

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Klemenčič, T., 2016. Potresna analiza jeklenih cilindričnih rezervoarjev. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 56 str.

Datum arhiviranja: 14-03-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Klemenčič, T., 2016. Potresna analiza jeklenih cilindričnih rezervoarjev. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 56 pp.

Archiving Date: 14-03-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

SMER GRADBENE
KONSTRUKCIJE

Kandidat:

TONI KLEMENČIČ

POTRESNA ANALIZA JEKLENIH CILINDRIČNIH REZERVOARJEV

Magistrsko delo št.: 17/II.GR

SEISMIC ANALYSIS OF STEEL CYLINDRICAL LIQUID STORAGE TANKS

Master Thesis No.: 17/II.GR

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Ljubljana, 24. 02. 2016

POPRAVKI

| Stran z napako | Vrstica z napako | Namesto | Naj bo |
|----------------|------------------|---------|--------|
| | | | |

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Toni Klemenčič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Potresna analiza jeklenih cilindričnih rezervoarjev«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 5. 1. 2015

Toni Klemenčič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| UDK: | 006.7:624.042.7:624.953(043.2) |
| Avtor: | Toni Klemenčič |
| Mentor: | prof. dr. Boštjan Brank |
| Naslov: | Potresna analiza jeklenih cilindričnih rezervoarjev |
| Tip dokumenta: | Magistrsko delo |
| Obseg in oprema: | 56 str., 26 sl., 9 graf., 3 tab., 56 en., 2 pril. |
| Ključne besede: | Potresna analiza, cilindrični rezervoar, pritiski, numerična analiza |

Izvleček

V magistrski nalogi smo analizirali jeklen cilindrični rezervoar na potresno obtežbo s pomočjo Evrokod-standarda. Uporabili smo postopke, predvidene v standardu za vrednotenje potresnih vplivov na konstrukcijo. Evrokod-standard podrobneje razlaga postopek vrednotenja vplivov na cilindrične rezervoarje v osnutku Evrokod 8, poglavje 4: Silosi, cevi in rezervoarji. Preverili smo ozadje formul, ki so predvidene v standardu. Izpeljali smo Laplaceovo diferencialno enačbo za reševanje hidrodinamičnih pritiskov. V nadaljevanju smo razložili in prikazali robne pogoje diferencialne enačbe za račun posameznih pritiskov.

Predvideni postopek v Evrokodu nas pripelje do pritiskov, ki delujejo na plašč in dno rezervoarja. Te pritiske smo nato uporabili za numerično analizo rezervoarja. Za slednjo smo uporabili programsko opremo Abaqus. Ugotavljali smo, kako se obnaša rezervoar na potresno obtežbo. Na koncu naloge smo prikazali deformacije, nastale zaradi potresne aktivnosti na rezervoarju.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

| | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| UDC: | 006.7:624.042.7:624.953(043.2) |
| Author: | Toni Klemenčič |
| Supervisor: | prof. Boštjan Brank PhD |
| Title: | Seismic analysis of steel cylindrical liquid storage tanks |
| Type of document: | M. Sc. Thesis |
| Notes: | 56 p., 26 fig., 9 graph., 3 tab., 56 eq., 2 ann. |
| Key words: | Seismic analysis, cylindrical tanks, pressures, numerical analysis |

Abstract

In my master thesis we did seismic analysis of a steel cylindrical liquid storage tank according to the Eurocode standards. We used procedures suggested in the standard for evaluating seismic effects on the structure. Eurocode standard explains the procedure for seismic analysis in details in the draft version of the Eurocode 8; Part 4: Silos, tanks and pipelines. We checked the background of the suggested equations in the standard. We derived the Laplace differential equation, which is used for solving hydrodynamic pressures. Further we explain and show the boundary conditions of the Laplace equation for solving specific pressures.

With procedures in the standard we get pressures, which are acting on the wall and the bottom plate of the storage tank. We use the evaluated pressures for numerical analysis of the storage tank. Analysis was carried out in the software Abaqus. We tried to figure out how does the storage tank behaves under seismic activity. At the end we show the deformed shape of the storage tank under seismic load.

ZAHVALA

Za nasvete in pomoč pri magistrskem delu se zahvaljujem mentorju, prof. dr. Boštjanu Branku.

Posebna zahvala gre očetu in materi ter sestrama Janji in Vesni, ki so mi stali ob strani ves čas študija.

KAZALO VSEBINE

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 UVOD | 11 |
| 1.1 Motivacija | 11 |
| 1.2 Pregled naloge | 11 |
| 2 ODZIV REZERVOARJEV MED POTRESNOM | 12 |
| 3 RAZLAGA ENAČB, KI OPISUJEJO OBNAŠANJE REZERVOARJA MED POTRESOM | 15 |
| 3.1 Gibanje tekočine | 15 |
| 3.2 Reševanje Laplaceve diferencialne enačbe | 17 |
| 3.2.1 Nastavek za rešitev | 18 |
| 3.2.2 Impulzivni pritiski pri togem obnašanju rezervoarja | 19 |
| 3.2.3 Konvekcijski pritiski pri togem obnašanju rezervoarja | 22 |
| 3.2.4 Fleksibilni pritiski pri deformabilnem obnašanju rezervoarja | 24 |
| 3.2.5 Pritiski zaradi delovanja vertikalne komponente potresa pri togem in deformabilnem obnašanju rezervoarja | 25 |
| 4 DOLOČITEV PRITISKOV PO EC 8 | 27 |
| 4.1 Potresna obtežba | 27 |
| 4.2 Pritiski po EC8 | 29 |
| 4.2 Horizontalno vzbujanje rezervoarja | 30 |
| Impulzivni pritiski | 30 |
| Konvekcijski pritiski | 31 |
| Fleksibilni pritiski | 31 |
| Kombinacija pritiskov horizontalne komponente | 33 |
| 4.3 Vertikalno vzbujanje rezervoarja | 34 |
| 4.4 Kombinacija pritiskov zaradi vertikalne in horizontalne komponente potresa | 35 |
| 5 PRIMER ANALIZE REZERVOARJA NA POTRESNO OBTEŽBO | 38 |
| 5.1 Opis rezervoarja | 39 |
| 5.2 Materialni model | 40 |

| | |
|--------------------------|----|
| 5.3 Obtežba | 42 |
| 5.4 Podpore | 44 |
| 5.5 Analiza | 47 |
| 6 REZULTATI | 49 |
| 7 ZAKLJUČEK | 54 |
| VIRI | 55 |

KAZALO SLIK

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Pretežno elastičen uklon stene rezervoarja pri vrhu | 13 |
| Slika 2: "Diamantna" oblika uklona stene rezervoarja. | 13 |
| Slika 3: "Slonova noga" pri dnu rezervoarja. | 14 |
| Slika 4: Poškodba priključka na rezervoar zaradi pojava "slonove noge". | 14 |
| Slika 5: Delec tekočine..... | 15 |
| Slika 6: Oblika pritiskov na steno rezervoarja..... | 20 |
| Slika 7: Shematičen prikaz gibanja tekočine brez valovanja..... | 21 |
| Slika 8: Shematski prikaz valovanja tekočine v rezervoarju..... | 23 |
| Slika 9: Impulzivni pritiski v prerezu, kjer je H višina polnjenja in D premer rezervoarja. | 32 |
| Slika 10: Oblika impulzivnih, konvekcijskih ter fleksibilnih pritiskov v tlorisu. | 32 |
| Slika 11: Skica konvekcijskih pritiskov. | 33 |
| Slika 12: Skica fleksibilnih pritiskov. | 33 |
| Slika 13: Prečni prerez rezervoarja z dimenzijami. Prikazana je $\frac{1}{2}$ rezervoarja. | 39 |
| Slika 14: Mreže končnih elementov..... | 40 |
| Slika 15: Prikazno okno programa Abaqus za vnos materialnega modela..... | 42 |
| Slika 16: Prikazno okno za vnos enačbe pritiskov..... | 43 |
| Slika 17: Prikazno okno za urejanje kontakta med dvema površinama | 44 |
| Slika 18: Shema kontaktne površine med rezervoarjem in togo podlago..... | 45 |
| Slika 19: Shema polovice rezervoarja v prerezu ter simetrijski robni pogoji..... | 46 |
| Slika 20: Shema polovice rezervoarja v tlorisu ter simetrijski robni pogoji. | 46 |
| Slika 21: Podokno za določitev lastnosti KE..... | 47 |
| Slika 22: S4R končni element. | 48 |
| Slika 23: Shematski prikaz dveh točk, ki ju spremljamo med analizo. | 49 |
| Slika 24: Dvig (w) spodnjega roba..... | 51 |
| Slika 25: Območje izbokline ter plastifikacija jekla v steni rezervoarja. | 52 |
| Slika 26: Prerez deformiranega rezervoarja. | 53 |

KAZALO GRAFIKONOV

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Grafikon 1: Horizontalni spekter pospeškov s q faktorjem 1,5 ter $a_{g,max}=0,25g$ | 28 |
| Grafikon 2: Navpičen spekter pospeškov s q faktorjem 1,5. | 29 |
| Grafikon 3: Pritiski na steno rezervoarja zaradi horizontalne komponente potresa. | 34 |
| Grafikon 4: Potek pritiskov na steno rezervoarja zaradi vertikalne komponente potresa. | 35 |
| Grafikon 5: Kombinacija pritiskov zaradi vertikalne in horizontalne komponente potresa na "levi" strani rezervoarja. | 37 |
| Grafikon 6: Kombinacija pritiskov zaradi vertikalne in horizontalne komponente potresa na "desni" strani rezervoarja. | 38 |
| Grafikon 7: Bilinearen materialni model jekla. | 41 |
| Grafikon 8: Dvig spodnjega roba rezervoarja. | 50 |
| Grafikon 9: Pomik točke izven ravnine plašča na nastali izboklini v steni rezervoarja..... | 52 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Parametri horizontalnega spektra pospeškov za različne tipe tal. | 28 |
| Preglednica 2: Parametri za navpični spekter pospeškov..... | 28 |
| Preglednica 3: Dejanske napetosti in deformacije za jeklo S355..... | 42 |

1 UVOD

1.1 Motivacija

Rezervoarji so namenjeni predvsem skladiščenju tekočin. V petrokemijski industriji so pomembni za skladiščenje naftnih derivatov. V vinarski dejavnosti se uporabljajo za skladiščenje in fermentacijo vina. Zaradi prisotnosti pri vseh večjih industrijskih objektih je njihova varnost zelo pomembna. Poškodbe rezervoarjev lahko privedejo do tako razlitja okolju škodljivih tekočin kot tudi do večjih finančnih posledic za industrijski obrat. Poškodbe rezervoarjev med potresom lahko povzročijo večjo katastrofo kot potres sam. Razlitje gorljivih snovi lahko povzroči nekontrolirane požare. Poškodba rezervoarja s pitno vodo lahko povzroči moteno oskrbo s pitno vodo ali celo pomanjkanje le-te. Leta 1964 je potres na Aljaski povzročil razlitje naftnih derivatov, kar je sprožilo požar, ki je trajal tri dni [20]. Potres v Kaliforniji leta 1933 je poškodoval rezervoarje za vodo in je del lokalnih prebivalcev ostal brez pitne vode [20].

Rezervoarji utrpijo največ poškodb med potresom. Veliko študij je bilo izvedenih na poškodovanih rezervoarjih med preteklimi potresi. Vsakič po potresu, kjer rezervoarji utrpijo velike poškodbe, se standardi za projektiranje rezervoarjev izboljšajo. Standardi za projektiranje rezervoarjev na potrese še vedno niso dokončani. Evrokod 8 npr. podrobneje obravnava le vertikalne cilindrične rezervoarje, sidrane v tla, v primeru prosto ležečih rezervoarjev pa vpelje nekatere predpostavke, da lahko uporabljamo enake enačbe kot za sidrane rezervoarje. Na podlagi sedanjih standardov je mogoče izračunati potresne učinke za določene rezervoarje. Ti postopki so računsko zahtevni. V pričujoči magistrski nalogi se osredotočimo na vertikalne cilindrične rezervoarje.

1.2 Pregled naloge

V magistrski nalogi pokažemo, kako lahko vertikalni cilindrični rezervoar analiziramo na potresno obtežbo. V začetnem delu naloge na kratko opišemo obnašanje rezervoarjev med potresom. Naslednje poglavje obravnava teoretično ozadje formul, ki jih srečamo v Evrokodu 8 v poglavju 4, ki se osredotoča na projektiranje rezervoarjev. Izpeljemo diferencialno enačbo za reševanje hidrodinamičnih pritiskov. Navedemo in razložimo robne pogoje diferencialne enačbe. V nadaljevanju se osredotočimo na izračun pritiskov za specifičen rezervoar. Izračunamo potresne učinke, ki delujejo na rezervoar, kot so predvideni v Evrokodu. Na podlagi izračunanih potresnih učinkov analiziramo rezervoar. Izvedemo numerično analizo s pomočjo programske opreme Abaqus. V analizi upoštevamo nelinearni materialni model jekla ter geometrijsko nelinearnost. Analiziramo rezultate in jih primerjamo s podobnimi analizami, ki so jih izvedli že drugi avtorji.

2 ODZIV REZERVOARJEV MED POTRESOM

Pretekle izkušnje kažejo na več možnih poškodb rezervoarjev med potresom. Poškodbe so odvisne od oblike rezervoarja in jakosti potresne obtežbe.

- Elasto-plastičen uklon stene,
- Pretežno elastičen uklon stene,
- Poškodbe strehe rezervoarja,
- Poškodba spodnje plošče,
- Poškodbe priključkov.

Opisujemo nekaj najbolj pogostih poškodb. Najbolj pogosta poškodba rezervoarjev je uklon.

Elasto-plastičen uklon. Poškodba nastane kot kombinacija velikih radialnih nateznih napetosti v steni in prevrtnitvenega momenta. Natezne radialne napetosti v rezervoarju nastanejo zaradi hidrostatične obtežbe, vertikalnega vzbujanja rezervoarja in pritiskov zaradi horizontalnega vzbujanja rezervoarja. Moment, ki povzroča prevrnitev rezervoarja, ustvarja na eni strani natezne sile, ki dvigujejo dno rezervoarja, na drugi strani pa tlačne sile, ki povzročajo uklon stene. Prevrtnitveni moment nastane zaradi asimetričnih pritiskov na steno rezervoarja, ki so posledica horizontalnega vzbujanja rezervoarja. Pri elasto-plastičnem uklonu stene navadno nastane izboklina pri dnu rezervoarja. Ta pojav imenujemo »slonova noga«. Slika 3 prikazuje pojav »slonove noge«.

Pretežno elastičen uklon. Nastanek poškodbe povzroči velika tlačna sila. Navadno nastane bodisi pri vrhu bodisi pri dnu rezervoarja. Slika 1 in 2 prikazujeta t. i. »diamantno obliko« pretežno elastičnega uklona stene rezervoarja ter pretežno elastičen uklon stene pri vrhu rezervoarja. Rammersorfer [2 in 3] navaja, da je verjeten vzrok za takšen uklon stene rezervoarja delovanje vertikalnega vzbujanja v nasprotni smeri gravitacije. Pritiski zaradi vertikalnega vzbujanja so simetrični in zato dodatno potiskajo rezervoar k tlom, ko delujejo v isti smeri kot hidrostatični. V primeru, ko jih odštejemo od hidrostatičnih oz. deluje vertikalno vzbujanje v nasprotni smeri gravitacije, se zmanjša sila, ki stabilizira rezervoar oz. ga potiska k tlom. Taka kombinacija potresnih vplivov privede do pretežno elastičnega uklona stene rezervoarja.

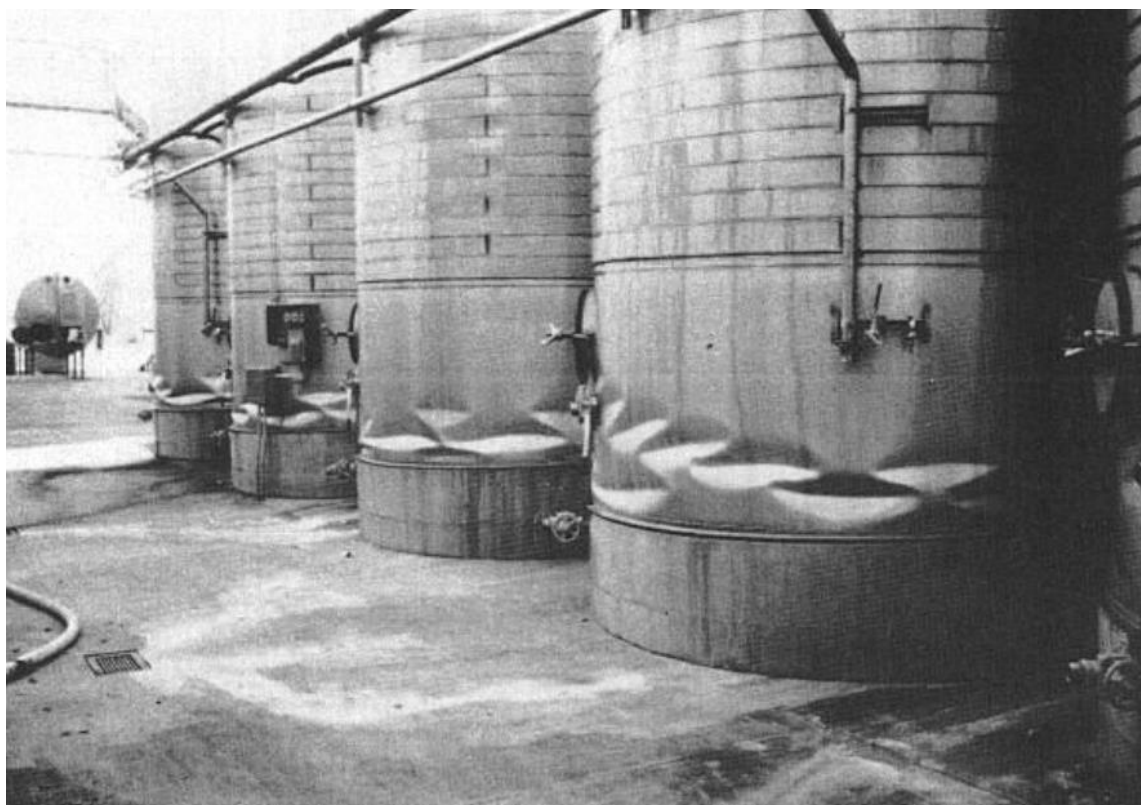
Poškodba spodnje plošče. Spodnja plošča rezervoarja se poškoduje v primeru, če rezervoar ni sidran. Do poškodbe pride pri dvigu ene strani spodnjega roba plošče. Dvig je posledica horizontalne komponente potresa, ki povzroča prevrtnitveni moment. Pri dvigu se spodnja plošča poškoduje na mestu, kjer se ukrivlja.

Poškodbe priključkov. Cevi, ki so priključene na rezervoar, se lahko poškodujejo na več načinov. Do Poškodb lahko pride zaradi posedkov rezervoarja, pretežno elastičnega uklona,

elasto-plastičnega uklona ter drsenja rezervoarja. Slika 4 prikazuje poškodbe priključenih cevi na rezervoar v primeru pojava »slonove noge«.



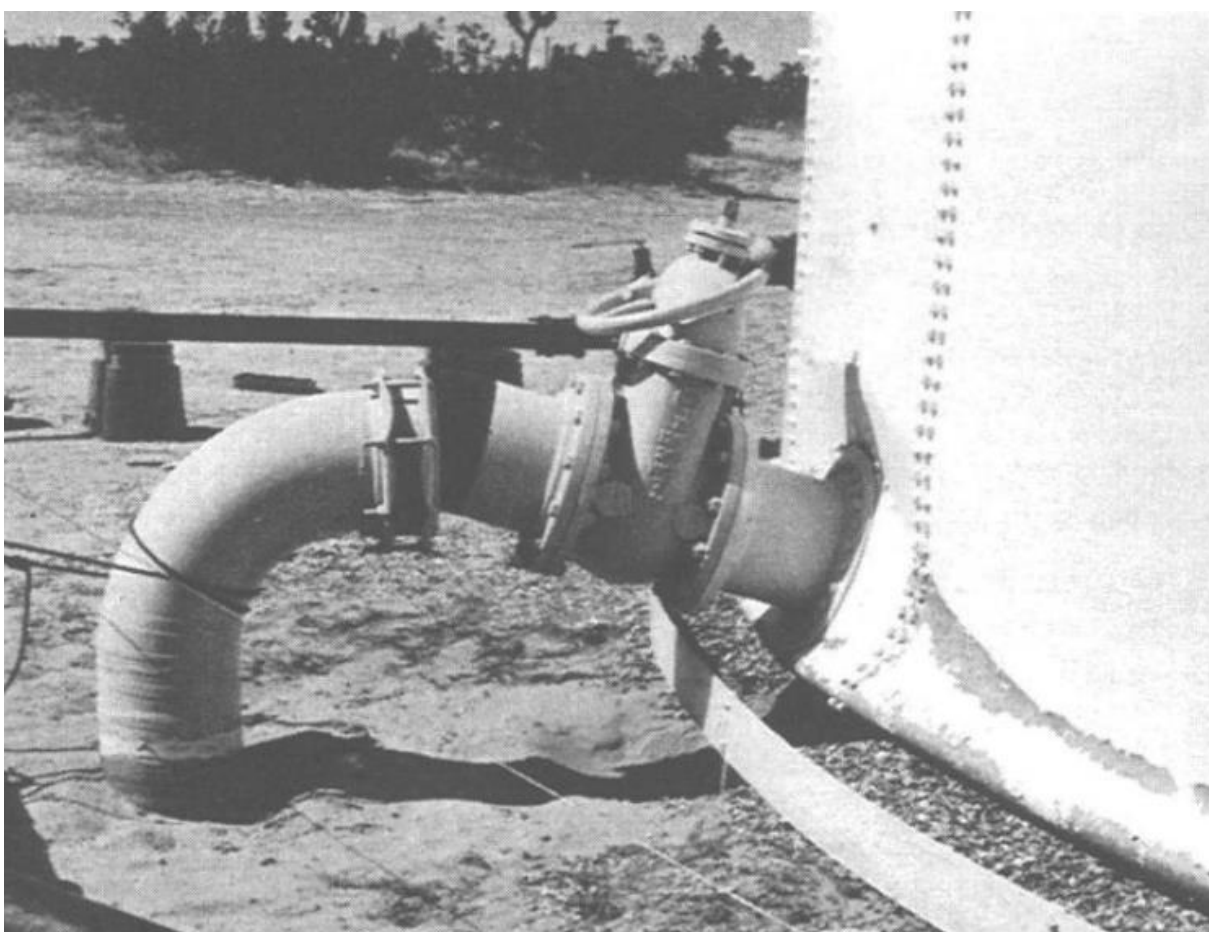
Slika 1: Pretežno elastičen uklon stene rezervoarja pri vrhu.



Slika 2: "Diamantna" oblika uklona stene rezervoarja.



Slika 3: "Slonova noga" pri dnu rezervoarja.



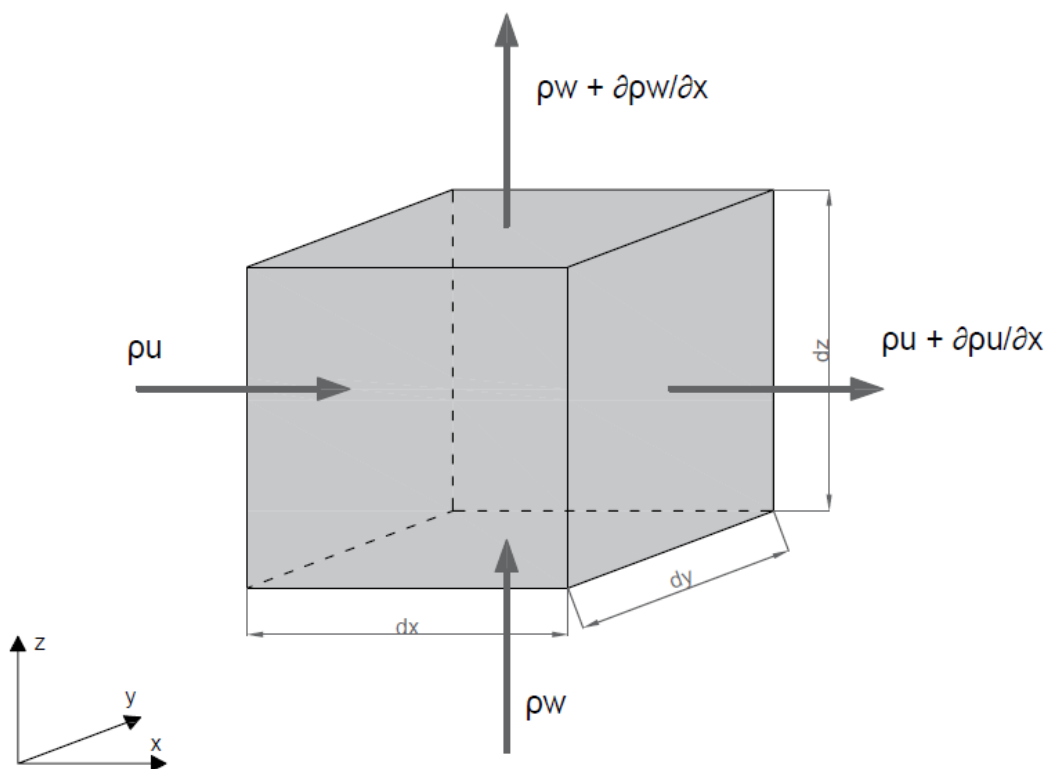
Slika 4: Poškodba priključka na rezervoar zaradi pojava "slonove noge".

