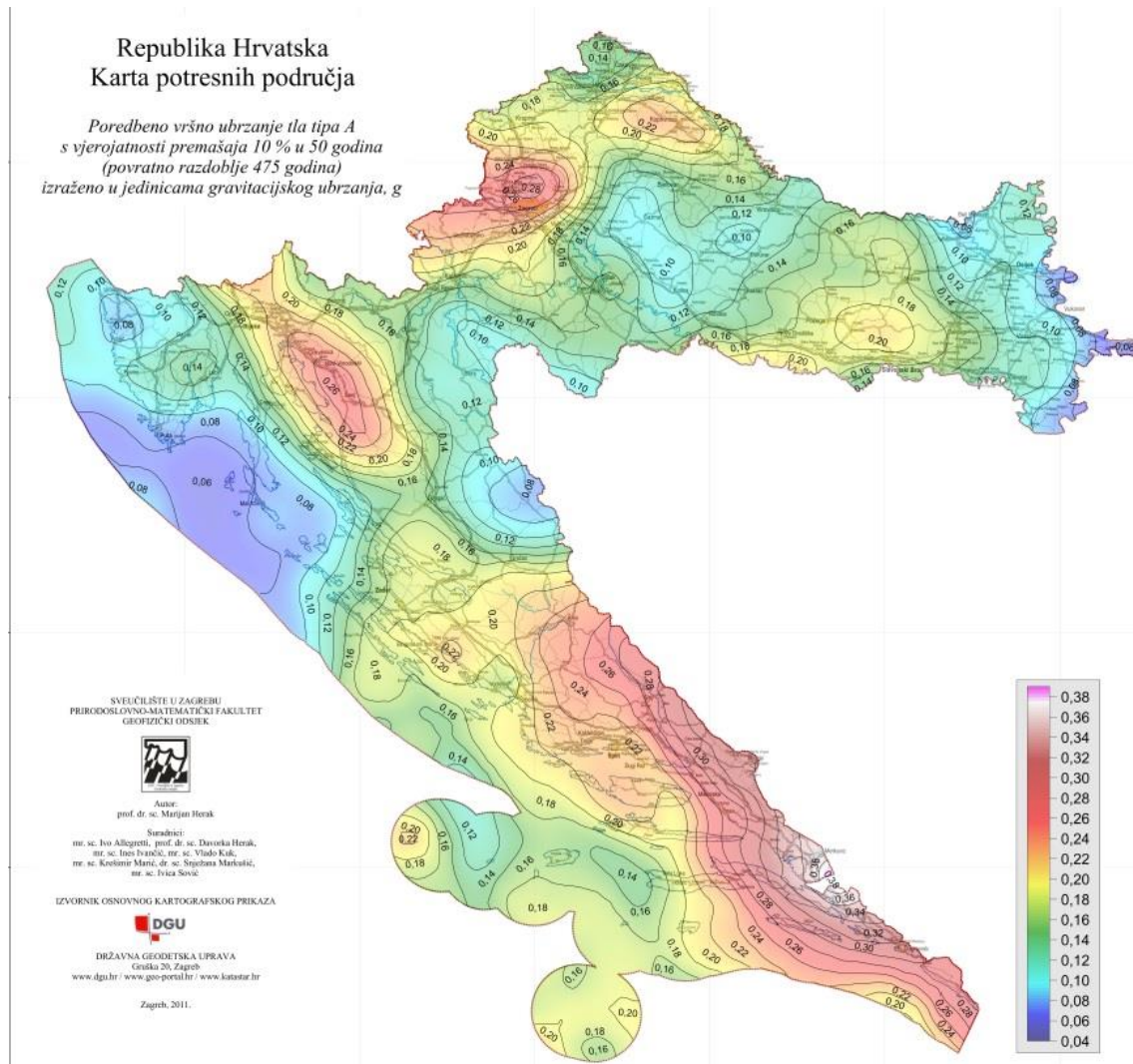
Iznad osnovne ploče:

$$M = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) S_e(T_{imp}) + m_c h_c S_c(T_{con}) \quad (38)$$

Ispod osnovne ploče:

$$M' = (m_i h_i' + m_w h_w + m_r h_r) S_e(T_{imp}) + m_c h_c' S_c(T_{con}) \quad (9)$$

Vrlo bitna stavka kod proračuna djelovanja potresa ima i područje gdje se taj spremnik nalazi. Zato nam je potrebna karta potresnih područja, u ovom slučaju Hrvatske. Karta nam služi kako bi se mogli očitati određeni parametri koji su nam potrebni za daljni proračun. U ovom radu se ogračava od svih vibracijskih opterećeja.



Slika 19. Predodžba potresnih područja RH. Izvor [11].

## 6. Numerički proračun

Numerički proračun koji je izrađen u završnom radu, izrađen je u Excelu. Svi dijagrami koji su priloženi, također su napravjeni u Excelu. Excel, paket MS Office-a, koristili smo kako bi se pokazalo da se i zahtjevni proračuni mogu izraditi u takvom programu. U ovom poglavlju su prikazani dijagrami koji nam pokazuju djelovnije sila i momenata na spremnik. Dijagrami nisu prikazivani pojedinačno za svaku ljusku, već su sve tri ljuske spojene u jedna dijagram kako bi se lakše uočili pomaci pojedine ljuske.