3 RAZLAGA ENAČB, KI OPISUJEJO OBNAŠANJE REZERVOARJA MED POTRESOM

3.1 Gibanje tekočine

Začnemo z osnovnimi enačbami hidrodinamike, ki jih opisuje Shapre [21]. Izhajamo iz osnovnega kontinuitetnega zakona v hidrodinamiki.

Kontinuitetni zakon izhaja iz principa ohranitve mase. Obravnavamo delec tekočine, ki ima nespremenljiv volumen. Skozenj teče tok tekočine. Zakon o ohranitvi mase veleva, da sta pritok tekočine in akumulirana tekočina v delcu (zaradi stisljivosti) enaka odtečeni tekočini iz delca. Razlika med dovedeno in odvedeno maso tekočine iz delca je enaka akumulirani tekočini.



Slika 5: Delec tekočine.

S pomočjo slike 5 in po principu ohranitve mase lahko zapišemo kontinuitetni zakon. Pritok in odtok tekočine seštejemo ter upoštevamo še stisljivost tekočine oz. tekočino, ki se morebiti akumulira v obravnavanem delcu. Iz tega sledi enakost (3.1). Enačbo skrajšamo in jo lahko zapišemo z enačbo (3.2).

$$\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \rho u + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

V (3.1) in (3.2) je u hitrost tekočine v x -smeri, ρ je gostota tekočine, t pa je čas. Zapisali smo kontinuitetno enačbo za enodimenzionalen problem. Enako lahko storimo za vse tri smeri x , y ter z . Dobimo kontinuitetno enačbo (3.3) v splošni obliki za tridimenzionaln problem. Zvezo (3.3) lahko zapišemo krajše z uporabo matematičnega simbola za divergenco (div) (3.4).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{div}(\rho \mathbf{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.4)$$

Pri tem je $\mathbf{V} = \{u, v, w\}^T$ vektor hitrosti tekočine za tridimenzionalen prostor. Vektor hitrosti lahko razdelimo na hitrosti v posamezni koordinatni osi.

Za nestisljive tekočine velja, da se voda v delcu ne akumulira in je tako dovedena količina vode enaka odvedeni količini vode. Če v kontinuitetni enačbi upoštevamo, da je gostota konstantna, potem sledi, da je sprememba gostote po času enaka nič. V enačbi odpade člen na desni strani enačbe (3.4). Odpadli člen kontinuitetne enačbe zapišemo z enačbo (3.5).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.5)$$

Kontinuitetno enačbo sedaj zapišemo z enačbo (3.6) ali na daljši način z enačbo (3.7).

$$\text{div}(\mathbf{V}) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

Upoštevamo, da tekočina v rezervoarju med potresom ne rotira. Sedaj lahko v kontinuitetno enačbo (3.7) vpeljemo zveze, ki veljajo za laminarni tok. Po definiciji je za laminarni tok vektor kotne hitrosti enak nič. Kotno hitrost delca tekočine je možno zapisati z enačbo (3.8), kjer je simbol ∇ rotor vektorja hitrosti \mathbf{V} .

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{V} = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

Vpeljemo vektorsko identiteto (3.9), ki velja za katerokoli skalarno polje. V našem primeru vpeljemo skalarno polje ϕ . Vektorska identiteta veleva, da je rotor gradienta skalarnega polja vedno enak nič.

$$\nabla \times \nabla \phi = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

Količino ϕ imenujemo potencialna funkcija, ki je pravokotna na linije toka. Lahko jo smatramo kot produkt hitrosti toka in dolžine, na kateri je hitrost toka še enaka.

Iz enačb (3.9) in (3.8) lahko sklepamo, da je možno vektor hitrosti tekočine zapisati kot gradient skalarne funkcije.

$$\mathbf{V} = \nabla\phi \quad (3.10)$$

Enačbo (3.10), ki opisuje vektor hitrosti tekočine, sedaj vstavimo v kontinuitetno enačbo (3.6). Dobljeno enačbo zapišemo v krajši obliki z enačbo (3.11) ali na daljši način z enačbo (3.12).

$$\nabla \cdot \nabla\phi = 0 \text{ ali } \nabla^2\phi = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.12)$$

Dobimo diferencialno enačbo, ki jo poznamo po imenu Laplaceova diferencialna enačba v kartezijskih koordinatah. Enačbo lahko z vpeljavo cilindričnega koordinatnega sistema prevedemo na Laplaceovo diferencialno enačbo v cilindričnih koordinatah r , θ , in z (3.13), s katero lahko rešujemo problem hidrodinamičnih pritiskov v rezervoarju zaradi potresne aktivnosti.

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial\theta^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.13)$$

Sedaj lahko zapišemo posamezne člene vektorja hitrosti tekočine \mathbf{V} v odvisnosti od funkcije potenciala hitrosti ϕ . Člene zapišemo v cilindričnem koordinatnem sistemu.

$$v_z = -\frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (3.14)$$

$$v_r = -\frac{\partial\phi}{\partial r} \quad (3.15)$$

$$v_\theta = -\frac{\partial\phi}{r\partial\theta} \quad (3.16)$$

3.2 Reševanje Laplaceove diferencialne enačbe

Pritiske zaradi vpliva potresa na rezervoar razdelimo na pritiske, ki nastanejo kot posledica togega obnašanja rezervoarja, ter pritiske zaradi deformiranja rezervoarja.

Pri togem obnašanju rezervoarja ločimo: (i) vpliv valovanja tekočine in (ii) togi premik tekočine skupaj z rezervoarjem. Upoštevamo, da so pritiski na višini polnjenja enaki nič. Te pritiske imenujemo impulzivni pritiski. Popravek impulzivnih pritiskov naredimo z uvedbo konvekcijskih pritiskov, ki upoštevajo valovanje tekočine. V primeru valovanja imajo pritiski

na višini polnjenja neko vrednost. Celoten vpliv togega obnašanja rezervoarja med potresom v horizontalni smeri opišemo s seštevkom impulzivnih in konvekcijskih pritiskov.

Pri deformabilnem obnašanju rezervoarja vpliva valovanja ne upoštevamo posebej; predpostavimo, da je ta vpliv enak kot pri togem obnašanju rezervoarja. Upoštevamo le premik tekočine skupaj z rezervoarjem. Gibanje tekočine je v primeru deformabilnega rezervoarja pogojeno z nihajno obliko sistema rezervoar-tekočina. Analiza je osnovana na predpostavki, da je dovolj, če upoštevamo le osnovno nihajno obliko.

3.2.1 Nastavek za rešitev

Laplaceovo enačbo lahko rešujemo s pomočjo Fourierjeve metode reševanja parcialnih diferencialnih enačb. Po Fourierjevi metodi diferencialno enačbo preuredimo tako, da ločimo spremenljivke in poiščemo rešitev za vsako spremenljivko posebej.

Funkcijo potenciala hitrosti tekočine $\phi(r, \theta, z, t)$ zapišemo z naslednjo zvezo.

$$\phi(r, \theta, z, t) = R(r)P(\theta)Z(z) \quad (3.17)$$

Funkcijo (3.17) vstavimo v diferencialno enačbo (3.13) in jo preuredimo.

$$\frac{1}{r} \frac{R'}{R} + \frac{R''}{R} + \frac{1}{r^2} \frac{P''}{P} + \frac{Z''}{Z} = 0 \quad (3.18)$$

Nastalo enačbo (3.18) lahko sedaj ločimo na navadni homogeni diferencialni enačbi (3.19) in (3.22) ter na parcialno enačbo drugega reda (3.23). Postopek preureditve enačbe (3.18) je prikazan v spodnjih enačbah od (3.19) do (3.23).

$$\frac{Z''}{Z} = \lambda^2 \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{r} \frac{R'}{R} + \frac{R''}{R} + \frac{1}{r^2} \frac{P''}{P} + \lambda^2 = 0 \quad (3.20)$$

$$r \frac{R'}{R} + \frac{r^2 R''}{R} + r^2 \lambda^2 = -\frac{P''}{P} \quad (3.21)$$

$$\frac{P''}{P} = -k^2 \quad (3.22)$$

$$r \frac{R'}{R} + \frac{r^2 R''}{R} + r^2 \lambda^2 - k^2 = 0 \quad (3.23)$$

Diferencialno enačbo drugega reda (3.23) je mogoče preurediti v Besselovo diferencialno enačbo (3.24), ki jo rešimo s pomočjo Besselovih funkcij.

$$r^2 R'' + rR' + (r^2 \lambda^2 - k^2)R = 0 \quad (3.24)$$

Celoten in natančen postopek reševanja diferencialnih enačb ob upoštevanju robnih pogojev je razviden v literaturi [14] in [22]. V nalogi se osredotočimo na pomen robnih pogojev ter sam izvor enačb, ki določajo velikost in potek pritiskov na rezervoar zaradi potresne aktivnosti.

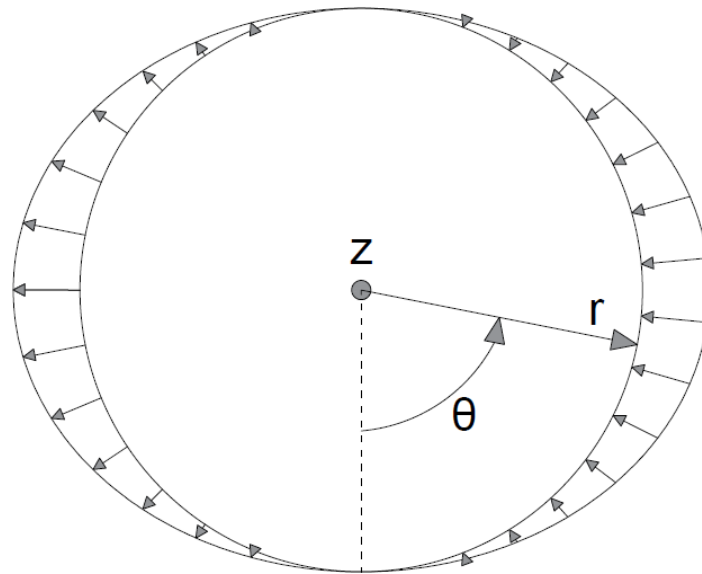
3.2.2 Impulzivni pritiski pri togem obnašanju rezervoarja

Robni pogoji

- Hitrost tekočine v vertikalni smeri je enaka nič za vrednotenje impulzivnih pritiskov. Obravnavamo gibanje le v horizontalni smeri, zato nimamo nobenega gibanja tal v vertikalni smeri. Pri dnu rezervoarja zato nimamo gibanja tekočine v vertikalni smeri. Iz tega sledi naslednji robni pogoj.

$$\text{pri } z = 0; \quad v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3.25)$$

- Hitrost gibanja tekočine v radialni smeri, tj. pravokotno na steno rezervoarja, je pogojena s premikanjem rezervoarja med potresom. Vektor radialne hitrosti ima največjo vrednost, ko je vzporeden s smerjo potresa, in je enak nič, ko je pravokoten na smer delovanja potresa. Na sliki 6 je prikazana tlorisna oblika impulzivnih pritiskov, ki delujejo pravokotno na steno rezervoarja.



Slika 6: Oblika pritiskov na steno rezervoarja.

$$\text{pri } r = R: \quad v_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r} = \dot{x}(t) \cos(\theta) \quad (3.26)$$

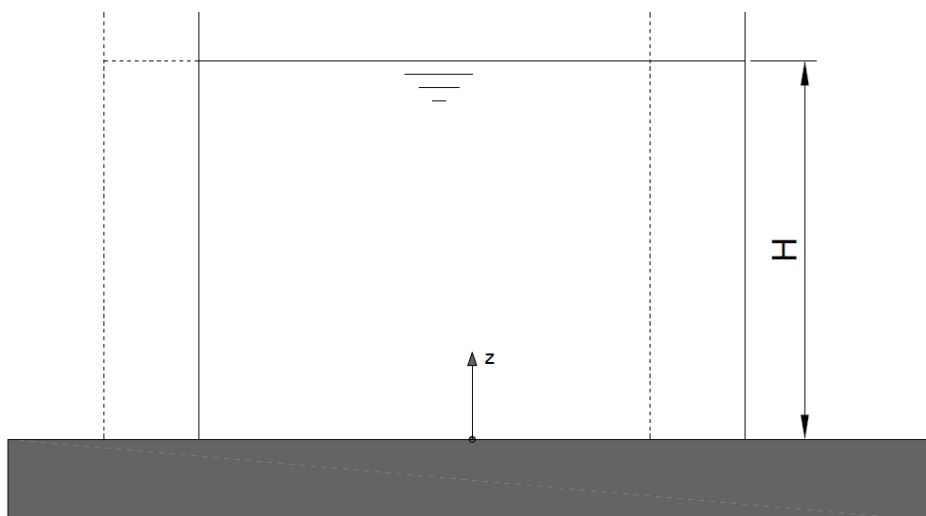
$\dot{x}(t)$ je hitrost tekočine v horizontalni smeri, ki je neposredno odvisna od pospeška tal v horizontalni smeri.

- Pritisk je s funkcijo potenciala hitrosti toka ϕ povezan z enačbo $p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$. V primeru impulzivnih pritiskov obravnavamo, da se tekočina premika togo skupaj z rezervoarjem. Zaradi tega so pritiski na gladini, enake nič.

$$\text{pri } z = H: \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (3.27)$$

H je višina tekočine v rezervoarju.

Na sliki 7 shematsko prikazano togo gibanje rezervoarja in gibanje tekočine brez valovanja.



Slika 7: Shematičen prikaz gibanja tekočine brez valovanja.

Rešitev Laplaceove enačbe za impulzivne pritiske

Z upoštevanjem robnih pogojev od (3.25) do (3.27) ter uporabo nastavka za reševanje diferencialne enačbe (3.13) dobimo rešitev za funkcijo ϕ za primer impulzivnih pritiskov (3.28).

Natančen postopek reševanja je opisan v [14].

$$\phi_i = -\dot{x}(t)H\cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8(-1)^{n+1}}{[(2n-1)\pi]^2} \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]}{I_1'\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]} \cos\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right] \quad (3.28)$$

I_1 je modificirana Besselova funkcija prvega reda. I_1' je odvod Besselove funkcije prvega reda.

Z upoštevanjem zveze (3.29) med funkcijo potenciala hitrosti in pritiski enačbo odvajamo po času ter množimo z gostoto. Dobimo pritiske (3.30), ki delujejo na plašč cilindra zaradi tega premikanja rezervoarja med potresom.

$$p_i = \rho \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \quad (3.29)$$

$$p_i = -\ddot{x}(t)\rho H\cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8(-1)^{n+1}}{[(2n-1)\pi]^2} \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]}{I_1'\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]} \cos\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right] \quad (3.30)$$

$\ddot{x}(t)$ je pospešek tekočine v horizontalni smeri, ki pa je v primeru obravnavanja impulzivnih pritiskov enak horizontalnemu pospešku tal.

3.2.3 Konvekcijski pritiski pri togem obnašanju rezervoarja

Robni pogoji

- Enako kot pri impulzivnih pritiskih obravnavamo le gibanje v horizontalni smeri, zato nimamo nobenega gibanja tal v vertikalni smeri. Pri dnu rezervoarja zato nimamo gibanja tekočine v vertikalni smeri. Iz tega sledi naslednji robni pogoj.

$$\text{pri } z = 0; \quad v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3.31)$$

- Pri konvekcijskih pritiskih obravnavamo le vpliv valovanja tekočine na površini. Ne upoštevamo togega gibanja tekočine skupaj z rezervoarjem. V radialni smeri zaradi tega nimamo gibanja tekočine, kot jo imamo v primeru reševanja impulzivnih pritiskov.

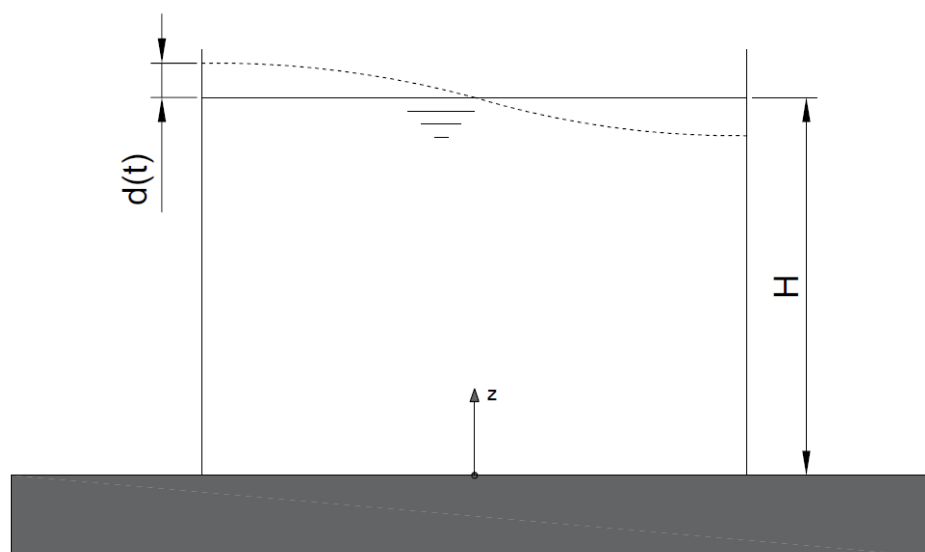
$$v_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad (3.32)$$

- Zaradi vpliva valovanja nastanejo pri $z = H$ pritiski na cilinder, ki jih opišemo z enačbo $p = \rho g d(t)$, kjer je $d(t)$ višina vala in g težni pospešek. Enačba opisuje pritiske, ki nastanejo zaradi valov na steno rezervoarja. Upoštevamo zvezo $p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$. Enačbi združimo in odvajamo po času. Dobimo $\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g v_z = 0$. Komponento v_z razčlenimo na impulzivni in konvekcijski del. Slika 8 shematsko prikazuje le valovanje tekočine ter višino vala $d(t)$, ki jo uporabimo v robnem pogoju.

$$\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial t^2} + g \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial z} + \frac{\partial \phi_c}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.33)$$

ϕ_c je rešitev diferencialne enačbe (3.13) za konvekcijske pritiske.

$$\text{pri } z = H: \quad \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_c}{\partial z} = -g \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \quad (3.34)$$



Slika 8: Shematski prikaz valovanja tekočine v rezervoarju.

Rešitev Laplaceove enačbe

Upoštevamo robne pogoje od (3.31) do (3.34) za konvekcijske pritiske in, podobno kot pri impulzivnih pritiskih, pridemo do rešitve za funkcijo potenciala hitrosti ϕ . Pri konvekcijski rešitvi sprva določimo rešitev funkcije za harmonično gibanje tal s funkcijo $\ddot{x}(t) = \ddot{x}_0 e^{i\omega t}$, kjer je i kompleksno število in ω frekvenca premikanja tal. Rešitev za harmonično gibanje tal preuredimo v pritiske za neharmonično gibanje s pospeškom tal poljubne vrednosti. Podroben postopek je opisan v [14].

$$\phi_c = -\frac{1}{i\omega} \ddot{x}_0 e^{i\omega t} H \frac{R}{H} \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{cn}}\right)^2} \frac{2J_1\left(\lambda_n \frac{r}{R}\right) \cosh\left(\lambda_n \frac{z}{R}\right)}{(\lambda_n^2 - 1) J_1(\lambda_n) \cosh\left(\lambda_n \frac{r}{R}\right)} \quad (3.35)$$

$$\omega_{cn} = \sqrt{\frac{\lambda_n g}{R} \tanh\left(\lambda_n \frac{H}{R}\right)} \quad (3.36)$$

J_1 in J_1' sta Besselovi funkciji prvega reda in njen odvod.

ω_{cn} je frekvenca valovanja tekočine na površini. λ_n so ničle Besselovih funkcij prvega reda.

Upoštevamo zvezo (3.37) med pritiski in potencialom hitrosti ter preuredimo enačbo. Dobimo konvekcijske pritiske (3.38), ki ponazarjajo vpliv valovanja tekočine med potresom.

$$p_c = \rho \frac{\partial \phi_c}{\partial t} \quad (3.37)$$

$$p_c = \rho H \frac{R}{H} \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R J_1\left(\lambda_n \frac{r}{R}\right) \cosh\left(\lambda_n \frac{z}{R}\right)}{(\lambda_n^2 - 1) H J_1(\lambda_n) \cosh\left(\lambda_n \frac{r}{R}\right)} A_{cn}(t) \quad (3.38)$$

A_{cn} predstavlja pospešek sistema z eno prostostno stopnjo določen iz spektra pospeškov ter s frekvenco nihanja ω_{cn} .

3.2.4 Fleksibilni pritiski pri deformabilnem obnašanju rezervoarja

Robni pogoji

- Upoštevamo nihajno obliko $\psi(z)$, ki se spreminja po višini rezervoarja. Nihajna oblika izhaja iz sistema z eno prostostno stopnjo [4, 1 in 3]. Radialne hitrosti tekočine so podobne kot pri impulzivnih pritiskih, vendar upoštevamo, da v tem primeru radialne hitrosti niso enake po celi višini rezervoarja, ampak so razporejene glede na nihajno obliko sistema rezervoar-tekočina. Vektor radialne hitrosti ima največjo vrednost, ko je vzporeden s smerjo potresa, in je enak nič, ko je pravokoten na smer delovanja potresa. Pri deformabilnem rezervoarju so radialne hitrosti tekočine pogojene z nihajno obliko sistema rezervoar-tekočina.

$$v_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = -\dot{x}(t) \psi(z) \cos(\theta) \quad (3.39)$$

- Obravnavamo gibanje le v horizontalni smeri, zato nimamo nobenega gibanja tekočine v vertikalni smeri pri dnu rezervoarja.

$$\text{pri } z = 0; \quad v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3.40)$$

- Napetosti so s funkcijo potenciala hitrosti toka ϕ povezane z enačbo $p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$. V primeru fleksibilnih pritiskov obravnavamo, da se tekočina premika skupaj z rezervoarjem. Zaradi tega imamo na gladini pritiske tekočine, enake nič. Ne upoštevamo vpliva valovanja.

$$\text{pri } z = H: \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (3.41)$$

Rešitev Laplaceove enačbe

Rešujemo Laplaceovo diferencialno enačbo z upoštevanjem robnih pogojev od (3.39) do (3.41). Dobimo rešitev za funkcijo ϕ_f (3.42). Vpeljemo zvezo med pritiski ter funkcijo ϕ_f in tako dobimo enačbo (3.43) za fleksibilne pritiske.

$$\phi_f = -\dot{x}(t)\cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4H}{(2n-1)\pi} \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi R}{2H}\right]}{I'_1\left[(2n-1)\frac{\pi R}{2H}\right]} \alpha_n \cos\left[(2n-1)\frac{\pi z}{2H}\right] \quad (3.42)$$

$$p_f = -\ddot{x}(t)\rho H \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\alpha_n}{(2n-1)\pi} \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi R}{2H}\right]}{I'_1\left[(2n-1)\frac{\pi R}{2H}\right]} \cos\left[(2n-1)\frac{\pi z}{2H}\right] \quad (3.43)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{H} \int_0^H \psi(z) \cos\left[(2n-1)\frac{\pi z}{2H}\right] dz$$

Pri reševanju enačbe za fleksibilne pritiske je potrebno upoštevati nihajno obliko sistema rezervoar-tekočina. Upoštevamo le nihajne oblike, ki izvirajo iz sistema z eno prostostno stopnjo [1, 3 in 4].

V standardu [1] je predviden iteracijski postopek določanja fleksibilnih pritiskov.

1. Prvi korak je predpostavka nihajne oblike $\psi(z)$. Začetna vrednost je lahko linearna zveza $\psi(z) = z/H$.
2. Z vpeljavo nihajne oblike izračunamo pritiske z modificirano enačbo za fleksibilne pritiske, navedeno v Evrokodu 8 [1], ki izhaja iz enačbe (3.43).
3. Določimo deformacijo sistema rezervoar-tekočina zaradi fleksibilnih pritiskov.
4. Uporabimo obliko deformacije rezervoarja, ki jo določimo v koraku 3, ter uporabimo to obliko za ponovni račun pritiskov v točki 2.
5. Postopek ponavljamo od točke 2 do 4, dokler ne dosežemo konvergence pritiskov.