Početni parametri koji se koriste u proračunu su sljedeći:

- Materijal spremnika – S355
- Gustoća fluida –  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$
- Modul elastičnosti –  $E=2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
- Sigurnost –  $s=2$
- Visina spremnika –  $L=8\text{m}$
- Promjer spremnika
  - o  $R_1 = 2\text{m}$
  - o  $R_2 = 2,5\text{m}$
- Debljine ljusaka
  - o  $h_1 = 0,012\text{mm}$
  - o  $h_2 = 0,011\text{mm}$
  - o  $h_3 = 0,01\text{mm}$

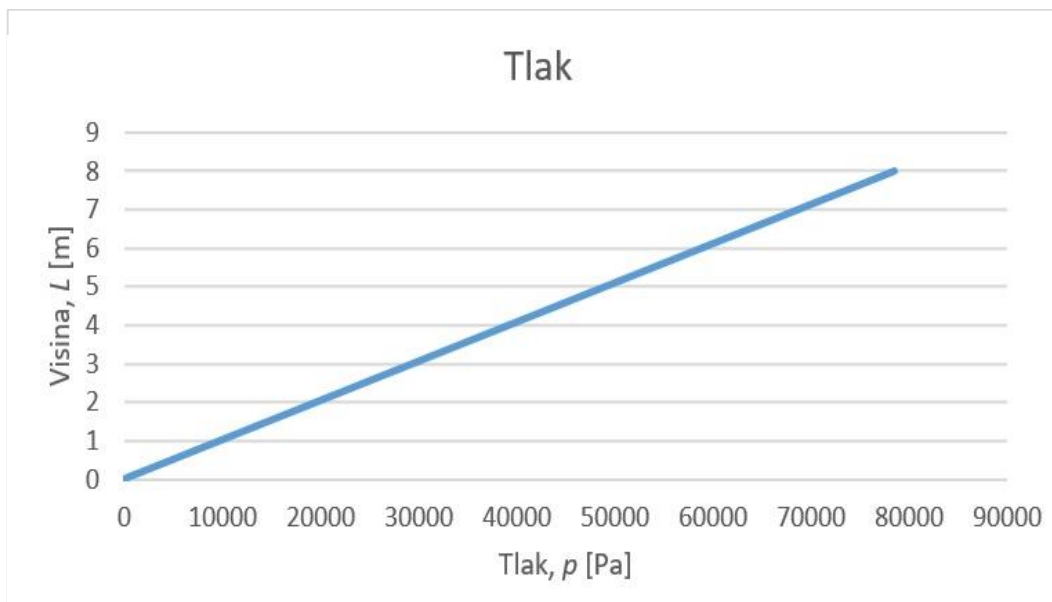
Jednadžbe koje su korištene u proračunima navedene su u radu, a to su sljedeće jednadžbe pobrojan redom: 3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 19, 21, 22.

## 6.1 Dijagram hidrostatskog tlaka

Prvi dijagram i jednačba koja opisuje dijagram je jednačba za hidrostatski tlak. Tlak uveliko ima utjecaj na ploču na dnu spremnika. To se može i očitati iz dijagrama; što je ploča na većoj visini od vrha tekućine to je sila na tu ploču veća. Izraz za izračunavanje hidrostatskog tlaka ima oblik

$$p = \rho g H \quad (10)$$

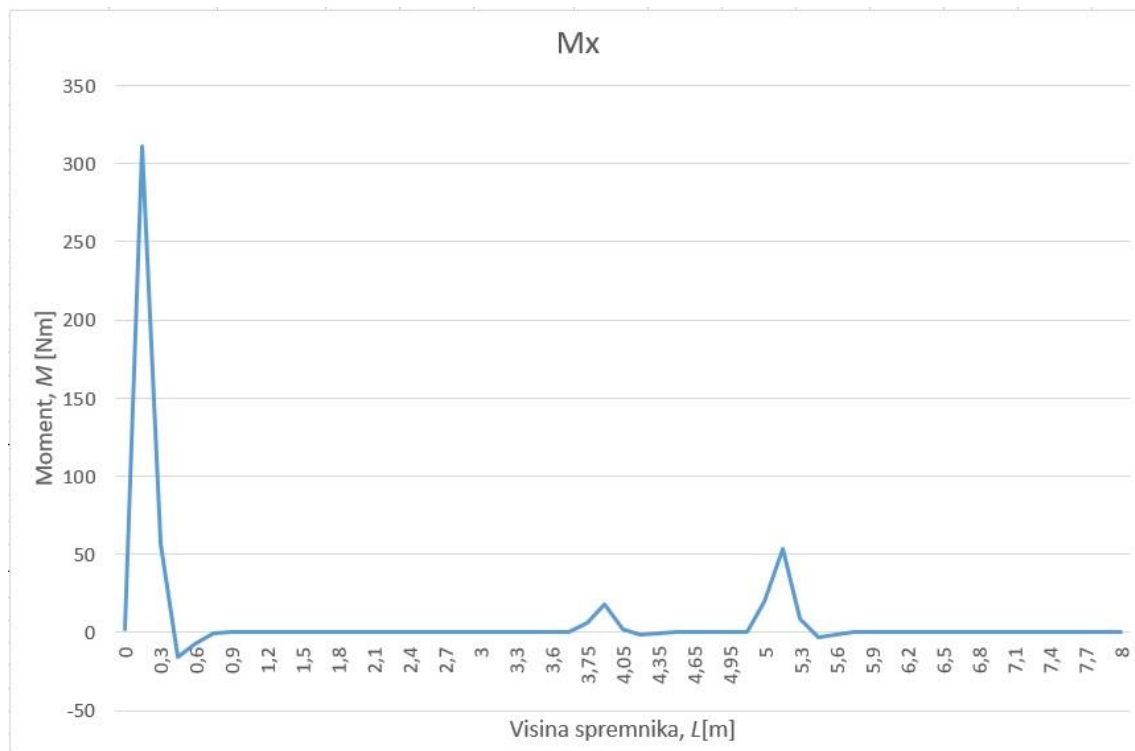
Na Slici 20 je prikazan dijagram tlaka. Iz dijagrama se vidi kako tlak linearno raste s porastom visine.