3.2.5 Pritiski zaradi delovanja vertikalne komponente potresa pri togem in deformabilnem obnašanju rezervoarja

Robni pogoji

- Hitrost tekočine pri dnu rezervoarja je enaka hitrosti dna rezervoarja, ta pa je odvisna od tipa podlage, na katero je postavljen rezervoar. Za naš primer obravnavamo togo

podlago in je zato vertikalna hitrost dna rezervoarja $\dot{x}_v(t)$ neposredno povezana z vertikalnim pospeškom tal.

$$\text{pri } z = 0: \quad v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = \dot{x}_v(t) \quad (3.44)$$

- Hitrost tekočine ob steni rezervoarja je enaka hitrosti stene rezervoarja. Slednjo dobimo iz deformacije stene rezervoarja $w(t)$, ki je posledica deformabilnega obnašanja rezervoarja. Gre za deformacijo stene v radialni smeri, tj. izven ravnine stene.

$$v_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{\partial w(t)}{\partial t} \quad (3.45)$$

- Pritisk je s funkcijo potenciala hitrosti toka ϕ povezan z enačbo $p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$. V primeru pritiskov zaradi vertikalne komponente obravnavamo, da se tekočina na vrhu rezervoarja premika skupaj z rezervoarjem. Zaradi tega imamo na gladini pritiske, enake nič.

$$\text{pri } z = H: \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (3.46)$$

Rešitev Laplaceove enačbe

Upoštevamo robne pogoje od (3.44) do (3.46) za pritiske zaradi vertikalnega vzbujanja rezervoarja ter razrešimo Laplaceovo enačbo. Dobimo pritiske na plašč rezervoarja zaradi vertikalnega delovanja potresa. Enačbo (3.47) je možno preurediti na pritiske, ki nastanejo zaradi togega premikanja rezervoarja, ter na pritiske, ki nastanejo zaradi deformabilnega obnašanja rezervoarja.

$$p_v = -2\rho H \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n} \frac{I_0\left(\lambda_n \frac{r}{R}\right)}{I_1(\lambda_n)} \left[\int_0^1 \ddot{w} \cos(\alpha_n \zeta) d\zeta \right] \cos(\alpha_n \zeta)}_{\text{deformabilno obnašanje}} + \frac{\rho H(1-\zeta)\ddot{x}(t)}{\text{togo obnašanje}} \quad (3.47)$$

Pri tem je $\lambda_n = \frac{R}{H} \alpha_n$ ter $\alpha_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$. I_0 in I_1 sta modificirani Besselovi funkciji nultega in prvega reda.

Enačbo je možno preurediti na dve enostavnejši enačbi, kot ju navaja Evrokod 8 [1]. Celoten postopek preureditve enačbe je razviden v Veletsos [22].

Pritiski, ki nastanejo zaradi vertikalne komponente potresa, se delijo na pritiske zaradi togega premikanja rezervoarja in zaradi deformabilnega obnašanja rezervoarja. Enačbi (3.48) in

(3.49) predstavljata pritiske zaradi vertikalne komponente potresa za togo obnašanje rezervoarja ter za deformabilno obnašanje rezervoarja.

$$pvr = \rho H (1 - \zeta) A_{vg} \quad (3.48)$$

$$pvf = 0.815 f_{\gamma} \rho H \cos\left(\frac{\pi}{2} \zeta\right) A_{vf} \quad (3.49)$$

Pri čemer je A_{vg} vertikalni pospešek tal, A_{vf} je pospešek, določen s spektra pospeškov. A_{vf} je določen glede na frekvenco nihanja f_{vd} sistema tekočina-rezervoar. Faktor f_{γ} je popravek enačbe, ki je odvisen od oblike rezervoarja.

Frekvenco nihanja sistema rezervoar-tekočina lahko izrazimo z enačbo (3.50).

$$f_{vd} = \frac{1}{4R} \left[\frac{2E I_1(\gamma_1) s(\zeta)}{\pi \rho H (1 - \nu^2) I_0(\gamma_1)} \right] \quad (3.50)$$

Kjer je $\gamma_1 = \pi/2\gamma$, pri tem je $\gamma = H/R$. Količina $s(\zeta)$ opisuje debelino stene rezervoarja, ki se spreminja z višino ($\zeta = z/H$). Za račun frekvence nihanja vzamemo vrednost debeline stene pri $\zeta = 1/3$. Količini E in ν sta modul elastičnosti in Poissonov količnik materiala rezervoarja.

4 DOLOČITEV PRITISKOV PO EC 8

4.1 Potresna obtežba

Računamo pritiske zaradi navpične ter vodoravne komponente potresa. Spektre pospeškov določimo po standardu SIST EN 1998-1:2006 [1]. V poglavju 3.2.2.5 »Projektne spekter za elastično analizo« je določena oblika vodoravnega projektne spektra; predpisana so tudi navodila za določitev navpičnega projektne spektra pospeškov. Navpični projektne spekter pospeškov se ravna po istih enačbah kot vodoravni spekter, vendar uporablja drugačne parametre, navedene v istem standardu v poglavju 3.2.2.3. V preglednicah 1 in 2 so podani parametri za določitev spektrov pospeškov, ki so vzeti iz standarda [1].

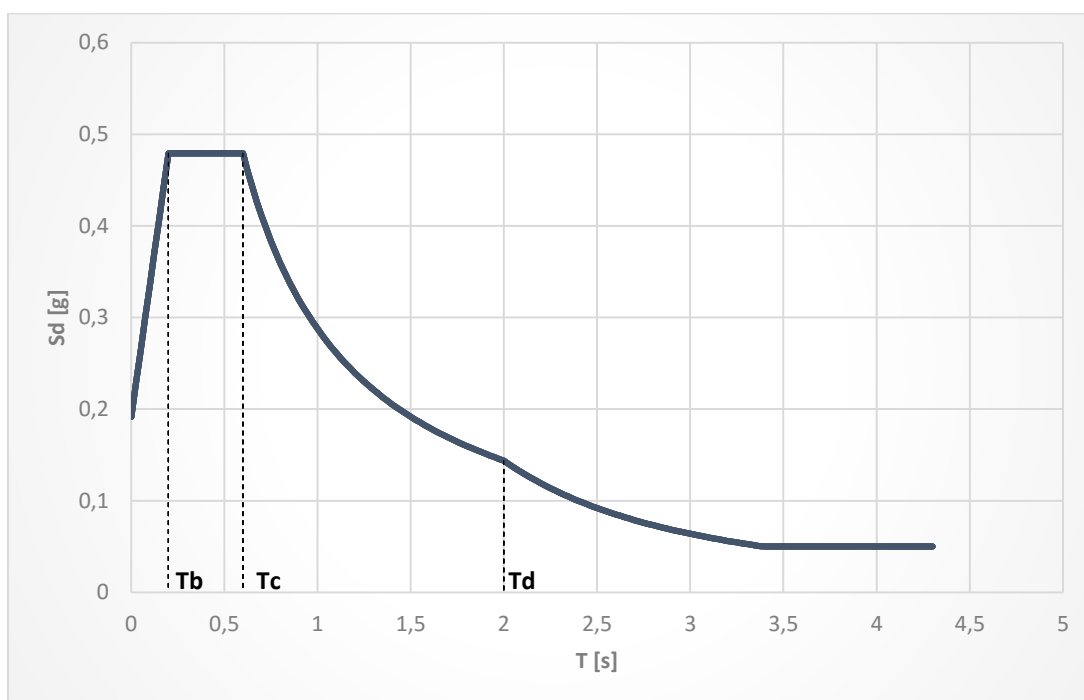
Grafikon 1 prikazuje horizontalni projektne spekter pospeškov, ki je določen glede na zahteve iz standarda [1]. Spekter pospeškov je določen za maksimalni pospešek tal 0,25g ter za tip tal C. Upoštevamo, da je q faktor enak 1,5. S q faktorjem opišemo obnašanje konstrukcije med potresom. Pove nam, kakšna je duktilnost konstrukcijskega sistema. V grafikonu 2 je prikazan vertikalni spekter pospeškov, določen za parametre, navedene v tabeli 2 za q -faktor 1,5.

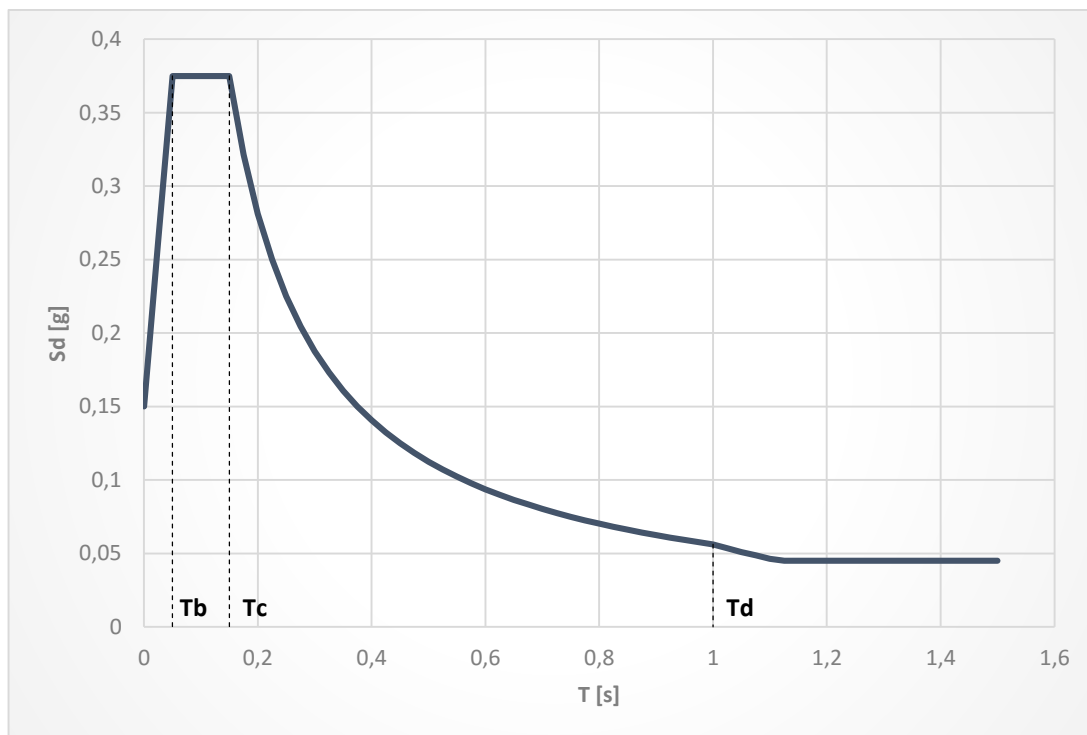
Preglednica 1: Parametri horizontalnega spektra pospeškov za različne tipe tal.

| Tip tal | S | T _b [s] | T _c [s] | T _d [s] |
|---------|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A | 1.0 | 0.15 | 0.4 | 2.0 |
| B | 1.2 | 0.15 | 0.5 | 2.0 |
| C | 1.15 | 0.20 | 0.6 | 2.0 |
| D | 1.35 | 0.20 | 0.8 | 2.0 |
| E | 1.4 | 0.15 | 0.5 | 2.0 |

Preglednica 2: Parametri za navpični spekter pospeškov.

| Spekter | Avg/ag | T _b [s] | T _c [s] | T _d [s] |
|---------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Tip 1 | 0.90 | 0.05 | 0.15 | 1.0 |

Grafikon 1: Horizontalni spekter pospeškov s q -faktorjem 1,5 ter $a_{g,max} = 0,25g$.



Grafikon 2: Navpični spekter pospeškov s q -faktorjem 1,5.

Pri analizi rezervoarja upoštevamo sposobnost disipacije energije konstrukcije. Pri vertikalnem vzburjanju konstrukcije je predviden faktor obnašanja $q = 1,5$.

Za horizontalno vzburjanje konstrukcije ločimo impulzivno in konvekcijsko gibanje tekočine, ki ju povzroči potresna obtežba. Pri konvekcijskih pritiskih oziroma valovanju tekočine obravnavamo, da se energija ne disipira in je zato faktor obnašanja $q = 1,0$. V primeru impulzivnega gibanja tekočine upoštevamo faktor obnašanja $q = 1,5$. V literaturi [12] priporočajo, naj q -faktor ne bo večji od 1,5. Faktor obnašanja za impulzivni efekt je enak pri togih in deformabilnih rezervoarjih. Faktor je določen glede na pretekle poškodbe rezervoarjev pri potresih ter glede na neelastično obnašanje spodnje plošče rezervoarja [12].

4.2 Pritiski po EC8

Račun pritiskov pri potresni analizi rezervoarjev je razdeljen na horizontalno in vertikalno komponento potresa. Pri horizontalni komponenti delimo pritiske na:

- impulzivne, ki so posledica togega premikanja rezervoarja in medija v njem;
- konvekcijske, ki nastanejo zaradi valovanja medija v rezervoarju ter
- fleksibilne, ki so posledica deformabilnega obnašanja rezervoarja med potresom.

Zaradi vertikalnega vzburjanja rezervoarja nastaneta dve vrsti pritiskov na stene rezervoarja, in sicer:

- pritiski zaradi togega premikanja rezervoarja v vertikalni smeri ter
- pritiski zaradi deformabilnega obnašanja rezervoarja med potresom v vertikalni smeri.

Pritiski so vrednoteni po predlaganih enačbah in postopkih, navedenih v Evrokodu 8 [1], del 4, ki obravnava silose, rezervoarje in cevovode. Natančneje se osredotočimo na aneks B, v katerem so opisani postopki za potresno analizo rezervoarjev. Podane enačbe veljajo za rezervoarje cilindrične oblike z vertikalno osjo, za toge in deformabilne temelje ter za delno in polno sidrane rezervoarje. Podroben računski postopek je razviden v prilogi B. Enačbe, upoštevane v Evrokodu 8 [1], izhajajo iz enačb za pritiske (3.30), (3.38) ter (3.43), ki so bile navedene in izpeljane v poglavju 3 te naloge. Enačbe so v standardu [1] skrajšane. Primerjava enačb pritiskov, ki smo jih izračunali v poglavju 3, z enačbami navedenimi v standardu [1] je prikazana v prilogi A.

Nesidrani rezervoarji so podvrženi nihanju konstrukcije in v nekaterih primerih tudi dvigu spodnjega roba rezervoarja. Efekt dviga spodnjega roba vpliva samo na fleksibilne pritiske. Impulzivni in konvekcijski pritiski ostanejo enaki. Dvig spodnjega roba podaljša nihajni čas konstrukcije in se zaradi tega v spektru pospeškov pomaknemo proti manjšim vrednostim pospeška mase. Zaradi tega efekta se vpliv dviga na fleksibilne pritiske običajno zanemari, saj smo tako na varni strani.

Za toge rezervoarje upoštevamo le impulzivne in konvekcijske pritiske. Fleksibilnih pritiskov ne upoštevamo, saj se ti formirajo le za primere deformabilnih rezervoarjev.

Za primer rezervoarja, ki ga računamo v poglavju 5, upoštevamo pritiske za sidrane rezervoarje. Obravnavani rezervoar je deformabilen in zato je potrebno določiti impulzivne, konvekcijske ter fleksibilne pritiske. Potresna obtežba za deformabilne rezervoarje se določi tako, da seštejemo vse pritiske, ki delujejo na steno in dno rezervoarja.

4.2 Horizontalno vzbujanje rezervoarja

Impulzivni pritiski

Impulzivni pritiski ponazarjajo zadevanje tekočine v steno rezervoarja med potresom. Dajo napačne pritiske na višini polnjenja, saj ne upoštevajo pravilnega robnega pogoja. Ne upoštevajo vpliva valovanja. Vpliv valov nadomestimo s konvekcijskimi pritiski. Oblika impulzivnih pritiskov se spreminja za različne faktorje $\gamma = H/R$, ki predstavljajo vitkost rezervoarja.

Za visoke in vitke rezervoarje so impulzivni pritiski veliki in se hitro razvijejo iz ničnih pri $z = H$ do maksimalne vrednosti že na zgornji polovici višine stene. Pri ploskih rezervoarjih z nizkimi vrednostmi faktorja gama (γ) so impulzivni pritiski manjši in se počasneje razvijejo do maksimalne vrednosti.

Slika 9 prikazuje potek impulzivnih pritiskov po stenah rezervoarja ter po spodnji plošči. Impulzivni pritiski so osno simetrični. Na sliki 10 vidimo njihov potek v tlorisu.

Na grafikonu 3 so prikazani le pritiski na mestu, kjer so največji.

Konvekcijski pritiski

Konvekcijski pritiski upoštevajo vpliv valovanja. So prav tako osno simetrični kot impulzivni pritiski. Imajo maksimum in minimum v istih točkah kot impulzivni pritiski. Poznamo več oblik valovanja, vendar nas pri analizi zanima samo prva oblika valovanja, ki ustvarja največje pritiske. Vse ostale oblike so zanemarljivo majhne. Pri ploskih rezervoarjih (nizke vrednosti faktorja gama) je vpliv valovanja opazen po celi višini stene. Pri visokih in vitkih rezervoarjih je vpliv valovanja omejen le na zgornji del stene. Na spodnjem robu stene je vpliv valovanja nič.

Slika 11 prikazuje potek konvekcijskih pritiskov v prerezu. V tlorisu imajo konvekcijski pritiski enako obliko kot impulzivni pritiski na sliki 10.

Prikazujemo graf dejanskih impulzivnih pritiskov za obravnavani rezervoar. Na grafikonu 3 so prikazani le pritiski na mestu, kjer so največji.

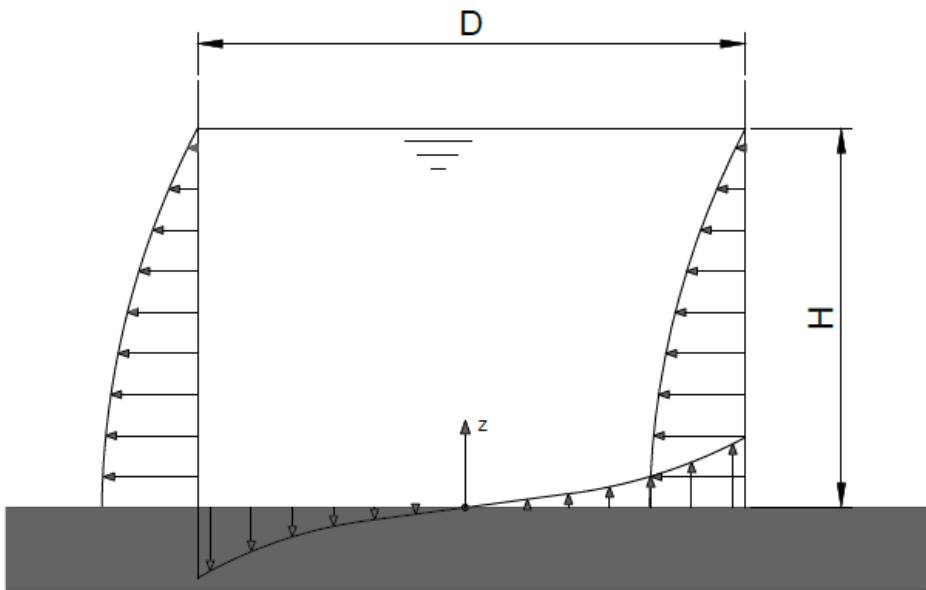
Konvekcijski pritiski formirajo rezultanto visoko na rezervoarju. Velika ročica glede na dno rezervoarja deluje neugodno za prevrnitev rezervoarja. Konvekcijske sile so razmeroma majhne, zato ne ustvarjajo velikega prevrnitvenega momenta.

Fleksibilni pritiski

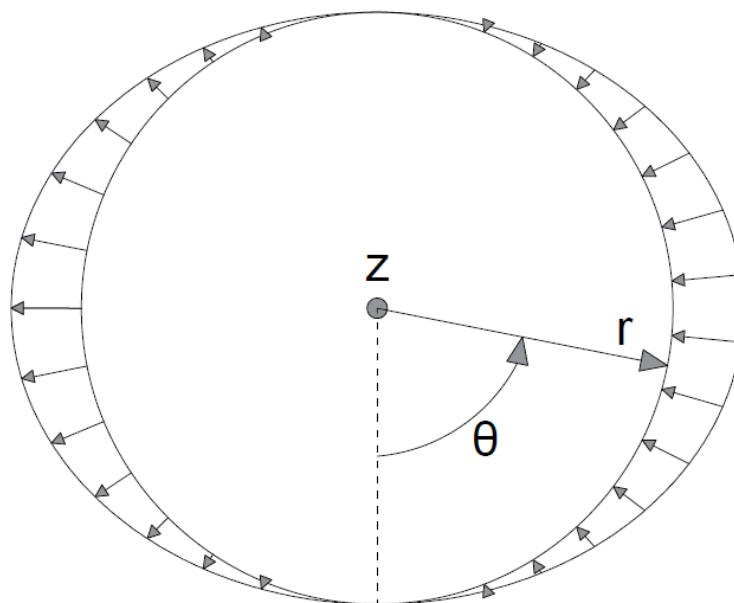
Oblika fleksibilnih pritiskov je odvisna od nihajne oblike rezervoarja, vendar ne moremo enolično določiti nihajne oblike sistema tekočina-rezervoar. Upoštevamo le nihajne oblike, ki izvirajo iz nihanja sistema z eno prostostno stopnjo [4, 1 in 3]. Za določitev fleksibilnih pritiskov uporabimo iteracijo, pri čemer v vsakem koraku spremenimo deformacijsko obliko rezervoarja glede na izračunane pritiske iz prejšnjega koraka. Za prvi korak lahko izberemo enostavno nihajno obliko. Iteracija je opisana v poglavju 2.

Fleksibilni pritiski imajo enako tlorisno obliko kot impulzivni in konvekcijski pritiski na sliki 10.

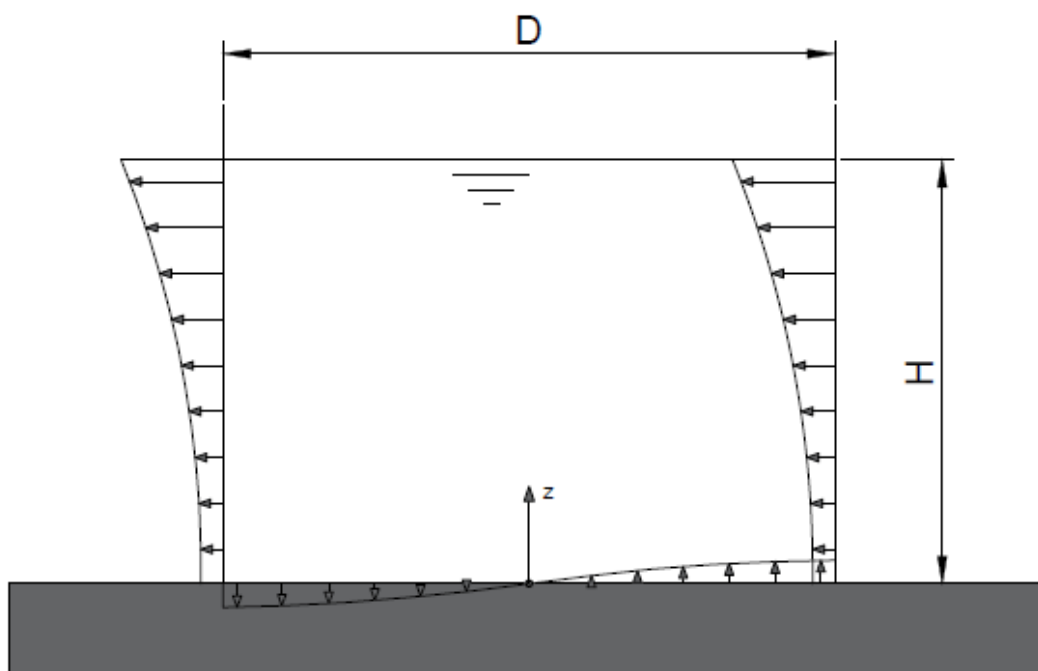
Razpored pritiskov po steni in dnu rezervoarja prikazujemo na sliki 12. Vrednotimo dejanske pritiske za obravnavani rezervoar. V zgornji polovici so pritiski večji in nato proti dnu rezervoarja upadajo. Rezultanta pritiskov se pojavi nekje na zgornji polovici višine rezervoarja. Iz rezultante pritiskov lahko določimo moment glede na točko na spodnjem robu rezervoarja. Fleksibilni pritiski delujejo najbolj neugodno za prevrnitev oziroma dvig spodnjega roba rezervoarja.



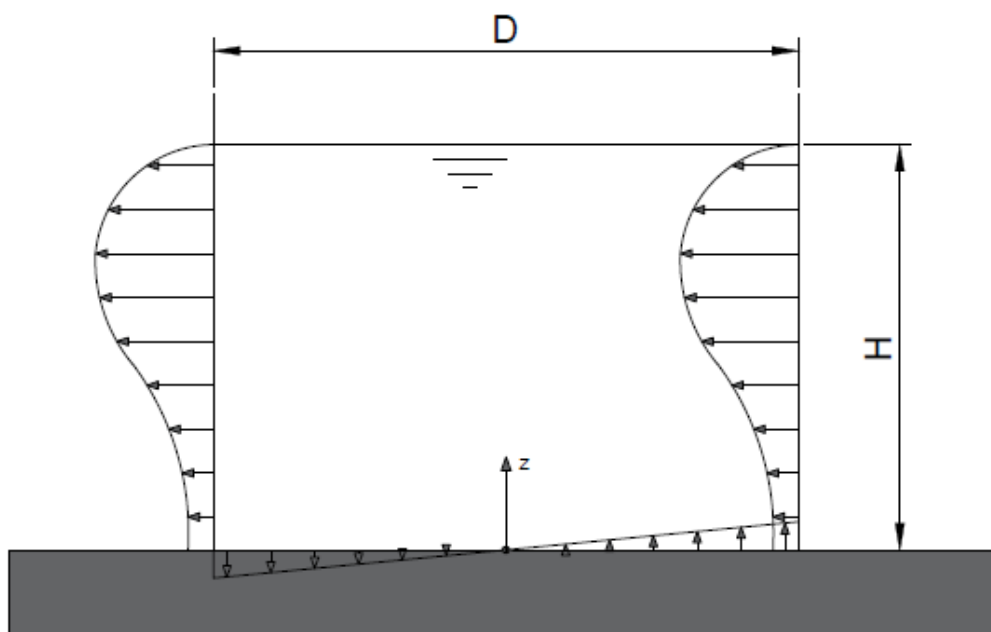
Slika 9: Impulzivni pritiski v prerezu, pri čemer je H višina polnjenja in D premer rezervoarja.