Slika 20. Preodžba dijagrama tlaka. Izvorno autor.

## 6.2 Dijagram momenta

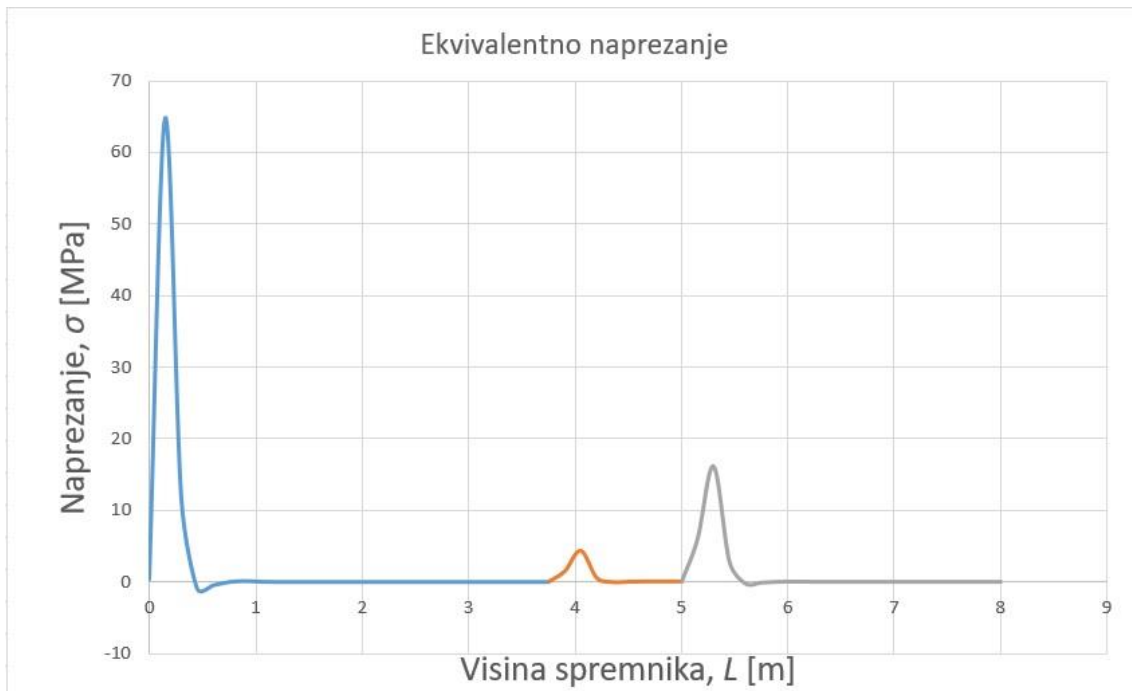
Moment savijanja, kako prikazuje i dijagram, najveći utjecaj ima na spoju između dvije ljuske. Dakako najveći moment savijanja imamo na dnu spremnika, tj. na spoju ploče i donje cilindrične ljuske. Taj dio dijagrama mogli bi riješiti s poboljšanjem spremnika. Na način da umjesto kružne ploče stavimo torisferično dno i time smanjimo moment savijanja.



Slika 21. Predodžba dijagrama momenta. Izvorno autor.

### 6.3 Dijagram raspodjele naprezanja

Prikazano je maksimum od ekvivalentnog naprezanja za bilo koji položaj, za bilo koju debljinu stijenke. Ekvivalentno naprezanje se dobije na način da se izračuna naprezanje u osi  $x$  i u osi  $\varphi$ . Nakon izračuna naprezanje, uzima se maksimalno naprezanje za određenu točku. Maksimalno naprezanje između narezanja u osi  $x$  i osi  $\varphi$ .