Slika 10: Oblika impulzivnih, konvekcijskih in fleksibilnih pritiskov v tlorisu.



Slika 11: Skica konvekcijskih pritiskov.

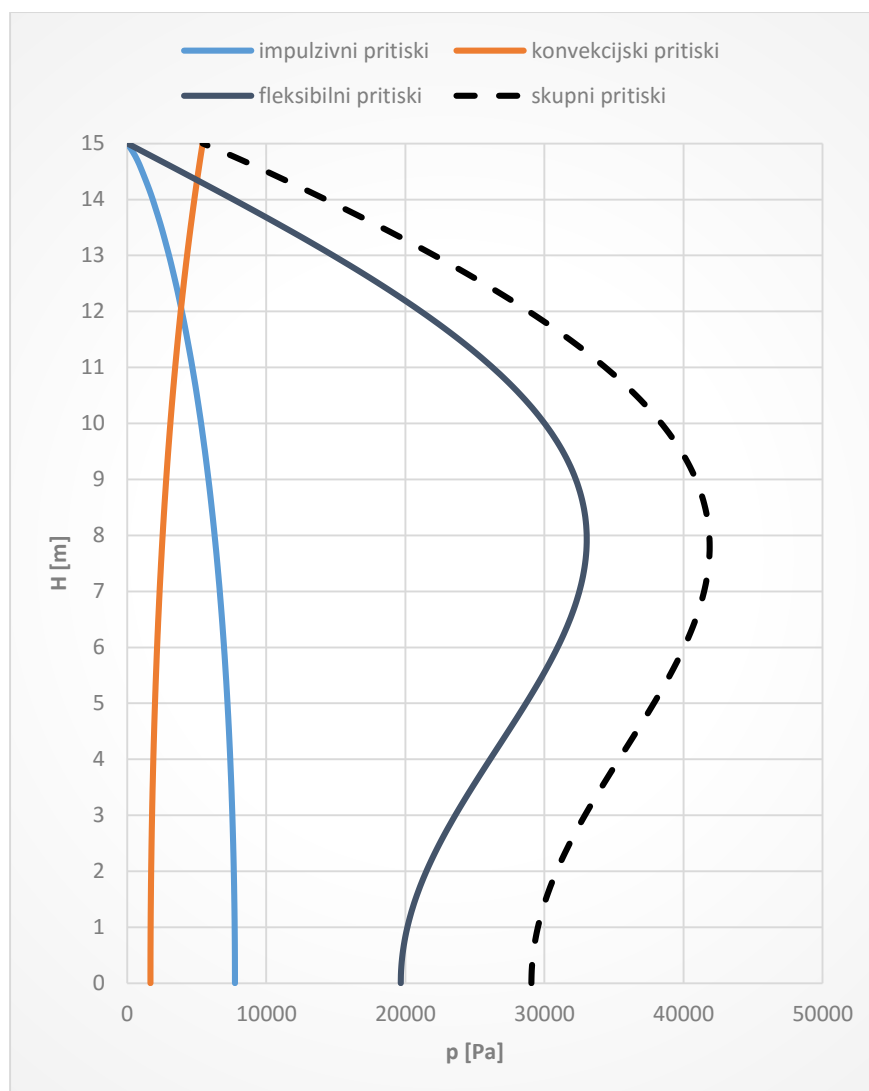


Slika 12: Skica fleksibilnih pritiskov.

Kombinacija pritiskov horizontalne komponente

Kombiniramo maksimume impulzivnih, konvekcijskih in fleksibilnih pritiskov, ki jih dobimo iz projektne spektra pospeškov. Vsi horizontalni pritiski so osnovani na modelu z eno prostostno stopnjo. Frekvence nihanja so različne za vse tri tipe pritiskov ter se pojavijo veliki razponi med frekvencami. Pritiskov natančno ne moremo kombinirati ravno zato, ker so

nihajni časi modela, s katerim opišemo pritiske, zelo različni. Evrokod 8 [1] navaja, da metoda SRSS kombiniranja maksimumov posameznih pritiskov v tem primeru ni dovolj natančna. Maksimume posameznih pritiskov kombiniramo z navadnim seštevanjem, čeprav ta način lahko vodi v zelo konzervativno oceno horizontalnih pritiskov. Grafikon 3 prikazuje posamezne pritiske za potres z maksimalnim pospeškom tal 0,25g. S črtkano črto je prikazan seštevek oziroma kombinacija fleksibilnih, konvekcijskih ter impulzivnih pritiskov, razporejenih po višini plašča rezervoarja. Na grafikonu 3 so prikazani pritiski na mestu, kjer so največji.



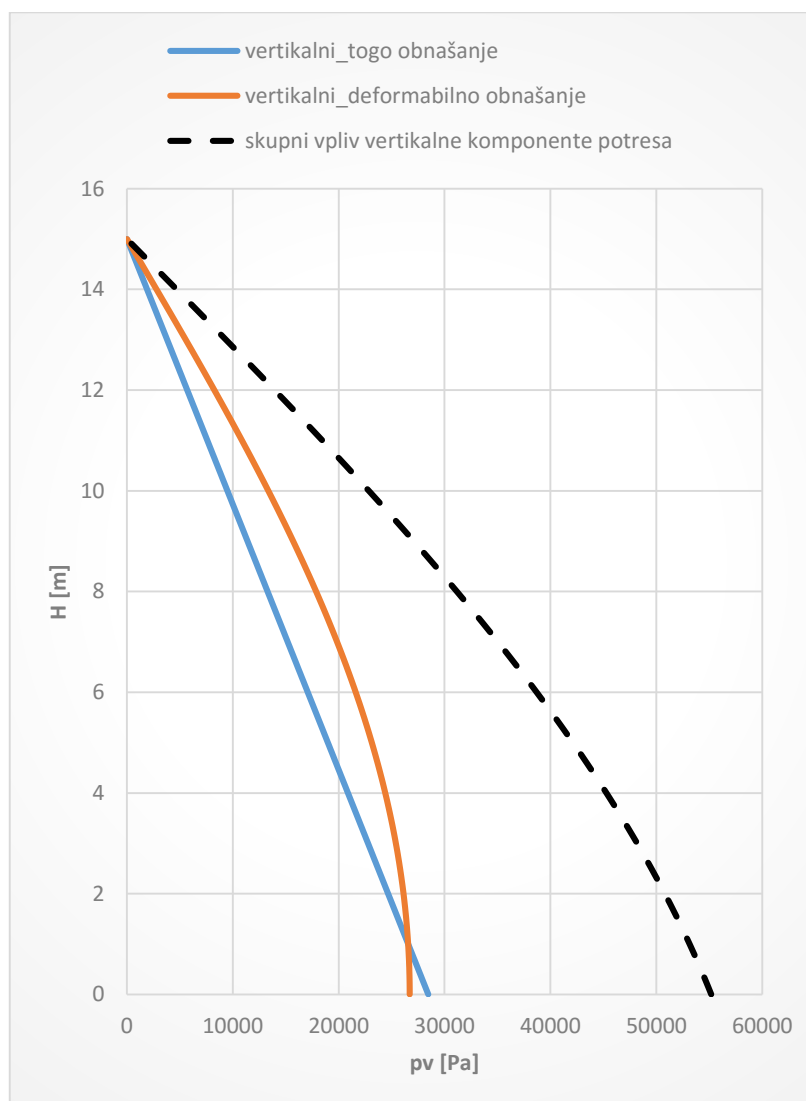
Grafikon 3: Pritiski na steno rezervoarja zaradi horizontalne komponente potresa.

4.3 Vertikalno vzbujanje rezervoarja

Vertikalno vzbujanje rezervoarja generira osno simetrične pritiske. Po obliki so enaki hidrostatičnim pritiskom, ki delujejo na stene rezervoarja. Ti pritiski ne ustvarjajo momenta in

zato delujejo stabilizacijsko glede na dvig spodnjega roba rezervoarja. V primeru togega in deformabilnega rezervoarja so pritiski na steno zaradi vertikalnega vzburjanja zelo podobni. Pritiske prištejemo k pritiskom, nastalim zaradi horizontalnega vzburjanja.

Grafikon 4 prikazuje pritiske, ki nastanejo kot posledica vertikalnega vzburjanja konstrukcije pri vertikalnem pospešku tal 0,225g. Pospešek tal v vertikalni smeri je vrednoten po priporočilih Evrokoda, in sicer na devetdeset odstotkov horizontalnega pospeška tal.



Grafikon 4: Potek pritiskov na steno rezervoarja zaradi vertikalne komponente potresa.

4.4 Kombinacija pritiskov zaradi vertikalne in horizontalne komponente potresa

Pritiske kombiniramo s preprostim seštevanjem. Pritiski so izračunani za vsako točko na plašču rezervoarja. Različni pritiski imajo v različnih točkah drugačne vrednosti pritiskov. V vsaki točki seštejemo pripadajoče vrednosti pritiskov.

Rammerstorfer [3] analizira dejanski potres v Furlaniji (Italija) iz leta 1976. Izračunani so pritiski vertikalne in horizontalne komponente potresa v smeri sever-jug. Pritiski so izračunani po metodi direktne integracije in so prikazani v odvisnosti od časa (trajanje potresa). Iz rezultatov lahko vidimo, da se maksimalni pritiski horizontalne in vertikalne komponente pojavijo istočasno. Lahko sklepamo, da bi kombinacija pritiskov po metodi SRSS podcenila dejanske vplive potresa. Pritiske, nastale zaradi horizontalnega in vertikalnega vzbujanja rezervoarja, zato kombiniramo z navadnim seštevanjem.

Pritiske lahko kombiniramo na različne načine glede na delovanje horizontalne in vertikalne komponente potresa.

- **Primer 1: $p_{stat} + p_H + p_V$**

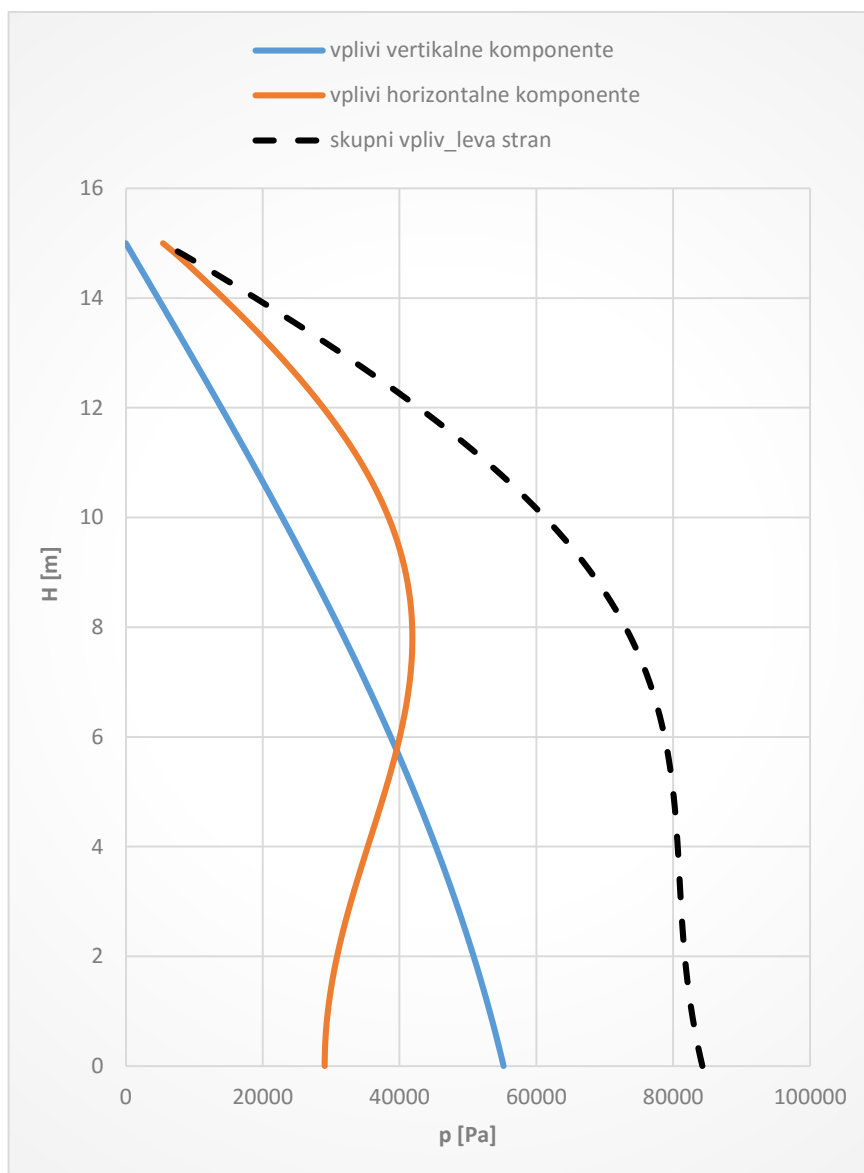
Seštejemo hidrostatične, horizontalne hidrodinamične in vertikalne hidrodinamične pritiske. Horizontalno in vertikalno potresno vzbujanje rezervoarja se pokrijeta tako, da se tvorijo največje obodne napetosti. Največkrat se zgodi plastična porušitev oziroma tvorjenje slonove noge na dnu rezervoarja ter dvig nasprotnega spodnjega roba.

- **Primer 2: $p_{stat} + p_H - p_V$**

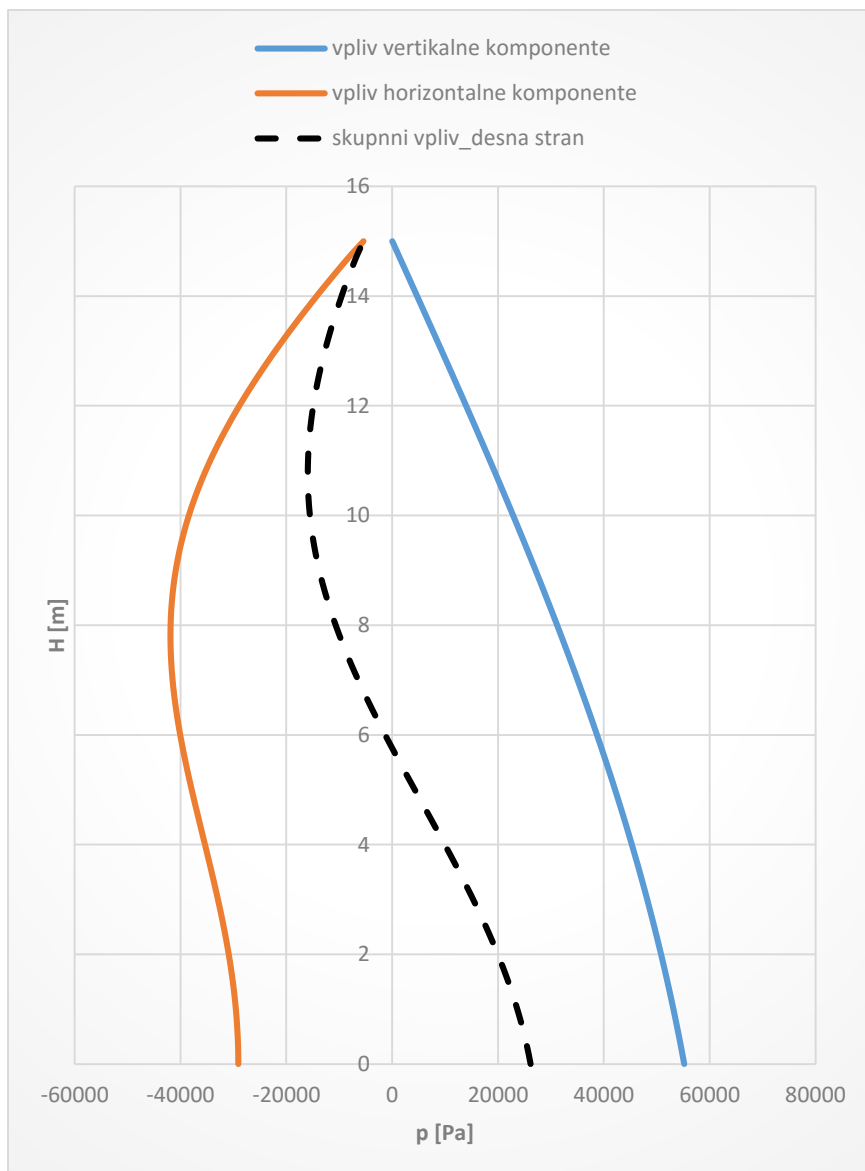
Seštejemo hidrostatične in horizontalne hidrodinamične pritiske. Odštejemo vertikalne hidrodinamične pritiske. Vertikalno potresno vzbujanje v tem primeru dviguje rezervoar oz. nasprotuje hidrostatičnim pritiskom. V tem primeru navadno ne pride do večjih deformacij oziroma ni velike nevarnosti porušitve. Rammerstorfer [3] navaja možnost lokalnega uklona.

V literaturi [3] je omenjena tretja možnost kombinacije pritiskov. V tej kombinaciji odštejemo horizontalno in vertikalno hidrodinamično obtežbo od hidrostatične. V obravnavanem primeru analiziramo cel rezervoar in nanj nanesimo celotne pritiske, ki delujejo na plašč. Ker so horizontalni vplivi enosno simetrični in so si v drugi osi enaki ter nasprotni, pokrijemo vse tri kombinacije z zgoraj omenjenima dvema kombinacijama.

Grafikona 5 in 6 prikazujeta kombinacijo pritiskov za primer 1 zaradi delovanja potresa v vertikalni ter v horizontalni smeri. Pritiski zaradi vertikalne komponente potresa so simetrični v nasprotju s pritiski, ki nastanejo zaradi horizontalnega vzbujanja rezervoarja. Ti so si nasprotno enaki. Zaradi tega nastanejo različni seštevki pritiskov na »levi« in »desni« strani rezervoarja.



Grafikon 5: Kombinacija pritiskov zaradi vertikalne in horizontalne komponente potresa na "levi" strani rezervoarja.



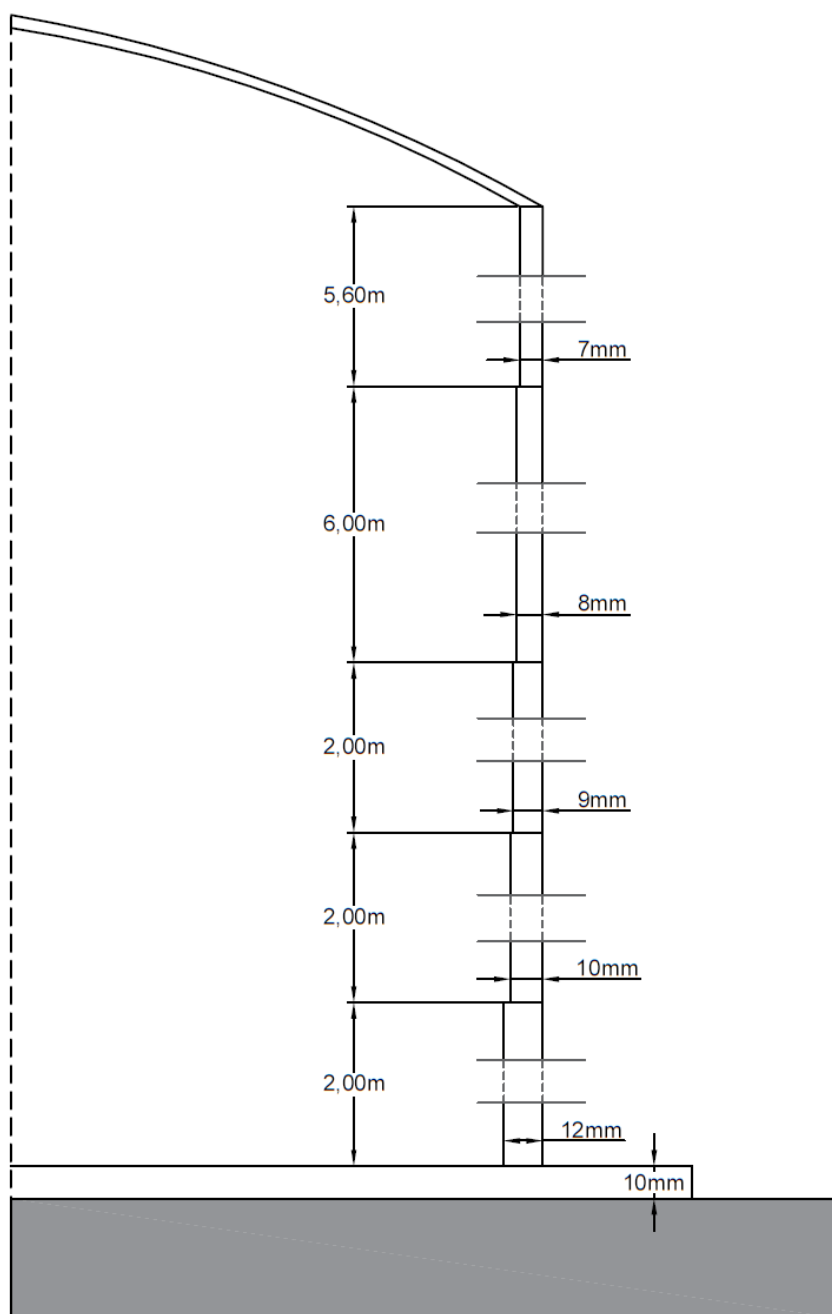
Grafikon 6: Kombinacija pritiskov zaradi vertikalne in horizontalne komponente potresa na "desni" strani rezervoarja.

5 PRIMER ANALIZE REZERVOARJA NA POTRESNO OBTEŽBO

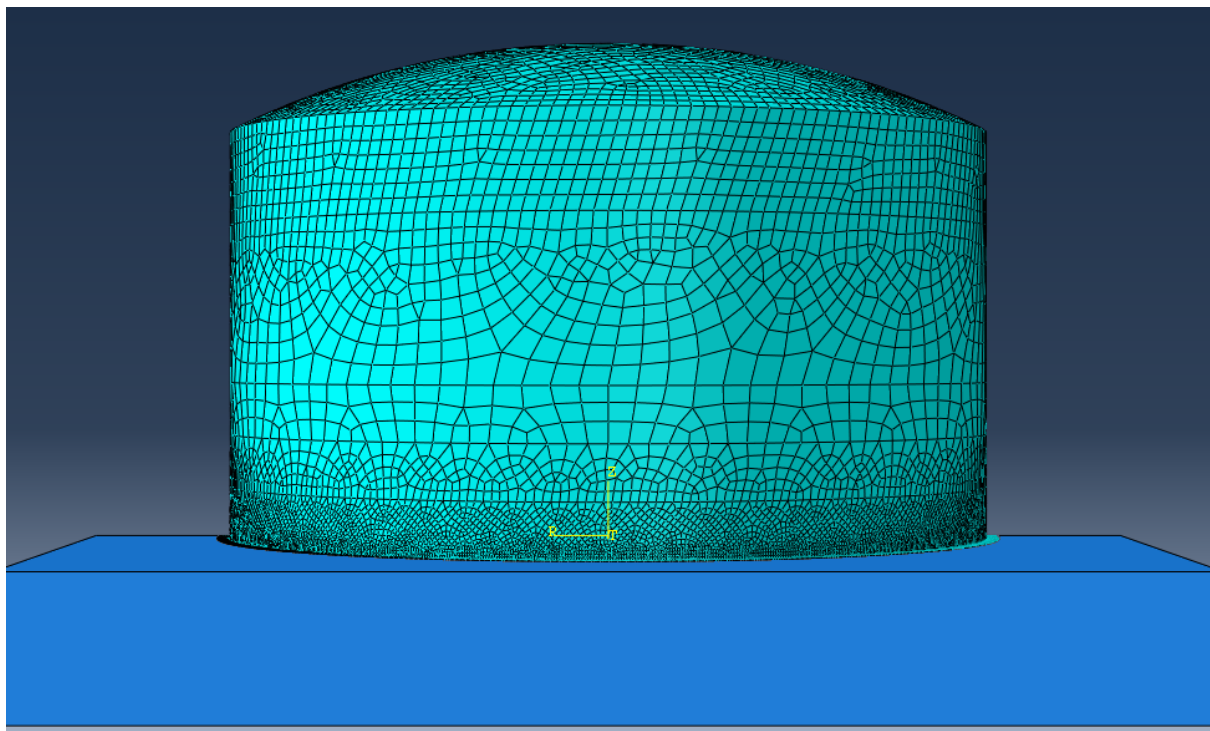
Za analizo rezervoarja smo uporabili predlagane postopke v Evrokod 8 [1], poglavje 4. Z enačbami iz standarda [1] vrednotimo pritiske, nastale zaradi delovanja potresa. Pritiski delujejo na stene in dno rezervoarja. Izračunane vrednosti pritiskov nato uporabimo za analizo rezervoarja s programsko opremo Abaqus [17, 18 in 19]. V programu Abaqus modeliramo obravnavani rezervoar, mu predpišemo ustrezne robne pogoje (podpora rezervoarja) in obtežbo. Za obtežbo rezervoarja uporabimo lastno težo in izračunane pritiske v poglavju 4. V poglavju 5 podrobneje opišemo numerični model rezervoarja, vnos obtežbe ter robne pogoje (podpora rezervoarja).