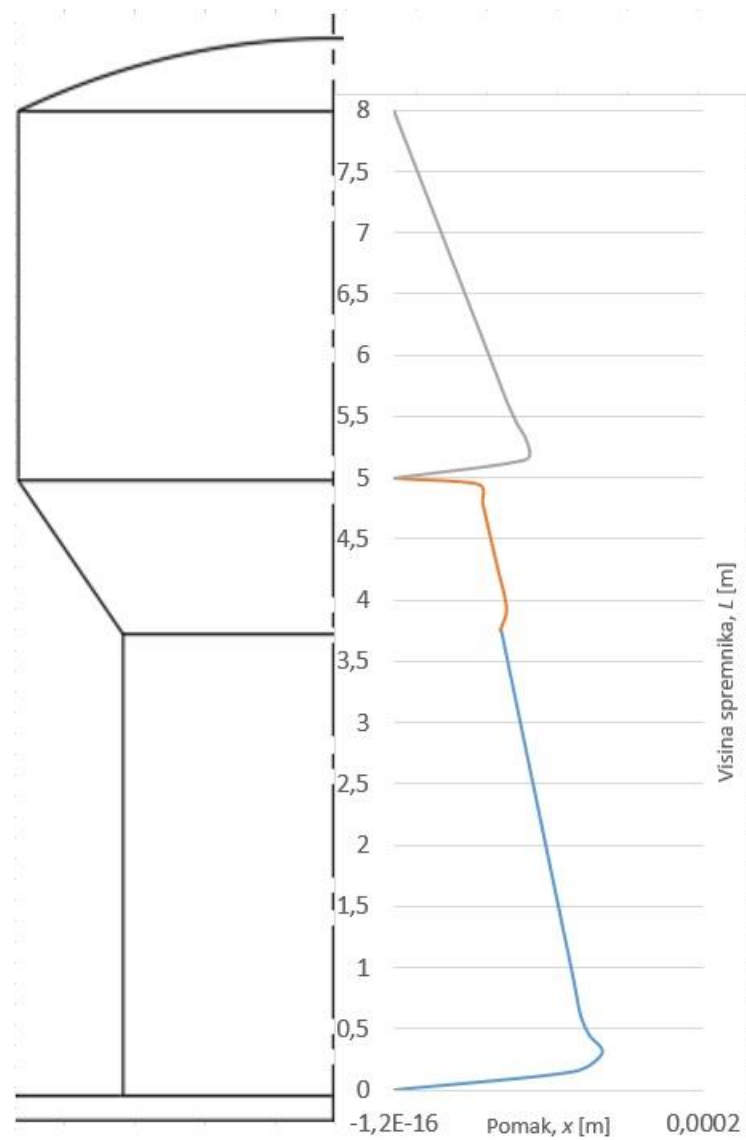


Slika 22. Predodžba ekvivalentnog naprezanje. Izvorno autor.



#### 6.4 Dijagram raspodjele pomaka

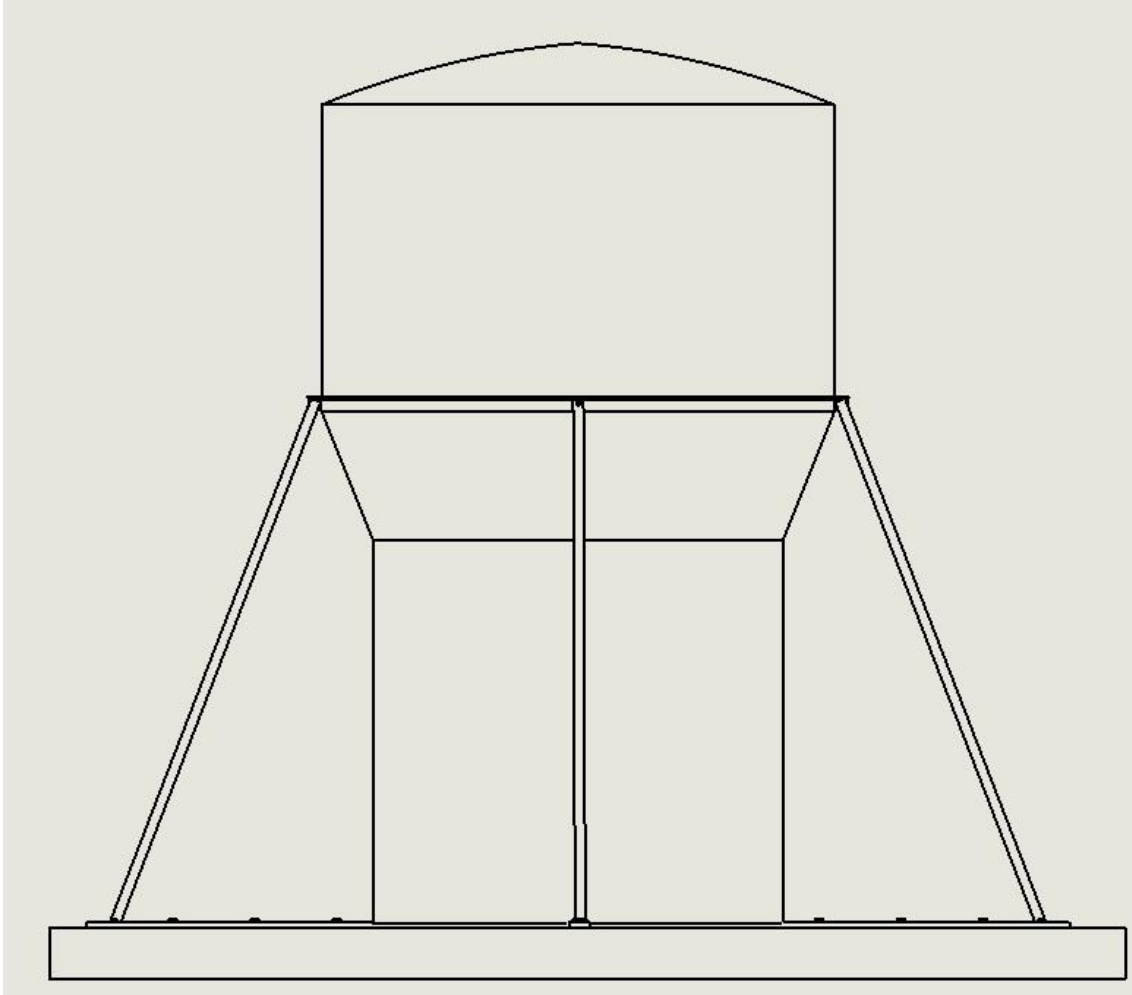
Na slici 23 prikazan je dijagram ukupnog pomaka spremnika. 3 različite boje prikazuju nam tri ljuske. Bitno je dobiti, kako je i prije navedeno, u spojnim točkama ljuska jednake pomake. Na visini spremnika od 5 metara, ukupni pomak mora biti 0. Razlog tomu je što je na spoju konusne i gornje cilindrične ljuske kružni prsten koji sprječava radijalne pomake.



Slika 23. Predodžba dijagrama ukupnog pomaka. Izvorno autor.

## 7. Potporna konstrukcija

Potporna konstrukcija za oslanjanje spremnika načinjena je od kružnog prstena i potpornih štapova. Kružni prsten bit će zavareni na spoju gornje cilindrične ljuske i konusne ljuske. Na slici 24 se nalazi prikaz spremnika zajedno s potpornom konstrukcijom.



Slika 24. Predodžba potporne konstrukcije. Izvorno autor.

Svrha i način spajanja potporne konstrukcije na spremnik je sljedeća:

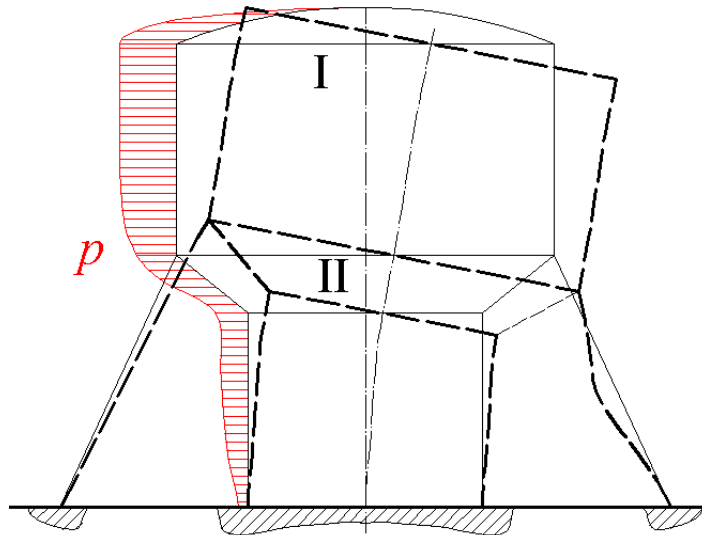
- Na betonsko postolje, na kojemu se nalazi spremnik, pričvrstili bi ploče koje bi se nalazile tik uz stijenku spremnika. Time bi dobili određenu stabilnost i smanjili bi pomicanja spremnika
- na spoju konusne i gornje cilindrične ljuske koristili bi određeni profil koji bi se morao savijati i njegovi krajevi bi se zavarili. Time bi dobili kružni prsten koji nebi zavarivali za spremnik već bi se on zavario na potporne štapove

- nakon što bi se završila prva i druga faza, potrebno bi bilo spojiti kružni prsten zajedno s pločama koje su učvršćene na dnu. To ćemo dobiti tako da krajeve spojimo štapovima određenih dimenzija, ovisno o proračunu.

Takvim načinom spajanja, spriječili bi kompletno pomicanje spremnika prilikom vanjskih djelovanja sila.

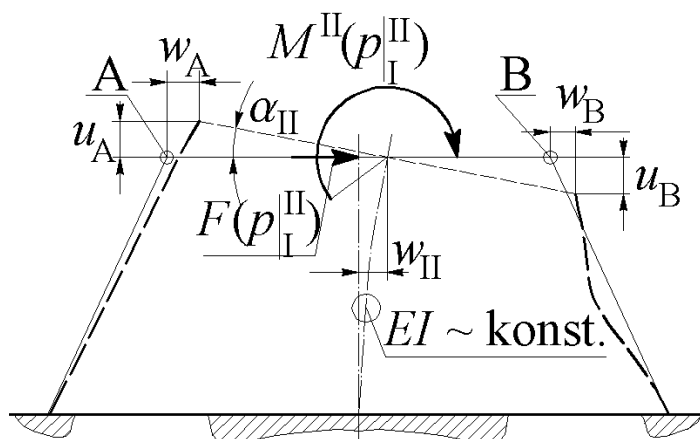
## 7.1 Proračun štapova

Prilikom djelovanja vjetra ili fluida unutar spremnika, štapovi su opterećeni. Slika prikazuje način kako su štapovi opterećeni prilikom djelovanja vjetra. Ovaj slučaj je nepovoljni slučaj za spremnik.