5.1 Opis rezervoarja

Obravnavamo tankostenski jekleni cilindrični rezervoar [11]. Cilinder je sestavljen iz petih obročev različne debeline. Narejen je v celoti iz jekla S355. Streha rezervoarja je kupolasta in je narejena iz aluminija. Cilinder je varjen na jekleno dno. Rezervoar je nato postavljen na betonsko podlago, kjer je koeficient trenja med jeklenim dnom in betonsko podlago $k_t = 0,45$. Cilinder je visok 15,6 m ter ima maksimalno višino polnjenja 15 m. Prerez rezervoarja in njegove dimenzije so prikazane na sliki 13. Slika 14 prikazuje mrežo končnih elementov v programu Abaqus.



Slika 13: Prečni prerez rezervoarja z dimenzijami. Prikazana je $\frac{1}{2}$ rezervoarja.

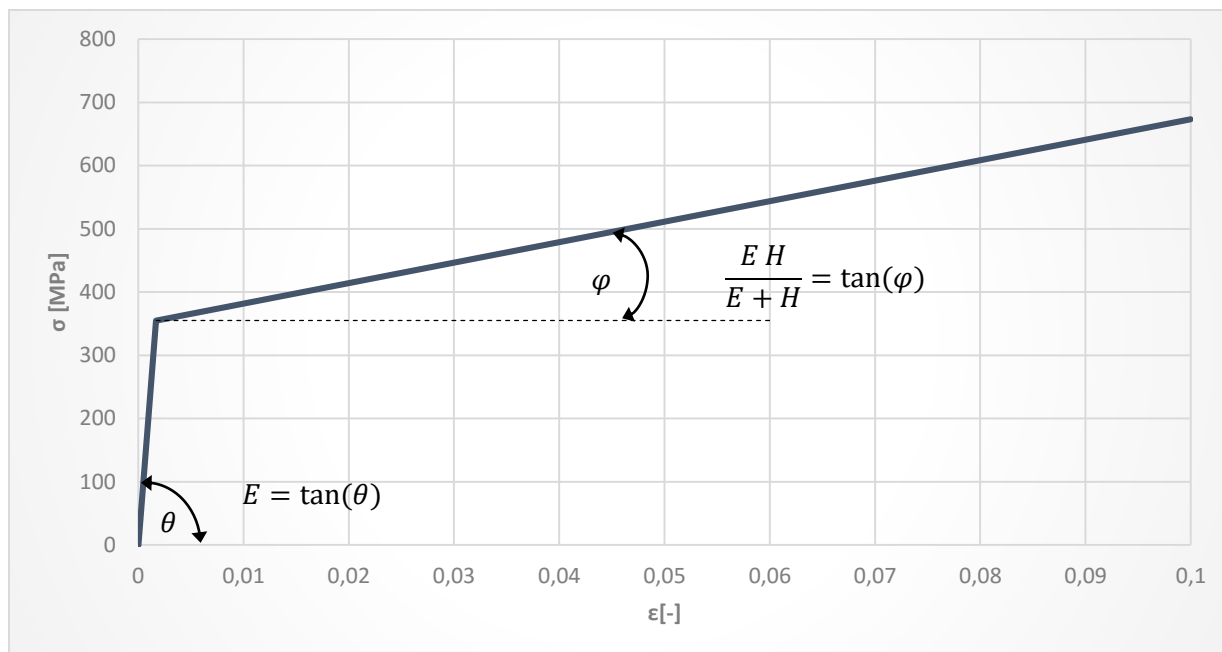


Slika 14: Mreže končnih elementov.

5.2 Materialni model

Pri analizi uporabimo za jeklo elasto-plastični bilinearni materialni model z izotropnim utrjevanjem. Modul utrjevanje je $H = E/65$, pri čemer je E elastični modul. Modul elastičnosti jekla znaša $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$. Poissonov količnik jekla znaša $\nu = 0,3$. Uporabimo jeklo kvalitete S355, kjer znaša napetost na meji elastičnosti $f_y = 355 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Na podlagi zveze $H = E/65$ izračunamo modul utrjevanja H ter napetost jekla pri desetodstotnem raztežku. V spodnjem grafikonu prikazujemo enoosni napetostno-deformacijski diagram modeliranega jekla.



Grafikon 7: Bilinearni materialni model jekla.

Abaqus [17, 18 in 19] zahteva dejanske napetosti ter dejanske raztezke jekla pri podajanju enoosnega napetostno-deformacijskega diagrama, ki upošteva zmanjšanje preseka jeklene palice pri nateznem preizkusu. Z enačbami od (5.1) do (5.4) spremenimo enoosni napetostno-deformacijski diagram v diagram dejanskih napetosti in deformacij. S pomočjo teh enačb pretvorimo bilinearni diagram, kot je prikazan na grafikonu 7, v diagram, kot ga zahteva program Abaqus. V preglednici 3 so navedene izračunane vrednosti dejanskih deformacij in dejanskih napetosti. Vrednosti iz tabele vnesemo v program Abaqus. Na sliki 15 prikazujemo prikazno okno programa Abaqus za vnos materialnega modela.

$$\sigma_{tru} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (5.1)$$

$$\epsilon_{tru} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad (5.2)$$

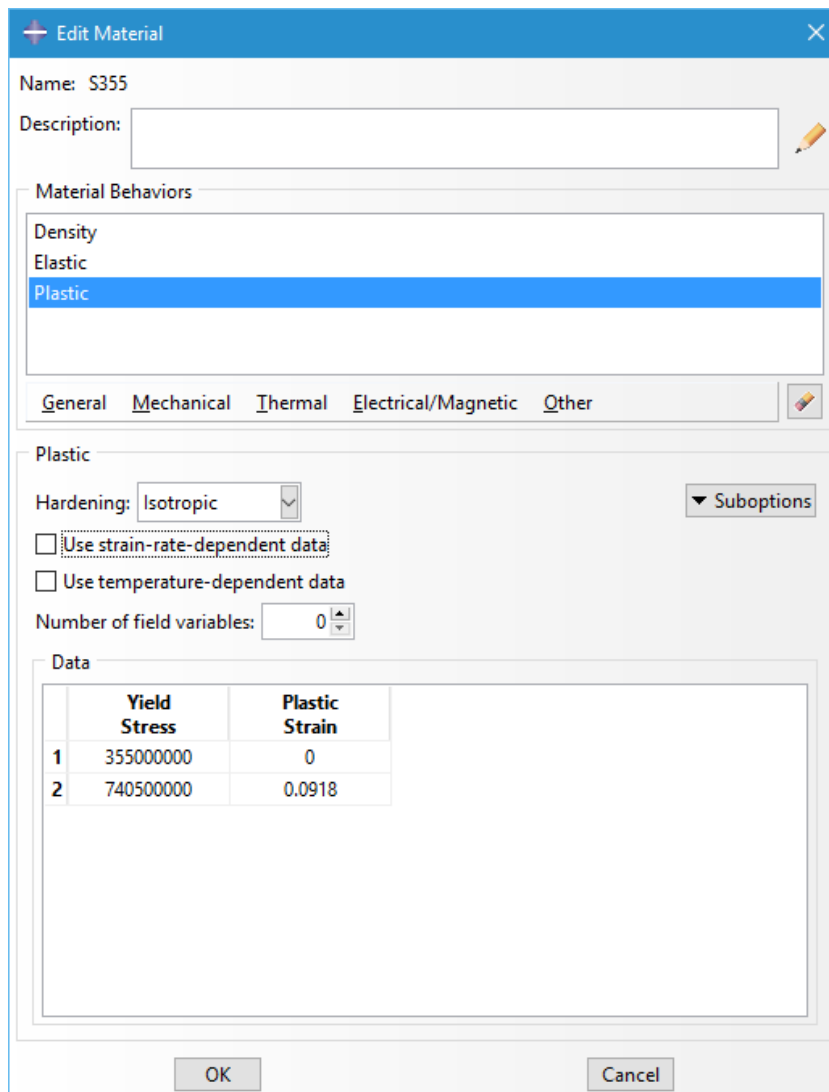
$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{tru} - \frac{\sigma_{tru}}{E} \quad (5.3)$$

$$E = \frac{\sigma_{tru}}{\epsilon_{tru}} \quad (5.4)$$

Pri tem je σ_{tru} napetost, ki je vrednotena na dejanski prečni prerez. σ_{nom} je napetost, ki ne upošteva dejanskega deformiranega preseka, temveč začetni nedeformiran prerez. ϵ_{tru} je deformacija merjena na deformirano dolžino elementa. ϵ_{nom} je deformacija, vrednotena na začetno nedeformirano dolžino elementa. ϵ_{pl} je deformacija v coni plastičnosti jekla, ki je vrednotena glede na dejanske deformacije in napetosti.

Preglednica 3: Dejanske napetosti in deformacije za jeklo S355.

| σ_{tru} [MPa] | ϵ_{pl} [-] |
|----------------------|---------------------|
| 0 | 0 |
| 355,6 | 0 |
| 740,5 | 0,0918 |



Slika 15: Prikazno okno programa Abaqus za vnos materialnega modela.

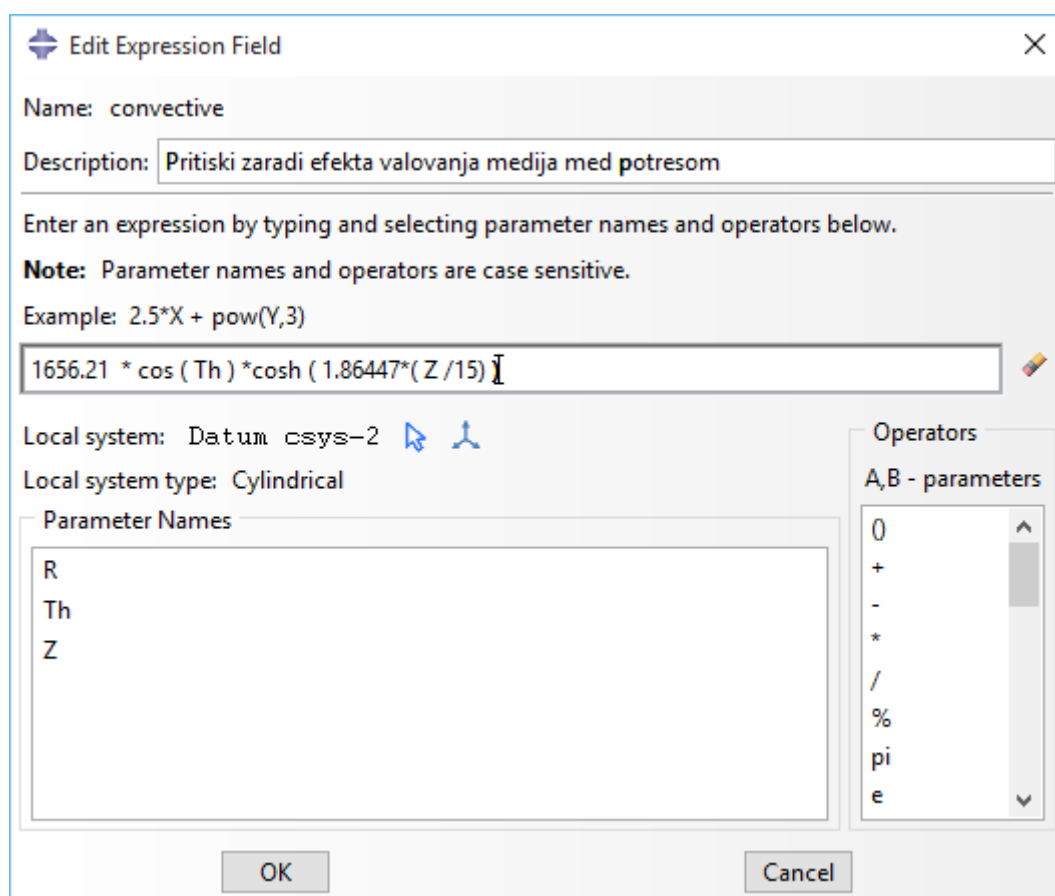
5.3 Obtežba

Pritiske na cilinder vnašamo na zunanjo površino plašča rezervoarja. Pritiski so vrednoteni v cilindričnem koordinatnem sistemu, zato je potrebno v modelu določiti cilindrični koordinatni sistem na isto izhodišče, kot je predpostavljeno v računu pritiskov. Izhodiščna točka koordinatnega sistema je na dnu rezervoarja na sredini krožne plošče. Os z cilindričnega

koordinatnega sistema sovпада z osjo z globalnega koordinatnega sistema. Os r je postavljena na os x globalnega koordinatnega sistema.

Vplivi na cilindar se spreminjajo po višini in po obodu plašča. Pritiske vnašamo v model s pomočjo orodja »Analytical Field«, kjer vnesemo enačbo v odvisnosti od koordinatnih osi lokalnega cilindričnega koordinatnega sistema. Na sliki 16 prikazujemo prikazno okno za urejanje enačbe poteka konvekcijskih pritiskov. Obtežba je na modelu definirana kot pritisk na plašč rezervoarja. Za vrsto pritiskov izberemo vnaprej definirane oblike pritiskov, ki smo jih določili s pomočjo orodja »Analytical Field«.

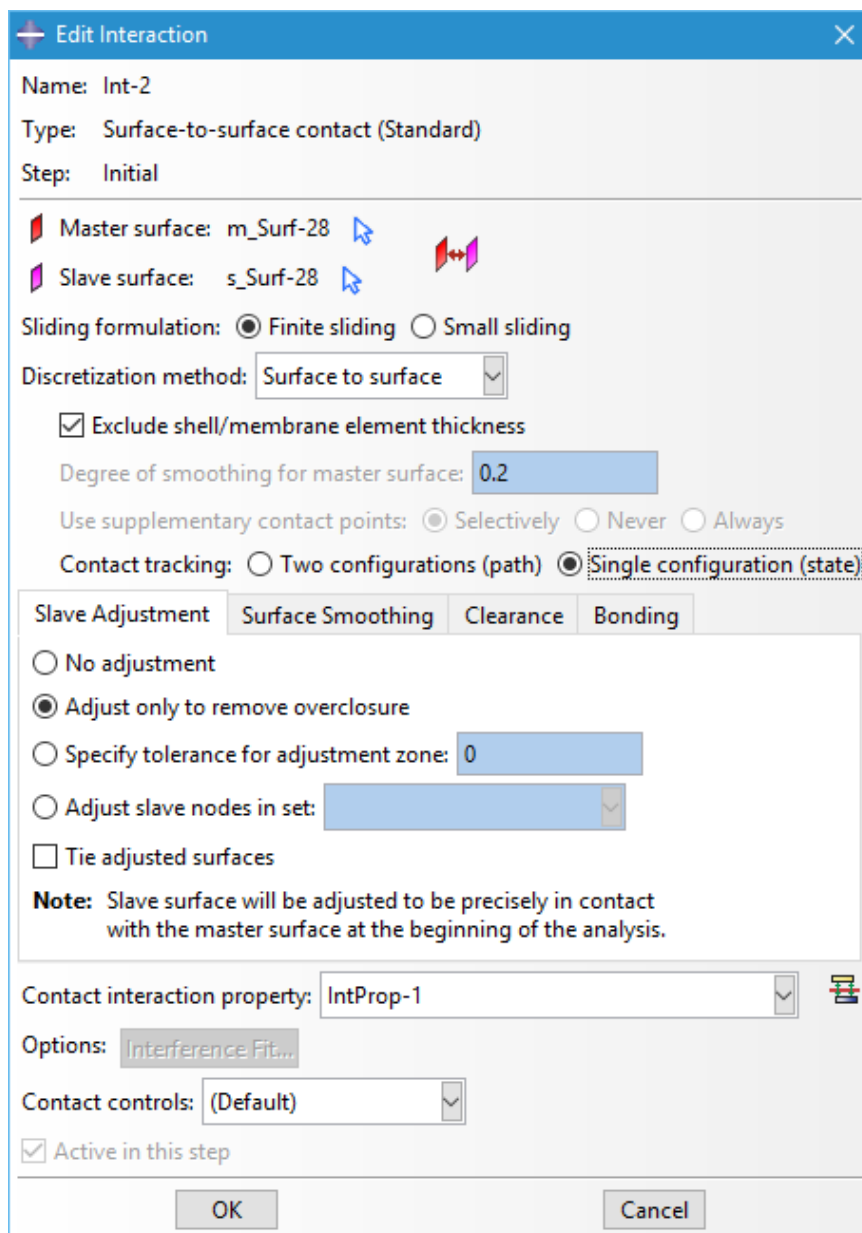
Vplive na konstrukcijo razdelimo na posamezne pritiske. Posebej definiramo hidrostatske, impulzivne, konvekcijske in fleksibilne pritiske ter pritiske zaradi delovanja potresa v vertikalni smeri. Nanesemo pritiske, ki smo jih izračunali v poglavju 4. Poleg hidrostatskih in hidrodinamičnih pritiskov na rezervoar nanesemo še vpliv gravitacije ter obtežbo kupolaste strehe rezervoarja. Streha rezervoarja je na rezervoar montirana tako, da se na cilindar rezervoarja prenesejo le vertikalne tlačne sile. Obtežbo strehe v modelu nanesemo točkovno, in sicer na vsak meter po celi liniji stika strehe in cilindra.



Slika 16: Prikazno okno za vnos enačbe pritiskov.

5.4 Podpore

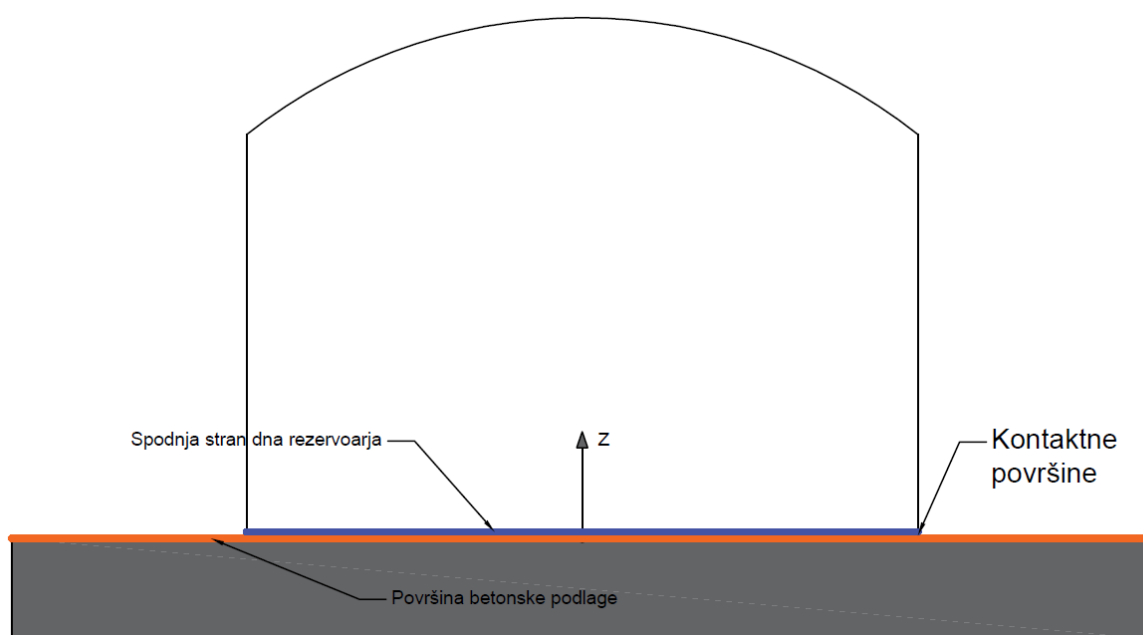
Rezervoar je postavljen na betonsko podlago brez sidranja. Podpore definiramo s pomočjo kontakta med posameznimi deli modela. Definiramo togo podlago, na katero postavimo rezervoar. Za podporo modeliramo kontakt med togim telesom (podlago) in dnom rezervoarja. Kontaktu predpišemo obnašanje v normalni in v tangentsni smeri. V normalni smeri predpišemo tog kontakt v tlaku ter možnost odlepitve, ko pride do nateznih sil. Podlaga preprečuje posedanje in dovoljuje dvig rezervoarja od tal. V tangentsni smeri predpišemo trenje, ki simulira stik med betonom in jeklom. Na sliki 17 je prikazano podokno, kjer urejamo lastnosti kontakta med dvema površinama v programu Abaqus. Slika 18 shematsko prikazuje kontakt med togo podlago in rezervoarjem.



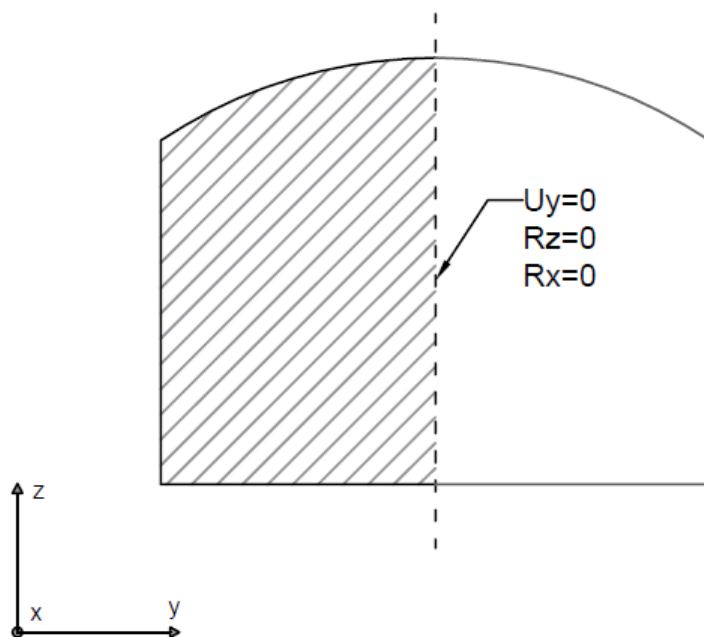
Slika 17: Prikazno okno za urejanje kontakta med dvema površinama.

Togo telo (podlago) podpremo nepomično.

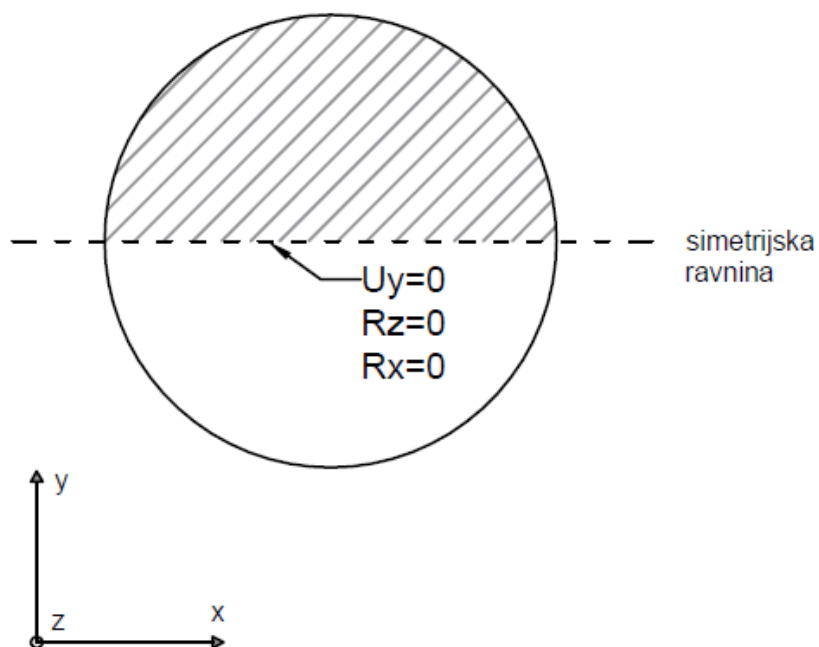
Zaradi simetrije konstrukcije in obtežbe rezervoar razrežemo na polovico. Analiziramo le polovico rezervoarja. Na simetrijski ravnini podpremo telo tako, da simuliramo vpliv druge polovice rezervoarja. Preprečimo rotiranje konstrukcije okoli navpične osi ($R_z = 0$) in rotiranje okoli osi x ($R_x = 0$), kateri je vzporedna simetrijska ravnina. Preprečen je pomik izven simetrijske ravnine ($U_y = 0$). Sliki 19 in 20 shematsko prikazujeta polovico rezervoarja ter robne pogoje.



Slika 18: Shema kontaktne površine med rezervoarjem in togo podlago.



Slika 19: Shema polovice rezervoarja v prerezu in simetrijski robni pogoji.