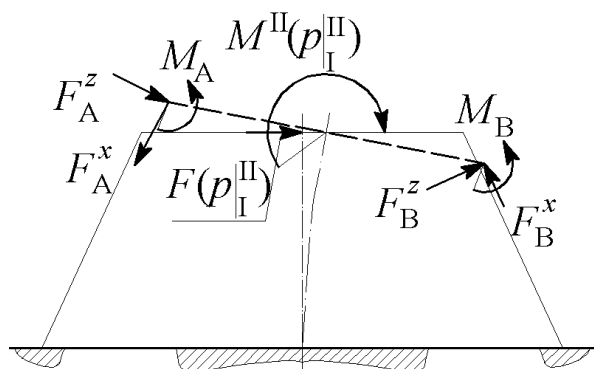


Slika 25. Predodžba spremnika pod utjecajem opterećenja. Izvorno autor.

Kako bi štapovi bili što bolja potporna konstrukcija, potrebno ih je dobro proračunati. Prvo nam je potreban proračunski model po kojem će se napisati izrazi za proračun potporne konstrukcije. Slika 25 nam prikazuje proračunski model deformiranja spremnika i potporne konstrukcije.

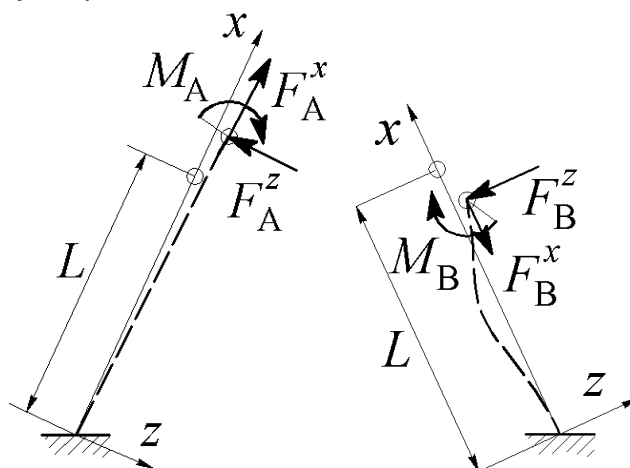


Slika 26. predodžba proračunskog modela deformiranja spremnika i štapova. Izvorno autor.



Slika 27. Predodžba raspodjele naprezanja. Izvorno autor.

Slika (iznad) nam prikazuje raspodjelu opterećenja usred međusobnog djelovanja potporne konstrukcije i spremnika.



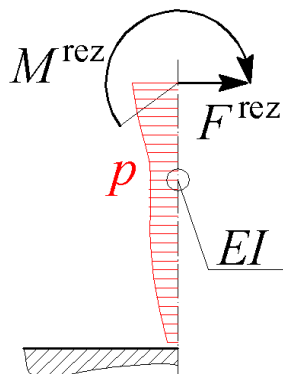
Slika 28. Predodžba rasporeda opterećenja štapa a) i b). Izvorno autor.

Slike prikazuju raspored opterećenja štapa. Prvi štap (a) je opterećen na rastezanje dok je drugi štap na savijanje (b). Spregnutost spremnika kapljevine i

potpornih štapova opisana je jednadžbom koja opisuje pomake točaka u kojima su povezani spremnik i štapovi, prikazano na slici 25.

$$\Delta l_I \approx \sqrt{w_A^2 + u_A^2}; \Delta l_{II} \approx \sqrt{w_B^2 + u_B^2} \quad (41)$$

$$w_A \approx w_{II}; w_B \approx w_{II}; u_A \approx \alpha_{II} r_A; u_B \approx \alpha_{II} r_B$$



Slika 29. Predodžba proračunskog modela deformiranja spremnika. Izvorno autor.

Na slici 28.  $F^{\text{rez}}$  označava zbroj sila koje djeluju poprečno na mjestu označenom „II“, a  $M^{\text{rez}}$  označava zbroj momenata oko osi okomite na ravninu slike u točki „II“. Izračun deformiranja spremnika je pretpostavljen kao deformiranje grede prema Euler – Bernoullijevoj teoriji. Kut nagiba tangente na elastičnu liniju i progib u točki II izračunati su metodom analogne grede.

Deformiranje potpornog štapa opterećenog sabijanjem određeno je numeričkim postupkom koji se naziva kolokacijska metoda pretpostavljenog rješenja. Pretpostavljeno je rješenje za progib duž štapa u obliku polinoma. Rubni uvjeti pomaka u uklještenju  $w(0)=0, \alpha(0)=0$  su zadovoljeni izravno, a za ostale jednadžbe, do broja jednadžbi jednakog broju parametara u pretpostavljenom rješenju su odabrane jednadžbe ravnoteže momenta savijanja u skupu točaka duž štapa. Štapovi su proračunati numeričkom metodom pretpostavljenog rješenja, postavljanjem uvjeta točnog zadovoljavanja jednadžbi ravnoteže u odabranim točkama. Prema dobivenom proračunu, standardni profil koji zadovoljava sve uvjete je cilindrični profil vanjskog promjera 101,6mm, debljine stijenke 6mm.