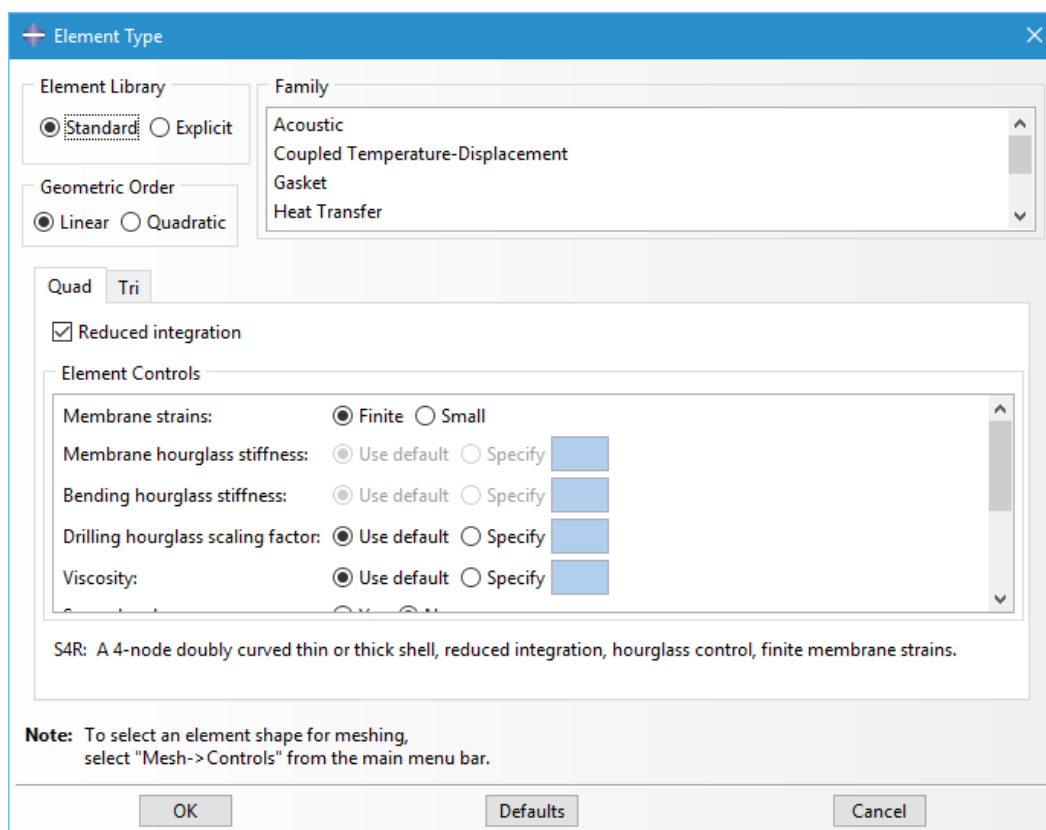


Slika 20: Shema polovice rezervoarja v tlorisu in simetrijski robni pogoji.

5.5 Analiza

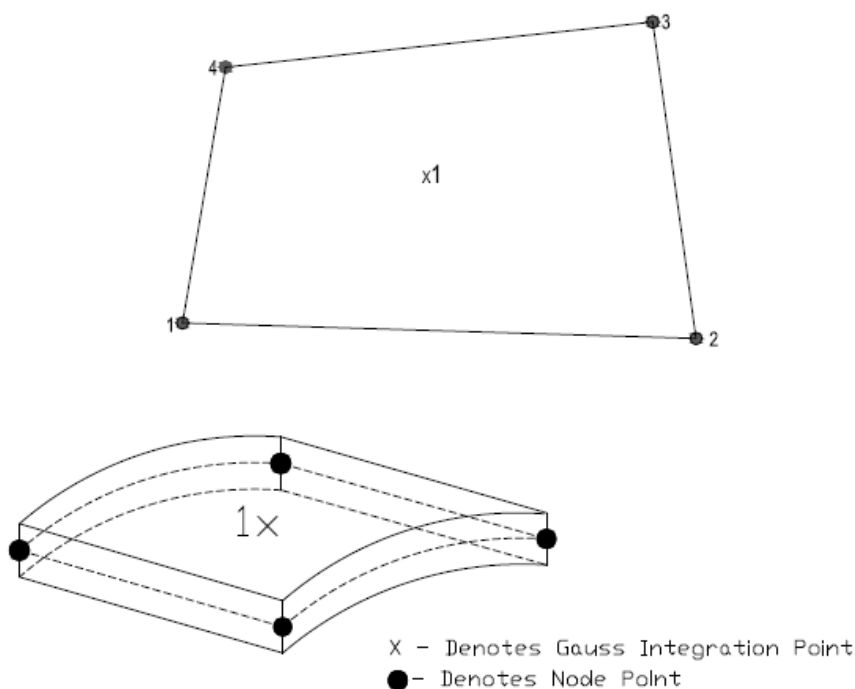
Za modeliranje rezervoarja uporabimo lupinaste končne elemente. Slednje navadno uporabljamo pri konstrukcijah, kjer je ena dimenzija (debelina) občutno manjša od ostalih dimenzij.

Uporabimo končni element S4R, kar pomeni štirivozliščni lupinast končni element z reducirano integracijo. Reducirana integracija pomeni, da ima element le eno integracijsko točko. S4R element je na sliki 22. Preostale lastnosti elementa so nastavljene za večnamensko uporabo končnega elementa. Takšna nastavitve končnega elementa je privzeta v programu. Privzete nastavitve programa so razvidne na sliki 21, kjer je prikazano podokno za nastavitve končnega elementa.



Slika 21: Podokno za določitev lastnosti KE.

Za togo podlago rezervoarja uporabimo analitično togo element. Element se ne deformira. Gibanje elementa predpišemo s pomočjo referenčne točke, ki je v našem primeru definirana kot nepomična. To pomeni, da predpisani robni pogoji na referenčni točki veljajo za cel analitično togo element (podlaga rezervoarja). Računsko so togi elementi manj zahtevni in tako hitrejši kot deformabilni elementi s predpisano veliko togostjo, ki bi simulirala podlago rezervoarja.



Slika 22: S4R končni element.

Pri analizi upoštevamo možnost velikih deformacij zaradi nevarnosti uklona in zato upoštevamo geometrijsko nelinearnost. Upoštevanje geometrijske nelinearnosti med analizo določimo v programu Abaqus, ko izbiramo način analize.

Pojav analiziramo v dveh korakih. V prvem koraku računamo vpliv hidrostatične obtežbe in lastne teže. Prvi korak analiziramo s pomočjo postopka »Static General«. V drugem koraku analiziramo potresne vplive na rezervoar. Uporabljamo postopek »Static Riks«. V primeru potresne obtežbe obstaja možnost uklona konstrukcije. Pri uklonu pride do pojava nestabilnosti konstrukcije. V tem primeru navadna statična analiza odpove, medtem ko je modificirana Riksova metoda, ki jo ponuja program Abaqus, namenjena za analize uklonskih problemov.

Analiziramo najbolj neugodno kombinacijo pritiskov potresne obtežbe, tj. ko deluje vertikalna komponenta potresa v isti smeri kot hidrostatična. Taka kombinacija pritiskov daje največje pritiske na steno rezervoarja. Enačba (5.5) opisuje seštevek obtežb, ki delujejo na rezervoar. Vpeljemo faktor λ , ki povečuje obtežbo pri Riksovi metodi, tj. v drugem koraku analize. Rezultati prvega koraka analize se ohranijo in prenesejo v naslednji korak, vendar se ti vplivi v drugem koraku ne spreminjajo več. V drugem koraku analize se povečuje faktor λ od 0 do 1. Pri vrednosti $\lambda = 0$ so pritiski od potresne obtežbe enaki nič ter pri vrednosti faktorja $\lambda = 1$

so pritiski enaki vrednostim, ki jih daje maksimalni pospešek tal $a_{g, max} = 1g$. Faktor λ spreminja vrednost pospeška tal v enačbah pritiskov. V programu so pod obtežbo vnesene enačbe pritiskov v vrednosti pospeška tal $a_{g, max} = 1g$. Potek analize je tako zapisan z enačbo (5.6). Razmerja horizontalnega in vertikalnega pospeška tal $\frac{a_v}{a_h}$ ne spreminjamo.

Določimo vrednost vertikalnega pospeška na devetdeset odstotkov horizontalnega pospeška.

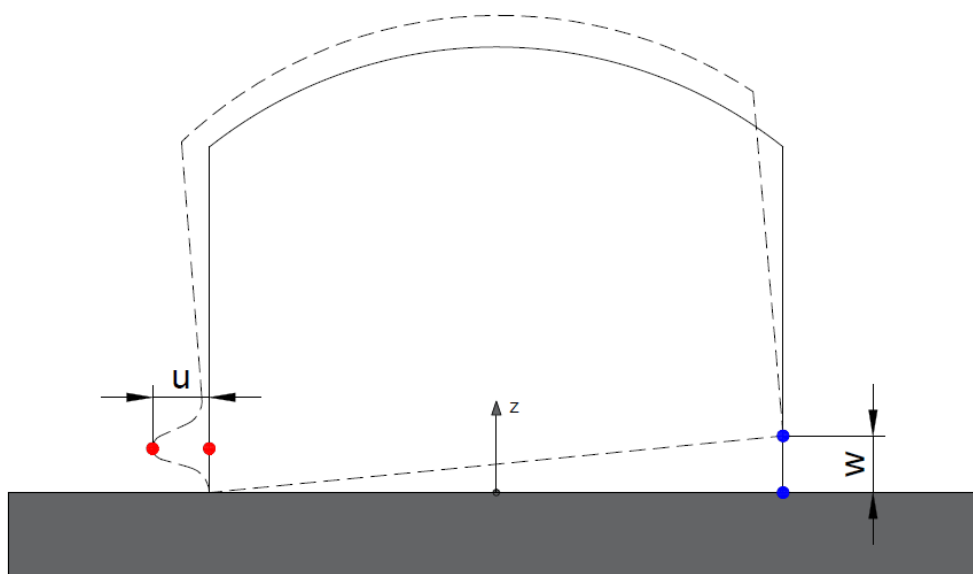
$$p(\theta, z) = p_{hs}(z) + p_h(\theta, z) + p_v(z) \quad (5.5)$$

$$p = \underbrace{p_{hs}}_{\text{Statična}} + \lambda \underbrace{\left(p_h + \frac{a_v}{a_h} p_v \right)}_{\text{Riks}} \quad (5.6)$$

Pri tem je p_{hs} hidrostatična obtežba, p_v pritiski zaradi vertikalnega vzbujanja rezervoarja med potresom ter p_h so pritiski, nastali zaradi horizontalnega vzbujanja rezervoarja. Faktor λ v enačbi (5.6) predstavlja horizontalni pospešek tal a_h .

6 REZULTATI

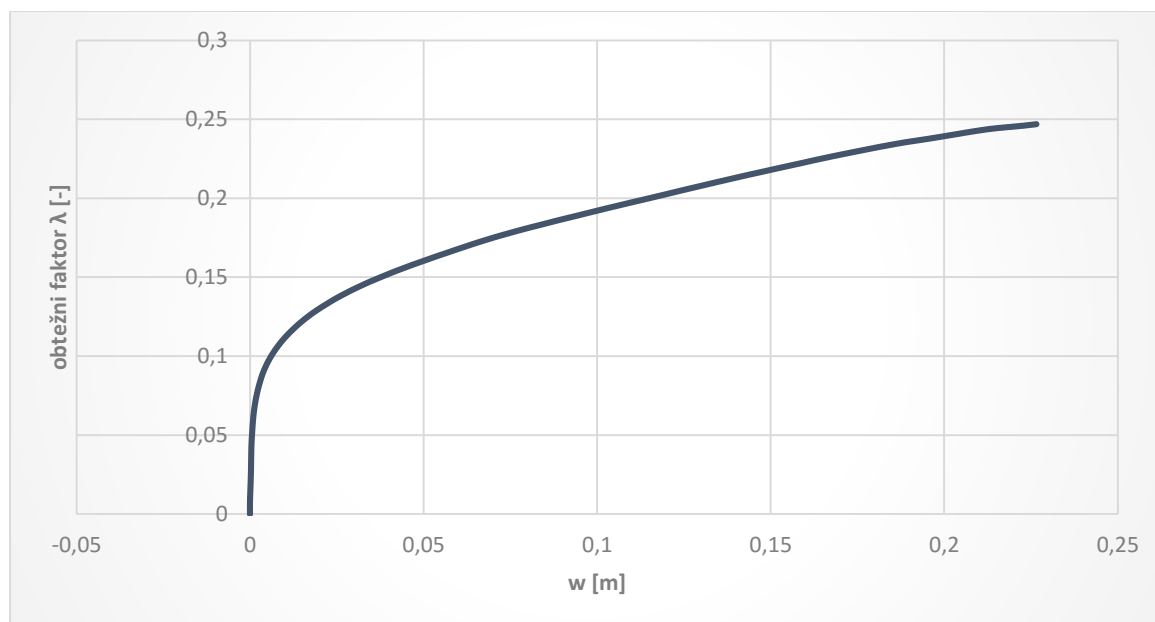
Rezultat te analize pokaže tvorbo izbokline pri dnu rezervoarja na eni strani ter dvig dna rezervoarja na drugi strani. Izboklina na dnu rezervoarja se tvori zaradi pojava uklona na steni rezervoarja. Do uklona pride zaradi tlačne sile, ki izhaja iz prevrnitvenega momenta. Pojav izbokline je tudi posledica velikih nateznih obodnih napetosti, ki so posledica hidrostatičnih in hidrodinamičnih pritiskov. Med analizo spremljamo pomik različnih točk na rezervoarju. Dve točki, ki ju spremljamo med analizo, sta prikazani na sliki 23.



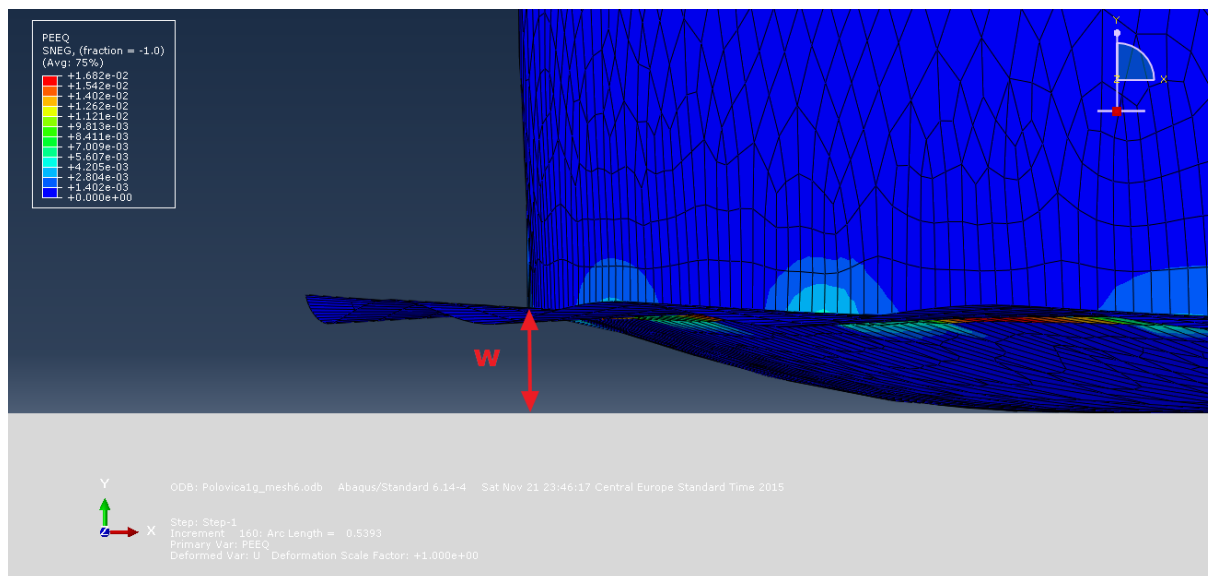
Slika 23: Shematski prikaz dveh točk, ki ju spremljamo med analizo.

Spremljamo spodnjo točko na rezervoarju, kjer pride do dviga. V tej točki beležimo vertikalne pomike. Na grafikonu 8 je prikazana krivulja vertikalnega pomika točke, kjer je dvig največji. Krivulja prikazuje minimalne vertikalne pomike do vrednosti pospeška tal $a_{g, max} = 0,1g$. Od $0,1g$ do $0,25g$ se začne rezervoar hitreje dvigovati. Sklepamo, da so od velikosti potresa $0,1g$ dalje vplivi pritiskov zaradi horizontalnega potresa, ki delujejo na prevrnitev rezervoarja, večji od vpliva hidrostatičnih pritiskov ter pritiskov zaradi vertikalnega potresa, ki potiskajo rezervoar proti tlom. V začetnem delu krivulje zabeležimo negativen vertikalni pomik. Rezervoar se v prvem koraku analize, kjer na rezervoar delujeta hidrostatična obtežba in teža rezervoarja, nekoliko posede. Posedek se zgodi zaradi predpisanih lastnosti stika med dnom rezervoarja in togo podlago. V vertikalni smeri je predpisana velika togost stika, ne pa neskončno velika togost. Zaradi tega pride do majhnega posedka rezervoarja in tako zabeležimo negativen vertikalni pomik.

Pri dvigu spodnjega roba pride do ukrivljenja spodnje jeklene plošče rezervoarja. Na mestu stika med steno in dnom rezervoarja pride do plastifikacije materiala. Druga cona plastifikacije materiala se tvori na mestu, kjer se plošča odcepi od tal. Ta cona se tvori kasneje pri večjih vrednostih potresne obtežbe. Slika 24 prikazuje dvig spodnjega roba rezervoarja na analiziranem modelu (pomiki niso povečani).



Grafikon 8: Dvig spodnjega roba rezervoarja.

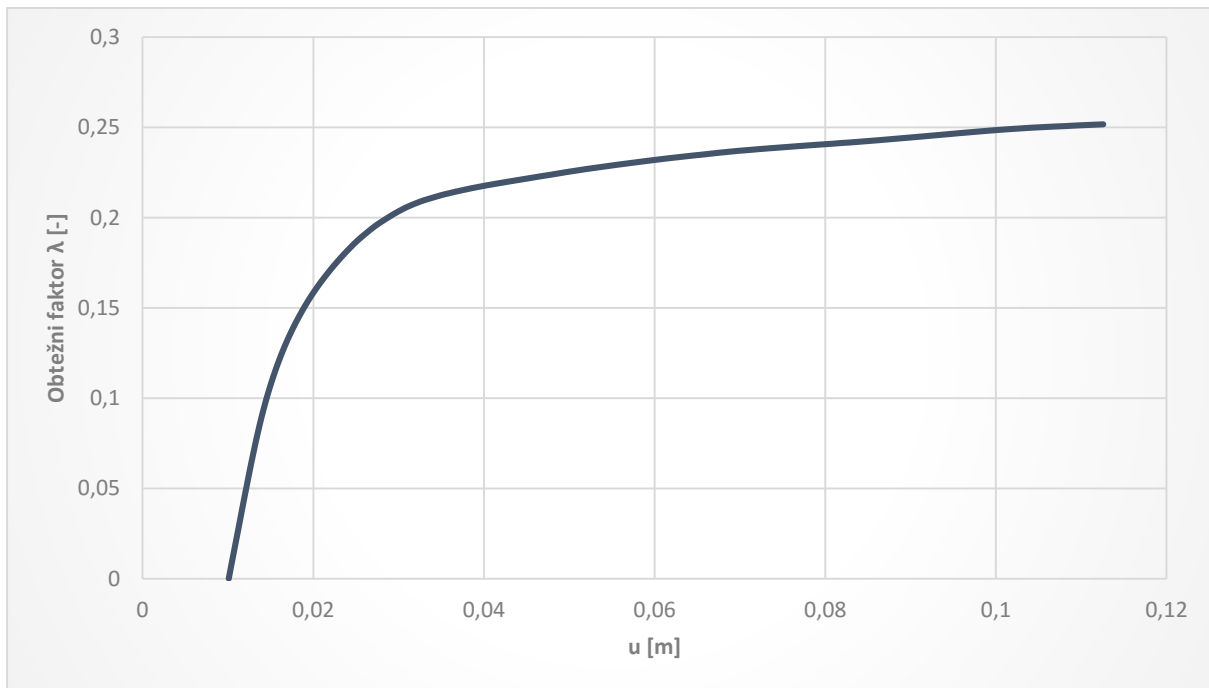


Slika 24: Dvig (w) spodnjega roba.

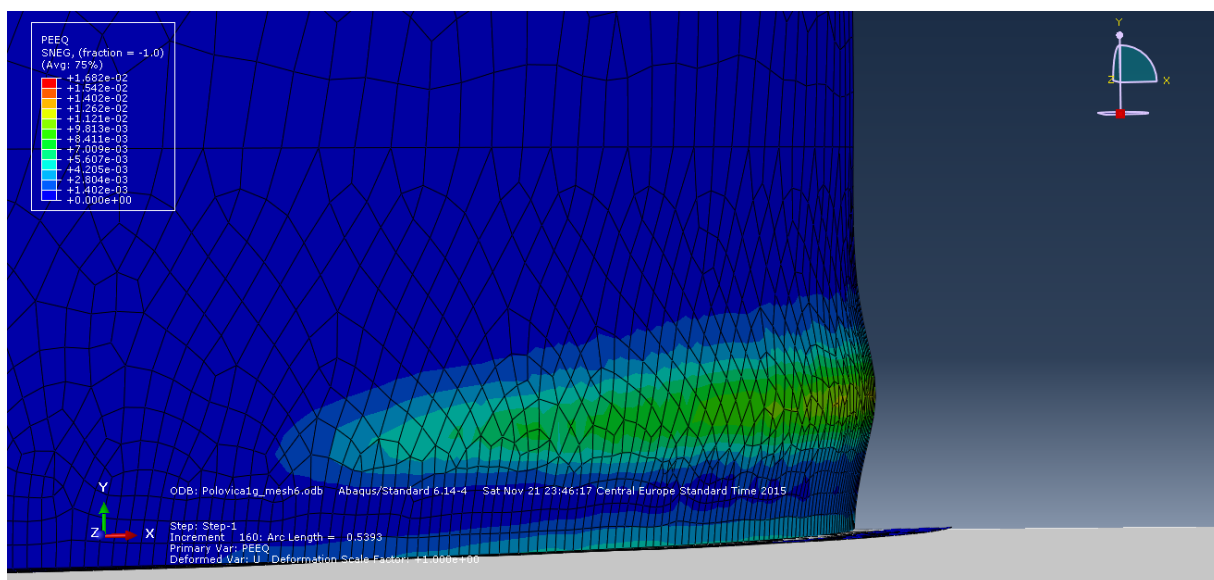
Naslednja točka, ki jo spremljamo med analizo, se nahaja na steni rezervoarja na mestu, kjer nastane izboklina oz. »slonova noga«. V tej točki spremljamo pomike izven ravnine plašča. Na grafikonu 9 je prikazana krivulja pomika točke.

Na mestu, kjer se zgodi izboklina, opazimo manjšo deformacijo že v začetnem delu analize. Ta se zgodi v prvem koraku analize, ko analiziramo hidrostatsično obtežbo in lastno težo konstrukcije. Pri hidrostatsični obtežbi se rezervoar na dnu nekoliko raztegne in tako zabeležimo pomik izven ravnine v velikosti 1 cm. Krivuljo pomika začnemo risati v drugem koraku analize, ko je rezervoar obtežen s potresnim vplivom.

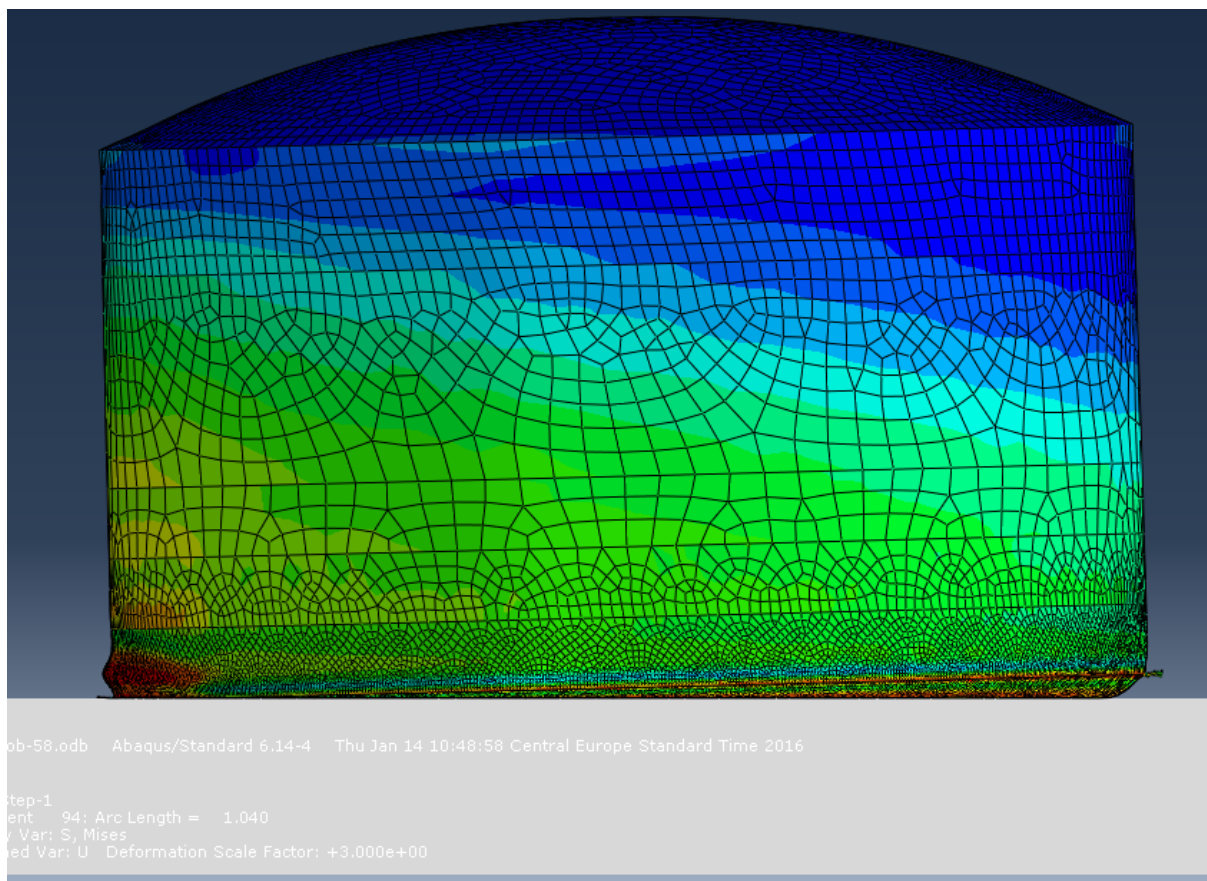
Do vrednosti pospeška tal 0,2g še beležimo pomike, ki izvirajo iz elastičnega uklona. V primeru potresa z večjimi pospeški tal se začne jeklo v spodnjem delu rezervoarja plastificirati. Na grafikonu 9 so vidni veliki pomiki točke nad nastalo izboklino. V spodnjem delu rezervoarja pride do elasto-plastičnega uklona stene rezervoarja. Na sliki 25 je vidno območje plastifikacije jekla ter nastala izboklina.