## 7.2 Zavareni spojevi

Zavarivanje je spajanje ili prevlačenje osnovnog materijala primjenom topline ili pritiska ili uz oboje, uz ili bez dodatnog materijala. Zona spoja za vrijeme zavarivanja se dovodi u tekuće ili plastično stanje. Svojstva zavarenog spoja

ovise o vrsti osnovnog i dodatnog materijala te o postupku zavarivanja. Zavareni spoj je nerastavljivi spoj. Zavarivanje je postalo jedna od najvažnijih metoda spajanja materijala. Kako se strojarstvo razvijalo, tako se pojavljivalo sve više metoda zavarivanja. Neki od načina zavarivanja su sljedeći:

- Elektrolučno zavarivanje
- Elektrootporno zavarivanje
- Plinsko zavarivanje
- Zavarivanje pritiskom
- Zavarivanje snopom

Prilikom zavarivanja konstrukcija, bitno se je voditi određenim pravilima kako bi zavar bio siguran i ispravan. Pravila koja su bitna prilikom zavarivanja su sljedeća:

- Izbjegavanje zarezno djelovanja
- Izbjegavanje skretanja toka sile u zoni zavarivanja
- Izbjegavanje vlačnog naprezanja u korijenu zavara
- Izbjegavanje gomilanja zavara
- Dat prednost poluproizvodima
- Izbjegavati skupe pripremne radove
- Paziti na pristupačnost šavova

Sljedeći izrazi su nam bitni za osnovno proračunavanje zavara kako bi zavar izdržao sva naprezanja kojima će biti opterećen. Zavar je potrebno proračunati na čvrstoću, tako da se sami zavareni šavovi uzimaju kao posebni dijelovi. Ako sila  $F$  djeluje okomito na površinu zavara, računa se s normalnim naprezanjem:

$$\sigma_{v,t} = \frac{F}{\Sigma(al)}, \quad (42)$$

gdje je:

$F$  – sila koja djeluje okomito na zavar

$\sigma_{v,t}$  – normalno naprezanje u zavaru (indeks  $v$  – vlačno,  $t$  – tlačno)

$\Sigma(al)$  – računski površina zavara

Ako sila  $F$  djeluje u samoj površini zavarena šava, računa se smično naprezanje prema sljedećem izrazu:

$$\tau = \frac{F}{\Sigma(al)} \quad (43)$$

Ukoliko je zavareni spoj opterećen samo jednim momentom savijanja, normalno naprezanje računa se prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_f = \frac{M}{I_{zav}} y, \quad (44)$$

gdje je:

M – moment savijanja

$I_{zav}$  – moment inercije površine zavarenih šavova

y – razmak korijena kutnog zavora od težišnice zavarenog priključka

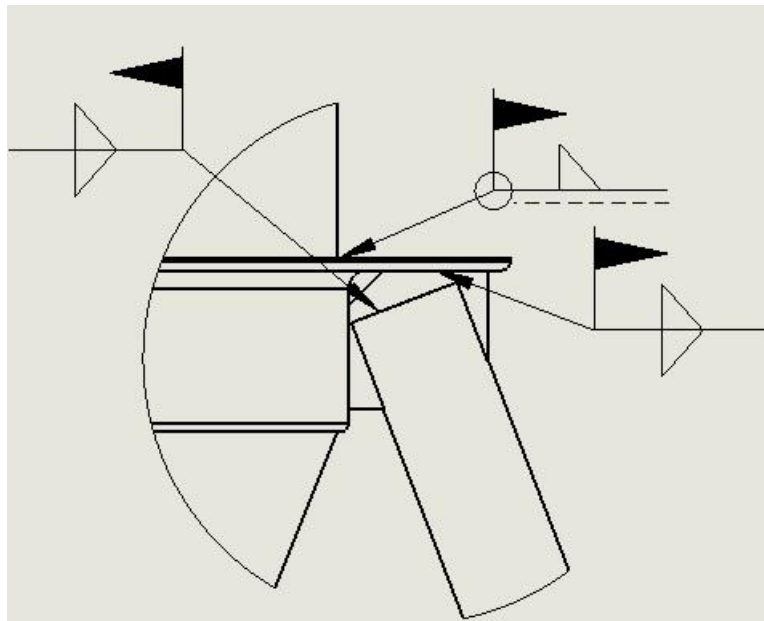
Ukoliko su štapovi opterećeni samo uzdužnom silom F, nema momenta savijanja, onda se naprezanje u zavaru računa kao normalno naprezanje u konstruktivnom dijelu:

$$\sigma_{v,t} = \frac{F}{A}, \quad (45)$$

gdje je:

A – ukupna površina presjeka konstrukcijskog dijela

Slika 30 prikazuje način zavarivanja potpornih štapova s kružnim prstenom koji je zavaren na spremnik.



Slika 30. Predodžba detalja zavarenog spoja. Izvorno autor.