Grafikon 9: Pomik točke izven ravnine plašča na nastali izboklini v steni rezervoarja.



Slika 25: Območje izbokline in plastifikacija jekla v steni rezervoarja.



Slika 26: Prerez deformiranega rezervoarja.

Prva plastifikacija se zgodi na mestu, kjer se začne rezervoar dvigovati, in sicer na mestu spoja med plaščem in dnem rezervoarja. Plastifikacija se pojavi, ko obtežni faktor λ doseže vrednost $\lambda = 0,15$. Obtežni faktor je neposredno povezan s horizontalnim pospeškom tal in je zato prva plastifikacija v rezervoarju pri horizontalnem pospešku tal $ag, max = 0,15g$.

Prva plastifikacija na mestu, kjer se tvori slonova noga, se pojavi nekoliko kasneje. Izboklina se začne plastificirati pri obtežnem faktorju $\lambda = 0,20$. To pomeni, da dosežemo prvo plastifikacijo na plašču, ko je horizontalni pospešek tal $ag, max = 0,20g$ in vertikalni pospešek tal v našem primeru $avg, max = 0,18g$. Vertikalni pospešek tal je fiksiran na devetdeset odstotkov horizontalnega pospeška tal.

Od $\lambda = 0,20$ naprej je rezervoar že toliko poškodovan oz. deformiran, da ni primeren za nadaljnjo rabo. Slika 26 prikazuje deformacije celotnega rezervoarja pri $\lambda = 0,25$.

7 ZAKLJUČEK

Rezultati obravnavanega rezervoarja ustrezajo rezultatom, navedenim v različnih literaturah različnih avtorjev. Navedeno je, da je najverjetnejša poškodba rezervoarjev izboklina stene rezervoarja oz. »slonova noga«. Naši rezultati potrjujejo to trditev. Ugotavljamo, da do nastanka plastične izbokline na steni rezervoarja pride zaradi velikih obodnih natezних napetosti ter predvsem zaradi prevrnitvenega momenta, ki nastane zaradi horizontalne potresne obtežbe.

Izvedli smo analizo na rezervoarju po principu Evrokod-standarda. V standardu je postopek dobro opisan, vendar ne zajema celotne problematike analize rezervoarjev na potresne obtežbe. Postopek, naveden v standardu, je računsko zahteven in je natančno vrednoten le za sidrane rezervoarje. Za nesidrane rezervoarje je ponujen nenatančen postopek oz. predpostavka, da smo na varni strani, če upoštevamo postopek za sidrane rezervoarje.

Projektiranje jeklenih cilindričnih rezervoarjev po Evrokod-standardu je na varni strani. Analizirali smo rezervoar, ki je bil projektiran za potres z maksimalnim pospeškom tal 0,1g. Naša analiza kaže, da večje poškodbe nastanejo šele pri vrednosti maksimalnega pospeška tal 0,2g. Takrat se začne plastifikacija izbokline na steni rezervoarja.

Zaključimo lahko, da so postopki dovolj natančni za projektiranje vertikalnih cilindričnih rezervoarjev.

Nadaljnje delo vidimo v večjem obsegu analiz. Potrebno bi bilo analizirati večje število različnih rezervoarjev. Vitki in visoki rezervoarji se obnašajo drugače kot ploski rezervoarji. Za celovito sliko obnašanja rezervoarjev pod potresnimi vplivi bi bile potrebne še analize z različnimi potresi. V našem primeru smo imeli fiksno razmerje med vertikalno komponento pospeška tal ter horizontalnim pospeškom tal. Dejanski potresi imajo zelo različne vertikalne in horizontalne pospeške tal.

VIRI

- [1] EN 1998-4: 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks and pipelines-osnutek.
- [2] Rammerstorfer, F.G., Scharf, K., Fisher, F.D. 1990. Storage tanks under earthquake loading. *Applied Mechanical Review* 43: 261–282.
- [3] Rammerstorfer, F.G., Scharf, K., Fisher, F.D. 1991. Earthquake Resistant Design of Anchored and Unanchored Liquid Storage Tanks Under Three-Dimensional Earthquake Excitation. V: Schüller, G.I.(ur.). *Structural Dynamics: Recent Advances*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: str. 317–371.
- [4] Malhotra, P.K., Wenk, T., Wieland, M. 2000. Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. *Structural Engineering International* 3: 197–201.
- [5] Wunderlich, W., Seiler, C. 1999. Nonlinear treatment of liquid-filled storage tanks under earthquake excitation by quasistatic approach. *Computers and structures* 78: 385–395.
- [6] Nachtigall, I., Gebbeken, N., Urrutia-Galicia, J. L. 2002. On the analysis of vertical circular cylindrical tanks under earthquake excitation at its base. *Engineering structures* 25: 201–213.
- [7] Mraveas, C. 2011. Analysis and structural behavior of cylindrical steel tanks under seismic effects. V: *The 12th International Conference on Metal Structures-ICMS*, Wroclaw, Poland, 15–17 June 2011: p. 476–485.
- [8] Hamdan, F.H. 1999. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research* 53: 307–333.
- [9] Benasciutti, D., Moro, L., Cimenti, N. 2014. Seismic analysis of a liquid storage tank used in wine industry: a FEM-based approach. V: *International CAE Conference 2014*, Verona, Italy, 17-28 October 2014: 4 p.
- [10] Di Carluccio, A., Fabbrocino, G., Manfredi, G. 2008. V: *The 14th World Conference on earthquake Engineering*, Beijing, China, 12-18 October 2008: 8 p.

-
- [11] Baumgartner, M. 2011. Projektiranje jeklenega cilindričnega rezervoarja. Diplomatska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Baumgartner): 170 f.
- [12] Structural safety of industrial steel tanks, pressure vessels and piping systems under seismic loading. 2013. Luksemburg, Publication office of European Union: 149 str.
- [13] Tavano, M. 2010. Seismic Response of Tank-Fluid Systems: State of the Art Review and Dynamic Buckling Analysis of a Steel Tank with the added Mass Method. Magistrska naloga. Bologna. Università degli Studi di Bologna, Facolta' di Ingegneria, International Master Course in Civil Engineering (samozaložba M. Tavano): 244 f.
- [14] Yang, J. Y. 1976. Dynamic behaviour of fluid-tank systems. Doktorska disertacija. Houston, Texas, Rice University, Civil Engineering (samozaložba J. Y. Yang): 216 f.
- [15] Sanchez, H. S., Salas, C. C., Dominguez, A. M. 2004. Structural behaviour of liquid filled storage tanks of Large capacity placed in seismic zones of high risk in Mexico. V: 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada, 1-6 August 2004: 8 p.
- [16] Priestly, M. J. N., Wood, J.H., Davidson, B.J. 1986. Seismic design of storage tanks. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering 19: 272–284.
- [17] Abaqus/CAE User's Manual. 2011. Providence, Dassault Systemes: loč. pag.
- [18] Abaqus Analysis Manual. 2011. Providence, Dassault Systemes: loč. pag.
- [19] Abaqus Theory Manual. 2011. Providence, Dassault Systemes: loč. pag.
- [20] The Great Alaska Earthquake of 1964. 1972. Washington, National Academy of Science: 582 str.
- [21] Sharpe, G. J. 1967. Fluid Flow Analysis. London, Heinemann Educational Books Ltd. : 397 str.
- [22] Veletsos, A. S., Tang, Y. 1986. Dynamics of Vertically Excited Liquid Storage Tanks. Journal of Structural Engineering: 1228–1246.

9 PRILOGE

Priloga A: Primerjava enačb.

Priloga B: Izračun pritiskov na rezervoar zaradi potresne obtežbe.

PRILOGA A: Primerjava enačb**Impulzivni pritiski**

Izpišemo enačbo za impulzivne pritiske (3.30) iz poglavja 3 te magistrske naloge. Enačbo označimo z (A.1). Enačbo preuredimo in jo zapišemo z enačbo (A.2).

$$p_i = -\ddot{x}(t)\rho H \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8(-1)^{n+1}}{[(2n-1)\pi]^2} \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]}{I'_1\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]} \cos\left[(2n-1)\frac{\pi z}{2H}\right] \quad (\text{A.1})$$

$$p_i = \ddot{x}(t)\rho H \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 * 4(-1)^n}{[(2n-1)\pi]^2} \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]}{I'_1\left[(2n-1)\frac{\pi r}{2H}\right]} \cos\left[(2n-1)\frac{\pi z}{2H}\right] \quad (\text{A.2})$$

Navajamo enačbi (A.3) ter (A.4) za impulzivne pritiske kot so navedeni v standardu [1].

$$p_i = C_i(\xi, \zeta)\rho H \cos(\theta) Ag(t) \quad (\text{A.3})$$

$$C_i(\xi, \zeta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n I_1\left(\frac{v_n}{\gamma} \xi\right)}{v_n^2 I'_1\left(\frac{v_n}{\gamma}\right)} \cos(v_n \zeta) \quad (\text{A.4})$$

Pri tem je $v_n = (2n+1)\pi/2$; $\gamma = H/R$; $\xi = r/R$ ter $\zeta = z/H$. V enačbah (A.3) ter (A.4) upoštevamo zapisane zveze za v_n , γ , ξ ter ζ . Enačbi (A.3) in (A.4) še združimo in dobimo enačbo (A.7).

$$C_i = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{[(2n+1)\pi]^2} \frac{I_1\left[(2n+1)\frac{\pi r}{2H}\right]}{I'_1\left[(2n+1)\frac{\pi r}{2H}\right]} \cos\left[(2n+1)\frac{\pi z}{2H}\right] \quad (\text{A.5})$$

$$p_i = \rho H \cos(\theta) A g(t) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{[(2n+1)\pi]^2} \frac{I_1 \left[(2n+1) \frac{\pi r}{2H} \right]}{I_1' \left[(2n+1) \frac{\pi r}{2H} \right]} \cos \left[(2n+1) \frac{\pi z}{2H} \right] \quad (\text{A.6})$$

Primerjamo enačbi (A.6) ter (A.2). Enačbi sta si zelo podobni. Razlika se pojavi v faktorju v_n , pri čemer se pojavi različen predznak. Enačba daje enake rezultate tudi, če faktor v_n zapišemo z $v_n = (2n-1)\pi/2$. Ob upoštevanju spremenjenega zapisa za v_n sta potem enačbi (A.2) in (A.6) zelo podobni.

Konvekcijski pritiski

Izpišemo enačbo (3.38) iz poglavja 3 za konvekcijske pritiske. Enačbo sedaj zapišemo pod zaporedno številko (A.7). V enačbi je možno okrajšati količino H . Novo enačbo sedaj zapišemo z oznako (A.8).

$$p_c = \rho H \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R J_1 \left(\lambda_n \frac{r}{R} \right) \cosh \left(\lambda_n \frac{z}{R} \right)}{(\lambda_n^2 - 1) H J_1(\lambda_n) \cosh \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right)} A_{cn}(t) \quad (\text{A.7})$$

$$p_c = \rho \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R J_1 \left(\lambda_n \frac{r}{R} \right) \cosh \left(\lambda_n \frac{z}{R} \right)}{(\lambda_n^2 - 1) J_1(\lambda_n) \cosh \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right)} A_{cn}(t) \quad (\text{A.8})$$

Navajamo enačbi (A.9) ter (A.10) kot so zapisane v standardu [1] za konvekcijske pritiske.

$$p_c = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cosh(\lambda_n \gamma \zeta) J_1(\lambda_n \xi) \cos(\theta) A_{cn}(t) \quad (\text{A.9})$$

$$\psi_n = \frac{2R}{(\lambda_n^2 - 1) J_1(\lambda_n) \cosh(\lambda_n \gamma)} \quad (\text{A.10})$$

Enačbi (A.9) ter (A.10) združimo ter upoštevamo zveze; $\gamma = H/R$; $\xi = r/R$ ter $\zeta = z/H$. Nastane enačba (A.11).

$$p_c = \rho \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2RJ_1\left(\lambda_n \frac{r}{R}\right) \cosh\left(\lambda_n \frac{z}{R}\right)}{(\lambda_n^2 - 1)J_1(\lambda_n) \cosh\left(\lambda_n \frac{H}{R}\right)} A_{cn}(t) \quad (\text{A.11})$$

Primerjamo enačbi (A.8) ter (A.11). Enačbi sta enaki.

Fleksibilni pritiski

Enačbi (A.12) in (A.13) predstavlja enačbo (3.43) za fleksibilne pritiske, ki je navedena v poglavju 3.

$$p_f = -\ddot{x}(t)\rho H \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\alpha_n}{(2n-1)\pi} \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi R}{2H}\right]}{I'_1\left[(2n-1)\frac{\pi R}{2H}\right]} \cos\left[(2n-1)\frac{\pi z}{2H}\right] \quad (\text{A.12})$$

$$\alpha_n = \frac{1}{H} \int_0^H \psi(z) \cos\left[(2n-1)\frac{\pi z}{2H}\right] dz \quad (\text{A.13})$$

Z enačbama (A.14) in (A.15) zapišemo enačbe za fleksibilne pritiske, kot jih navaja standard [1].

$$p_f = \rho H \psi \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} d_n \cos(v_n \zeta) A_{fn}(t) \quad (\text{A.14})$$

$$d_n = 2 \frac{\int_0^1 f(\zeta) \cos(v_n \zeta) d\zeta}{v_n} \frac{I_1\left(\frac{v_n}{\gamma}\right)}{I'_1\left(\frac{v_n}{\gamma}\right)} \quad (\text{A.15})$$

V enačbi (3.43) v poglavju 3 te naloge ali enačbi (A.12) je deformacijska oblika zapisana z oznako $\psi(z)$. V standardu je ta ista količina zapisana z oznako $f(\zeta)$

Enačbi (A.9) ter (A.10) združimo ter upoštevamo zveze; $v_n = (2n+1)\pi/2$; $\gamma = H/R$; $\xi = r/R$ ter $\zeta = z/H$. Nastane enačba (A.16).

$$p_f = A_{fn}(t)\rho H\psi \cos(\theta) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4\alpha_n}{(2n+1)\pi} \frac{I_1\left[(2n+1)\frac{\pi R}{2H}\right]}{I'_1\left[(2n+1)\frac{\pi R}{2H}\right]} \cos\left[(2n+1)\frac{\pi z}{2H}\right] \quad (\text{A.16})$$

Primerjamo enačbi (A.12) in (A.16). Razlika se pojavi v faktorju v_n , kjer se pojavi različen predznak. Enačba daje enake rezultate tudi, če faktor v_n zapišemo z $v_n = (2n - 1)\pi/2$. Ob upoštevanju takega zapisa za v_n sta sedaj enačbi (A.12) in (A.16) zelo podobni. Druga razlika med dvema enačbama je faktor ψ . Faktor ψ je del iteracijskega postopka za določanje efektivne gostote materiala lupine, kar je del iskanja deformacijske linije zaradi pritiskov sistema rezervoar-tekočina.

Priloga B: Izračun pritiskov na rezervoar zaradi potresne obtežbe

*Poglavja so označena na enak način, kot so v [1] Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance, Part 4 : Silos, tanks and pipelines - osnutek.

B.2 Vertikalni togi cilindrični rezervoarji

Podatki

$$H = 15 \text{ (m)} ; R = 14.65 \text{ (m)} ; \rho = 860 \text{ (kg/m}^3\text{)} ; g = 9.81 ; a_g = 0.25 g ;$$

B.2.1 Horizontalna potresna obtežba

B.2.1.1 Togi impulzivni pritisk ($q=1.5$)

$$q = 1.5 ;$$

$$v_n = \frac{2n+1}{2} \pi ;$$

$$\gamma = \frac{H}{R} ;$$

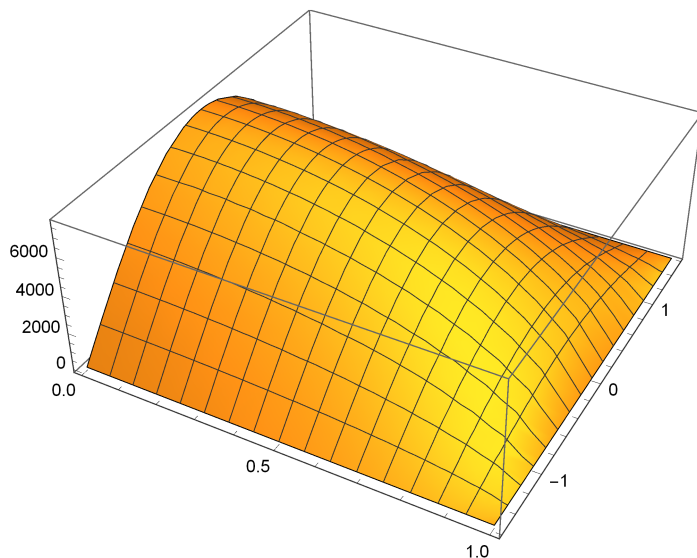
$$I_1[x] = \text{BesselI}[1, x] ;$$

$$dI_1[x] = D[I_1[x], x] ;$$

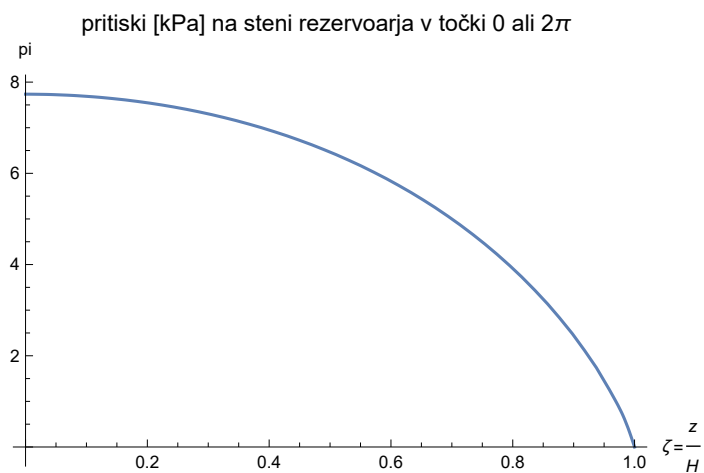
$$C_i[\xi, \zeta] = \sum_{n=0}^{50} \frac{(-1)^n}{dI_1[v_n/\gamma] v_n^2} \text{Cos}[v_n \zeta] * I_1\left[\frac{v_n}{\gamma} \xi\right] ;$$

$$p_i[\xi, \zeta, \theta] = C_i[\xi, \zeta] * \rho H \text{Cos}[\theta] a_g / q ;$$

```
Plot3D[pi[1, ξ, θ], {ξ, 0, 1}, {θ, -π/2, π/2}]
```



```
piStena = Plot[pi[1, ξ, 2 π] 10-3, {ξ, 0, 1}, AxesLabel → {"ξ = z/H", "pi"},
  PlotLabel → "pritiski [kPa] na steni rezervoarja v točki 0 ali 2π"]
```



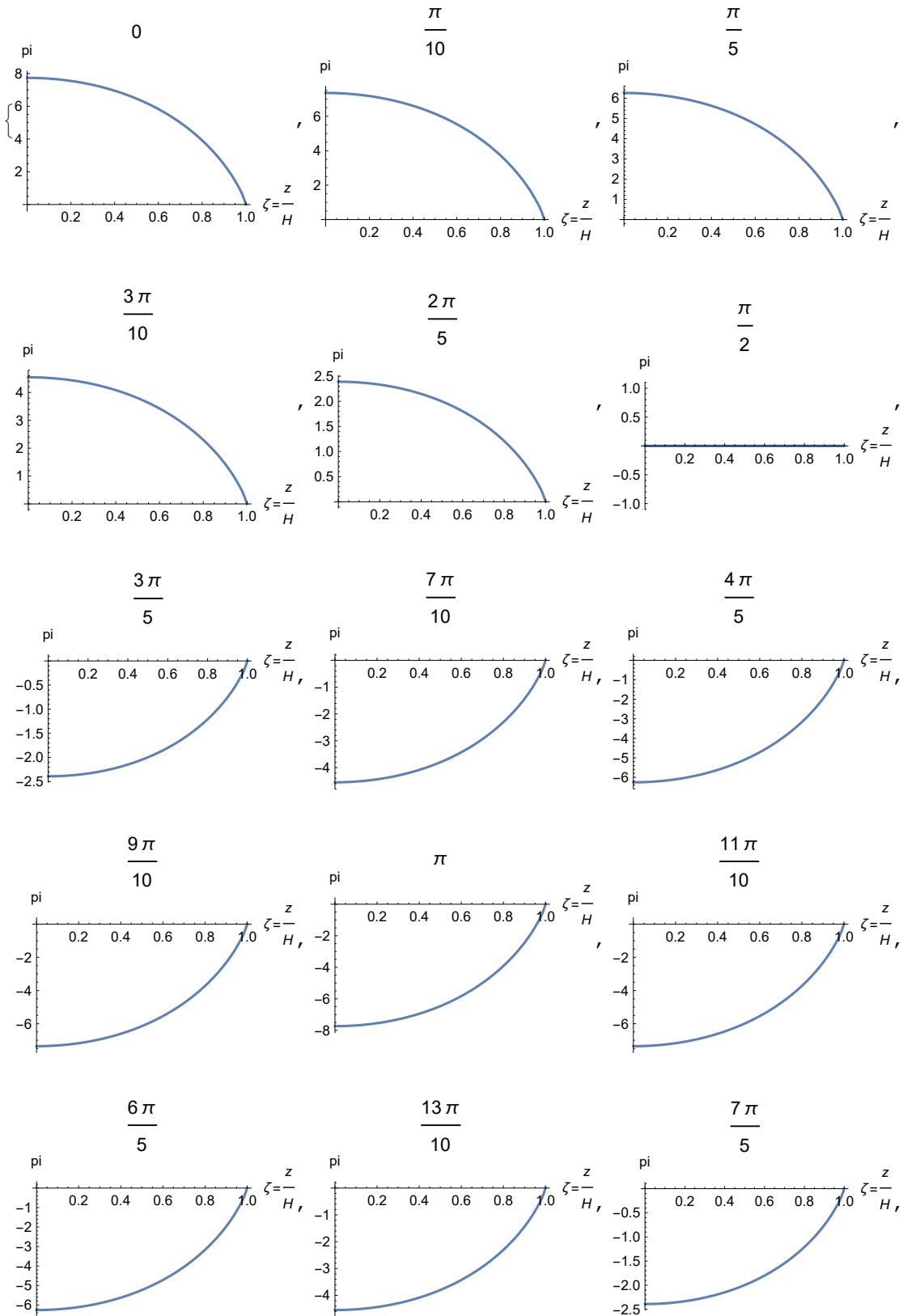
```
pii = Table[pi[1, ξ, 2 π], {ξ}, {ξ, 0, 1, 0.01}];
```

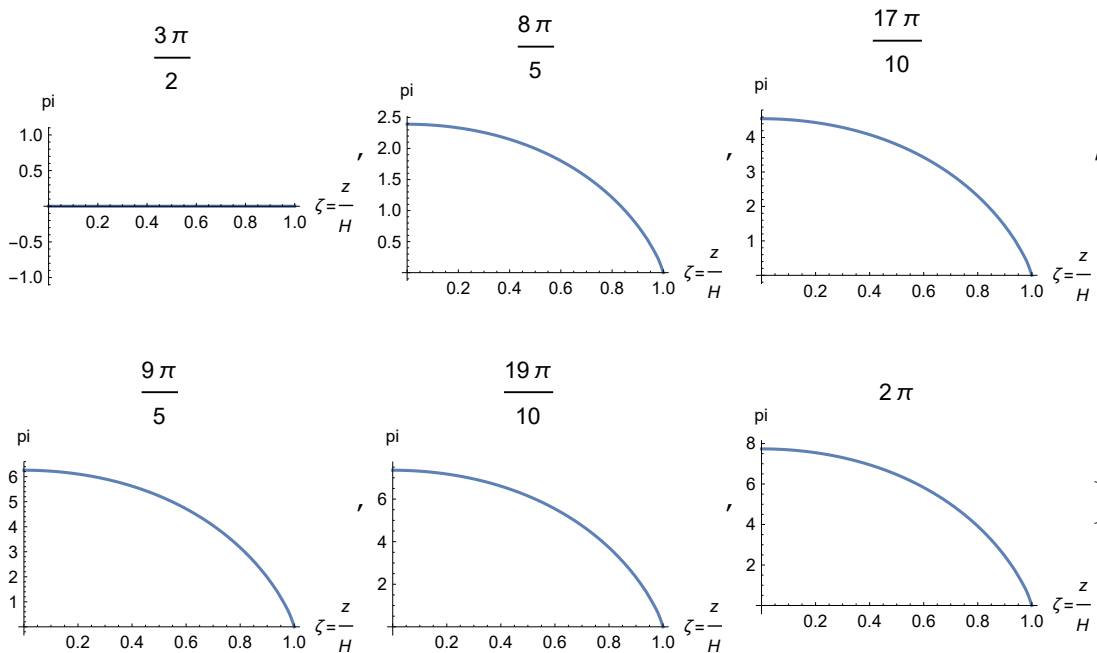
```
Export["pi2p.xlsx", pii]
```

```
SystemOpen[DirectoryName[AbsoluteFileName["data.xls"]]]
```