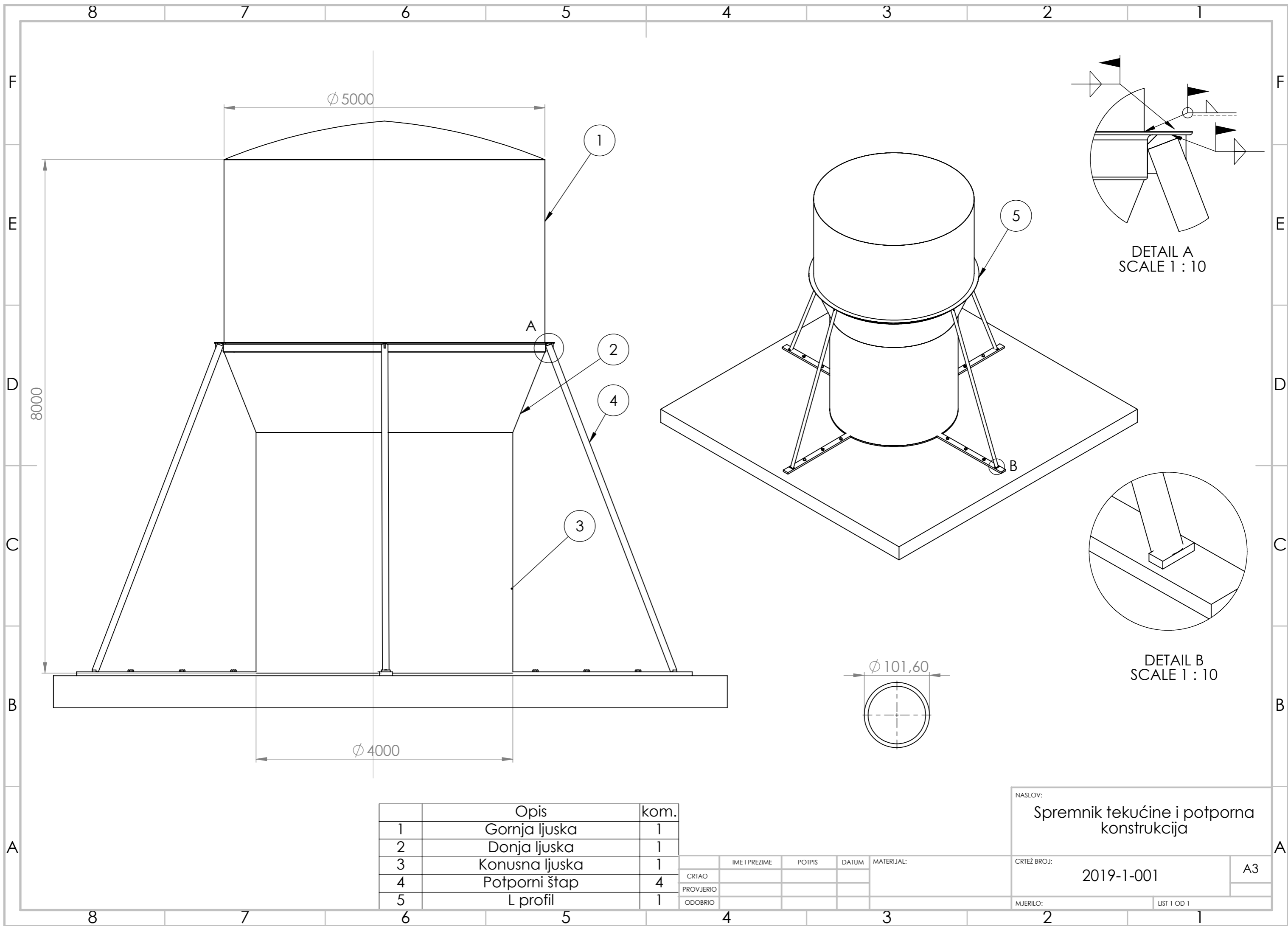


## 8. Zaključak

Cilj završnog rada je bilo analizirati spremnik tekućine s potpornom konstrukcijom za različita opterećenja. Glavna zadaća analize je prikazati dijagrame pomaka, momenata i naprezanja. S obzirom na veličinu i ostale parametre koji utječu na pomake, zaključiti je da ne dolazi do velikih pomaka koji bi mogli ugroziti sigurnost spremnika. Dakako, moguće je napraviti neka poboljšanja na samnom spremniku i potpornoj konstrukciji kojim bi još više povećali sigurnost. Poboljšanje možemo postići na više načina. Poboljšanje spoja ploče i donje cilindrične ljuske možemo postići tako da ploču zamijenimo torisferičnim dnom. Time bi dobili smanjenje najvećeg momenta savijanja. Jedno od poboljšanja je i potporne štapove napraviti tako da u sredini štapa postupno povećamo promjer, gledano od krajeva štapova prema sredini. Svi ukupni pomaci, pomaka i naprezanja, dobiveni su zbrajanjem membranskih i savojnih komponenti.

## 9. Literatura

- [1] I. Alfirević – Linearna analiza konstrukcija
- [2] I. Alfirević – Nauka o čvrstoći 1
- [3] I. Alfirević – Nauka o čvrstoći 2
- [4] Skup autora – Inženjerski priručnik IP1
- [5] K. H. Decker – Elementi strojeva
- [6] EN 1991-4:2004 – "Actions on structures – General actions – Part 1-4: Wind action"
- [7] EN 1993-4-2 – "Design of steel structures – Part 4 – 2: Tanks"
- [8] EN 1993-1-6 – "Design of steel structures – Part 1 - 6 : General – Strength and Stability of Shell Structures"
- [9] EN 1998 – 4 (2006) – "Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines"
- [10] <https://www.pmindustriesindia.com/storage-tanks-vessels.html>
- [11] <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>
- [12] <https://www.scribd.com/document/349343656/Karta-Osnovne-Brzine-Vjetra>



	Opis	kom.
1	Gornja ljuska	1
2	Donja ljuska	1
3	Konusna ljuska	1
4	Potporni štap	4
5	L profil	1

	IME I PREZIME	POTPIS	DATUM	MATERIJAL:
CRTAO				
PROVJERIO				
ODOBRIO				

NASLOV: Spremnik tekućine i potporna konstrukcija	
CRTIŽ BROJ: 2019-1-001	A3
MJERILO:	LIST 1 OD 1