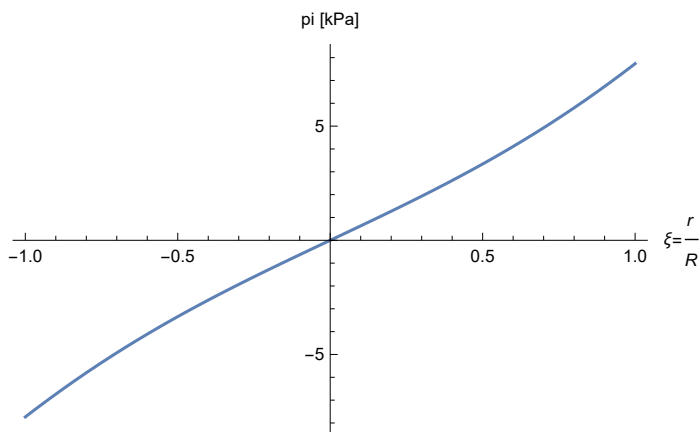
```
pi2p.xlsx
```

```
piOblika = Table[Plot[pi[1, ξ, θ] 10-3, {ξ, 0, 1},
  AxesLabel → {"ξ = z/H", "pi"}, PlotLabel → θ], {θ, 0, 2 π, π/10}]
```



```
piDno = Plot[pi [ξ, 0, 2 π] 10-3, {ξ, -1, 1}, AxesLabel → {"ξ =  $\frac{r}{R}$ ", "pi [kPa]"}]
```



Rezultante napetosti

```
Clear[γ1]
```

$$m = \rho \pi R^2 H (*kg*);$$

$$mi[\gamma1_] = m 2 \gamma1 \sum_{n=0}^{50} \frac{I1[\nu n / \gamma1]}{\nu n^3 dI1[\nu n / \gamma1]} // N;$$

$$Qi = mi[\gamma] ag 10^{-3} (*kN*);$$

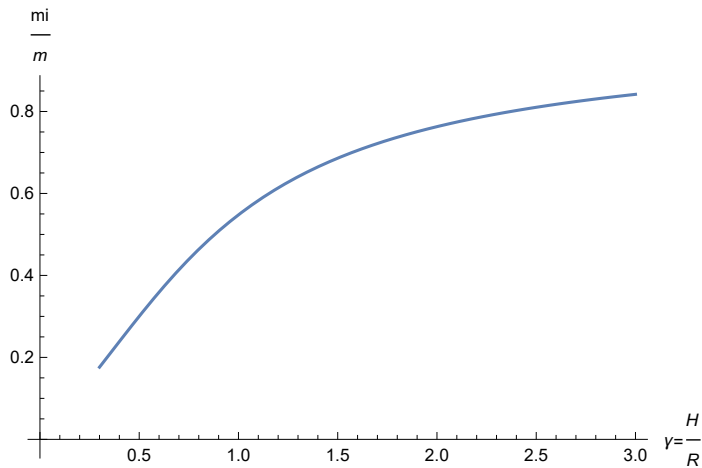
11 872.6

$$hi[\gamma_1] = H \frac{0.5 + 2 \gamma_1 \sum_{n=0}^{100} \frac{vn+2 (-1)^{n+1} I1[vn/\gamma_1]}{vn^4 dI1[vn/\gamma_1]}}{2 \gamma_1 \sum_{n=0}^{100} \frac{I1[vn/\gamma_1]}{vn^3 dI1[vn/\gamma_1]}} ;$$

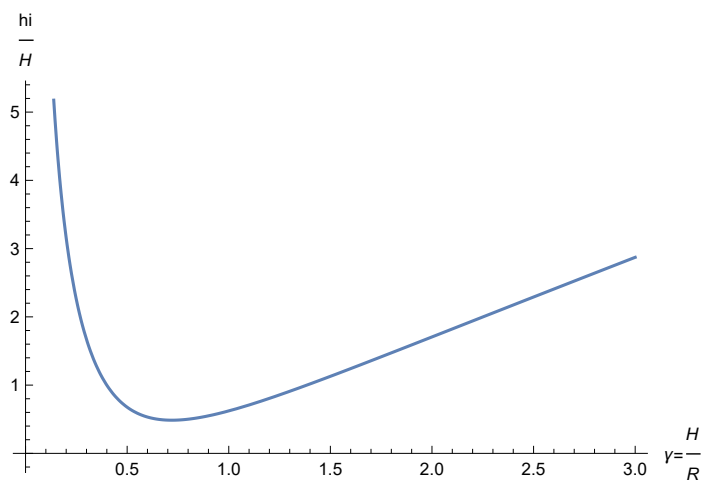
$$Mi = mi[\gamma] hi[\gamma] \text{ ag } 10^{-3} (*kNm*)$$

114 273.

$$\text{Plot}\left[\frac{mi[\gamma_1]}{m}, \{\gamma_1, 0.3, 3\}, \text{AxesOrigin} \rightarrow \{0, 0\}, \text{AxesLabel} \rightarrow \left\{ \gamma = \frac{H}{R}, \frac{mi}{m} \right\}\right]$$



$$\text{Plot}\left[\frac{hi[\gamma_1]}{H}, \{\gamma_1, 0, 3\}, \text{AxesOrigin} \rightarrow \{0, 0\}, \text{AxesLabel} \rightarrow \left\{ \gamma = \frac{H}{R}, \frac{hi}{H} \right\}\right]$$



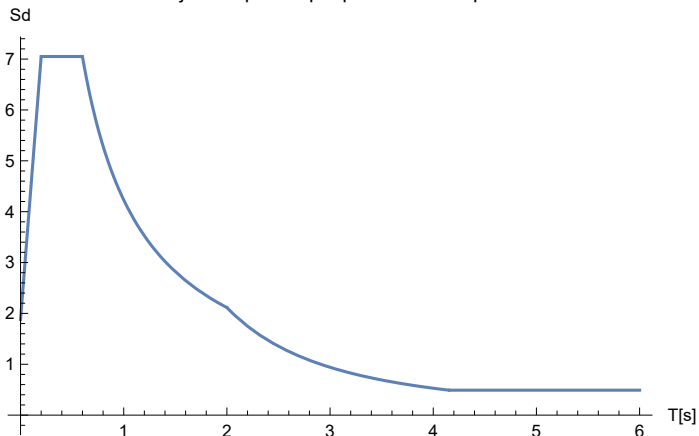
B.2.1.2 Konvekcijske napetosti ($q=I$ ni sipanja energije)

```

S = 1.15; TB = 0.2; TC = 0.6; TD = 2; η = 1; q = 1; g = 9.81; β = 0.2;
Sd[T_] = Piecewise[{{ag S (2/3 + T/TB (2.5/q - 2/3)), T >= 0 && T ≤ TB},
  {ag S 2.5/q, T > TB && T ≤ TC},
  {If [ag S 2.5/q (TC/T) ≥ β ag, ag S 2.5/q (TC/T), β ag], T > TC && T ≤ TD},
  {If [ag S 2.5/q (TC TD/T^2) ≥ β ag, ag S 2.5/q (TC TD/T^2), β ag], T > TD}}];
Plot[Sd[T], {T, 0, 6}, AxesLabel → {"T[s]", "Sd"},
  PlotLabel → "Projektni spekter pospeškov za C tip tal"]

```

Projektni spekter pospeškov za C tip tal



$\lambda_1 = 1.8112$; $\lambda_2 = 5.3314$; $\lambda_3 = 8.5363$;

$$\psi_n = \frac{2R}{(\lambda_1^2 - 1) \text{BesselJ}[1, \lambda_1] \text{Cosh}[\lambda_1 \gamma]}$$

$$\omega_{c1} = \sqrt{g \frac{\lambda_1}{R} \text{Tanh}[\lambda_1 \gamma]}$$

$$T_{c1} = \frac{2\pi}{\omega_{c1}}$$

$$A_{c1} = S_d[T_{c1}]$$

5.84689

0.4905

$$p_c[\xi_-, \zeta_-, \theta_-] = \rho \psi_n \text{Cosh}[\lambda_1 \gamma \zeta_-] \text{BesselJ}[1, \lambda_1 \xi_-] \text{Cos}[\theta_-] A_{c1}$$

```
pcStena = Plot[pc[1,  $\xi$ ,  $2\pi$ ] 10-3, { $\xi$ , 0, 1}, AxesLabel → {" $\xi = \frac{z}{H}$ ", "pc [kPa]"},
  PlotLabel → "pritiski na steni rezervoarja v 'začetni točki' 0 ali  $2\pi$ "]
```



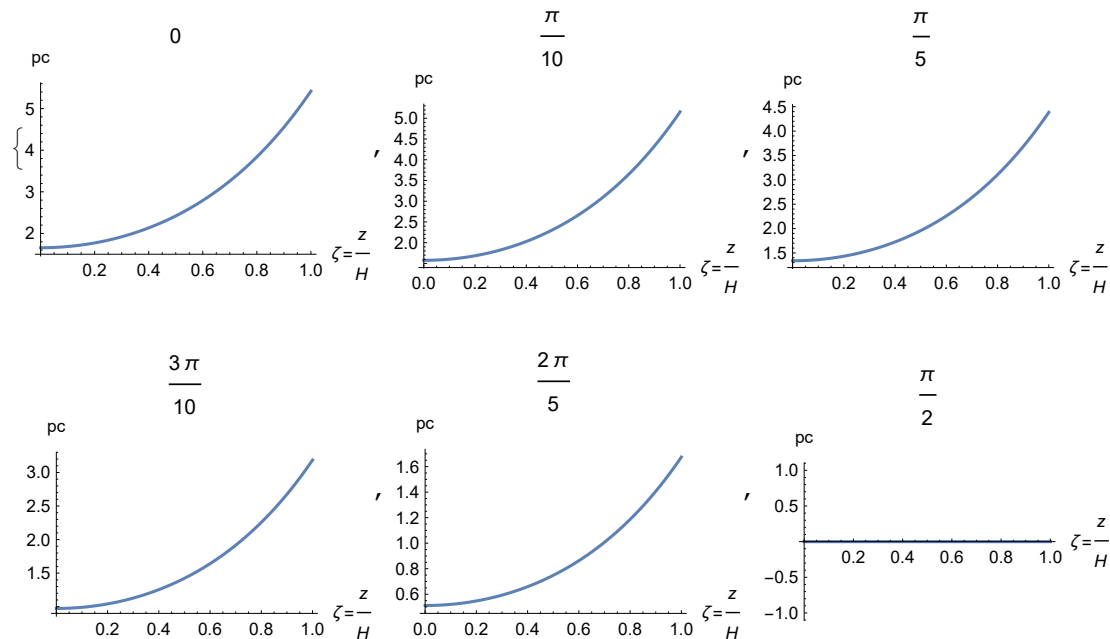
```
pcc = Table[{pc[1,  $\xi$ ,  $2\pi$ ],  $\xi$ }, { $\xi$ , 0, 1, 0.01}];
```

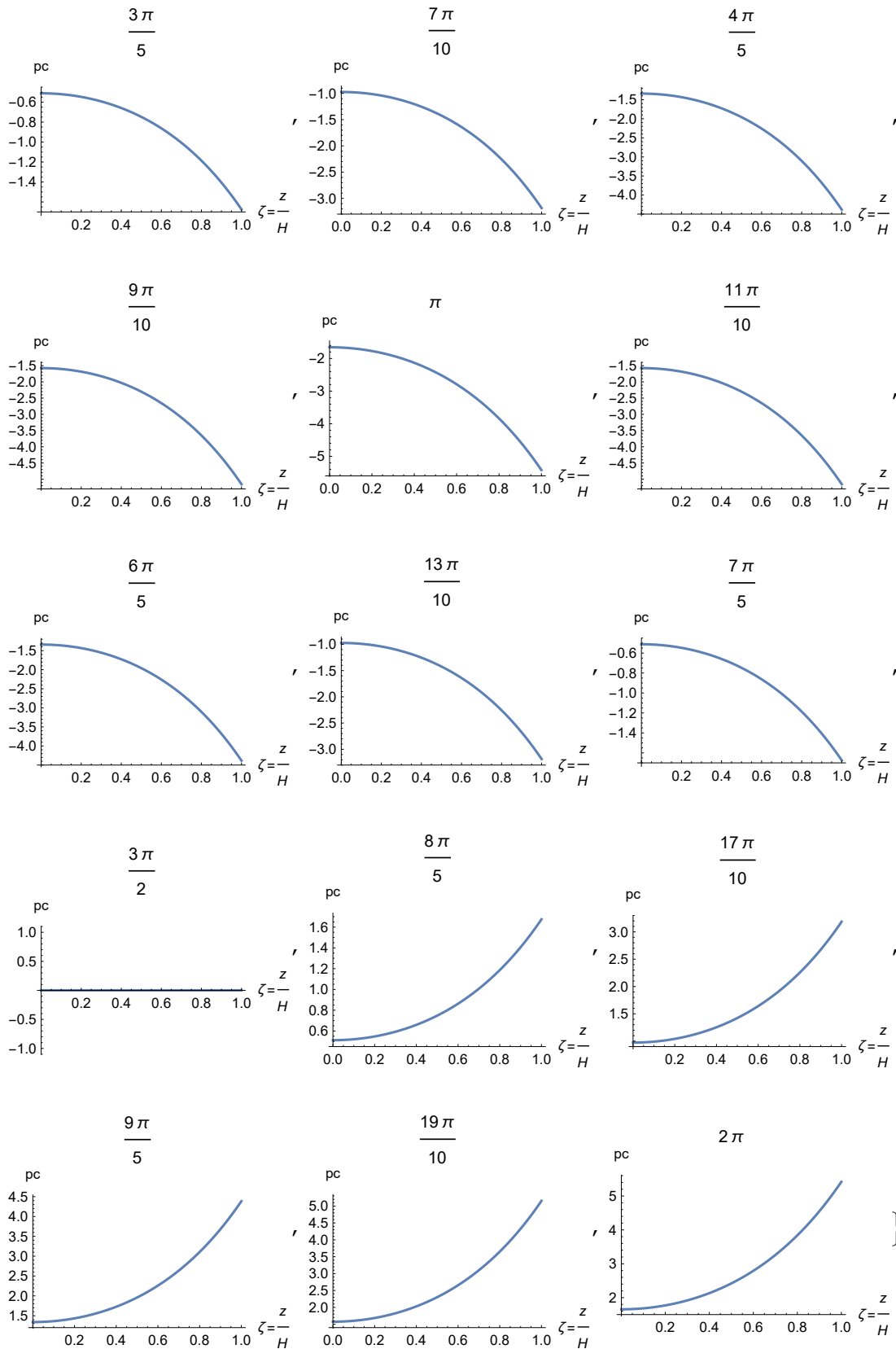
```
Export["pc2p.xlsx", pcc]
```

```
SystemOpen[DirectoryName[AbsoluteFileName["data.xls"]]]
```

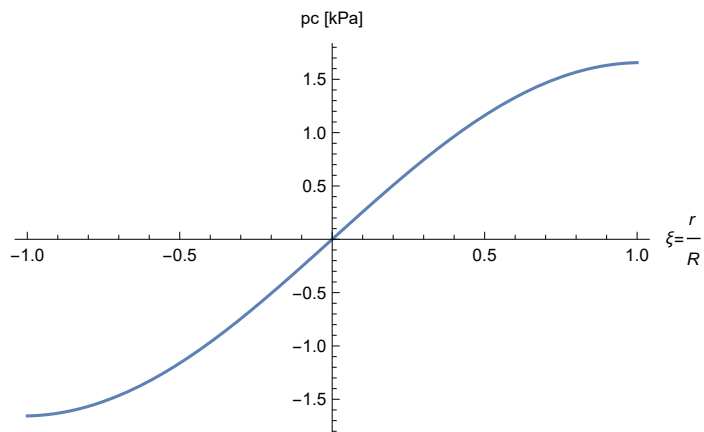
```
pc2p.xlsx
```

```
pcOblika = Table[Plot[pc[1,  $\xi$ ,  $\theta$ ] 10-3, { $\xi$ , 0, 1},
  AxesLabel → {" $\xi = \frac{z}{H}$ ", "pc"}, PlotLabel →  $\theta$ ], { $\theta$ , 0,  $2\pi$ ,  $\pi/10$ }]
```





```
pcDno = Plot[pc[\xi, 0, 2 \pi] 10^{-3}, {\xi, -1, 1}, AxesLabel -> {"\xi = \frac{F}{R}", "pc [kPa]"}]
```



Rezultante napetosti

$$m_{c1} = m \frac{2 \operatorname{Tanh}[\lambda_1 \gamma]}{\gamma \lambda_1 (\lambda_1^2 - 1)} \quad (*kg*)$$

$$3.91667 \times 10^6$$

$$Q_c = m_{c1} A_{c1} 10^{-3} \quad (*kN*)$$

$$1921.13$$

$$h_{c1} = H \left(1 + \frac{2 - \operatorname{Cosh}[\lambda_1 \gamma]}{\lambda_1 \gamma \operatorname{Sinh}[\lambda_1 \gamma]} \right) \quad (*m*)$$

$$11.6969$$

$$M_c = Q_c h_{c1} \quad (*kNm*)$$

$$22471.2$$

B.2.1.3 Višina konvekcijskega vala

$$d_{max} = 0.84 R S_d [T_{c1}] / g \quad (*m*)$$

$$0.6153$$

B.2.1.4 Inercijske sile sten (za jeklene rezervoare zanemarljivo majhne v primerjavi s hidrodinamičnimi silami. Zaradi majhne mase jeklene konstrukcije)

Clear[ρ_i]

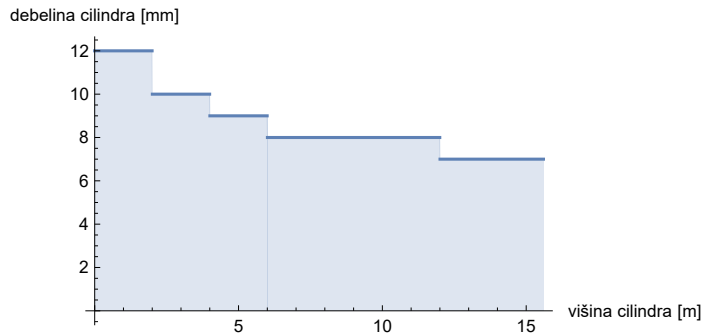
$$E_m = 2.1 \times 10^{11}; \quad \rho_s = 7850 \quad (*kg/m^3*)$$

$$m_r = 0.025 * R^2 * \pi; \quad H_c = 15.6; \quad H_r = H_c + 1 / 3 \quad (4.3);$$

```

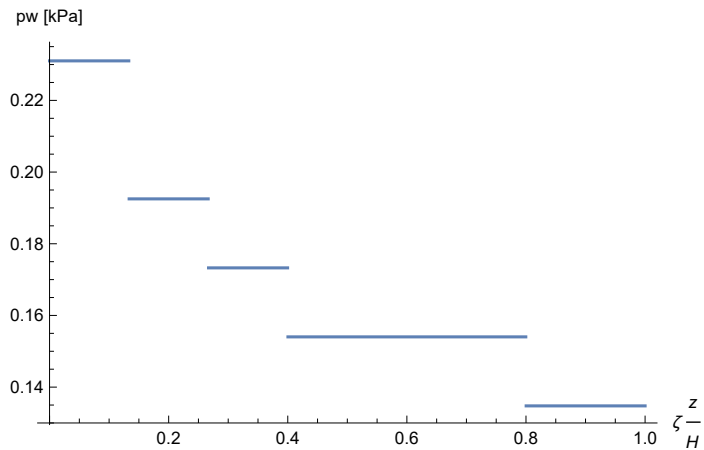
s[ξ_] = Piecewise[{{0.012, ξ >= 0 && ξ < 2 / H},
  {0.01, ξ ≥ 2 / H && ξ < 4 / H}, {0.009, ξ ≥ 4 / H && ξ ≤ 6 / H},
  {0.008, ξ ≥ 6 / H && ξ ≤ 12 / H}, {0.007, ξ ≥ 12 / H && ξ ≤ 1 Hc / H}}];
Plot[s[z / H] * 1000, {z, 0, Hc}, AxesLabel → {"višina cilindra [m]",
  "debelina cilindra [mm]"}, Filling → Bottom, AxesOrigin → {0, 0}]

```



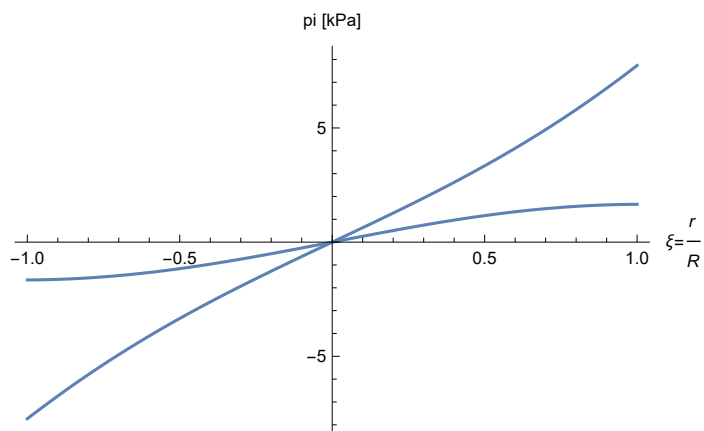
```
pw[ξ_, θ_] = ρ s s[ξ] Cos[θ] ag;
```

```
Plot[pw[ξ, 0] 10-3, {ξ, 0, 1}, AxesLabel → {"ξ z/H", "pw [kPa]"}]
```



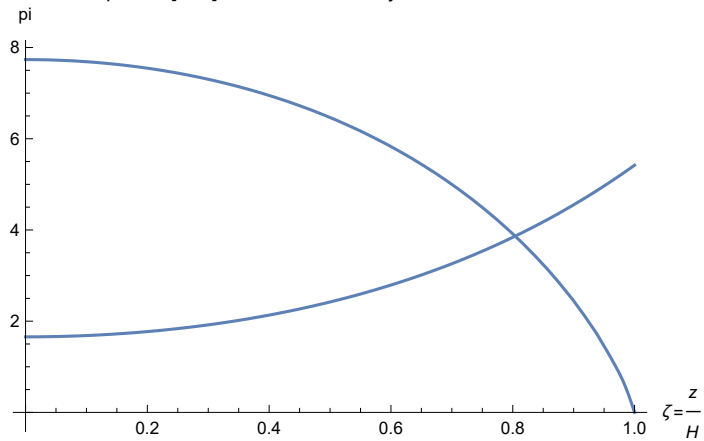
B.2.1.5 Kombinacija vseh napetosti pri horizontalnem vzbujanju

```
Show[{piDno, pcDno}]
```

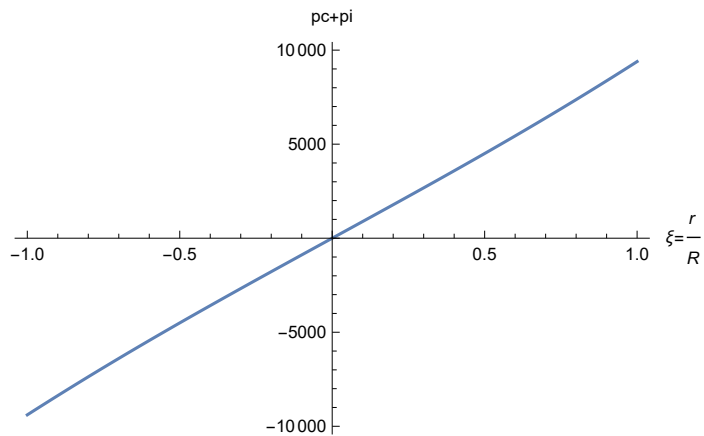


Show[{piStena, pcStena}]

pritiski [kPa] na steni rezervoarja v točki 0 ali 2π

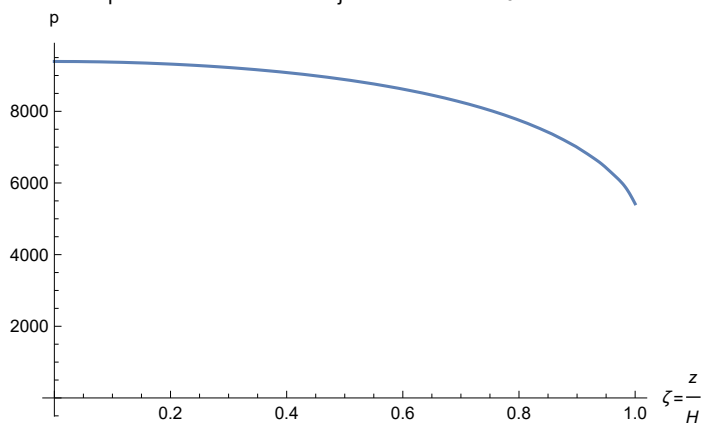


pDno = Plot[pc[ξ , 0, 2 π] + pi[ξ , 0, 2 π], { ξ , -1, 1}, AxesLabel \rightarrow { " $\xi = \frac{r}{R}$ ", "pc+pi" }]



pStena = Plot[pc[1, ξ , 2 π] + pi[1, ξ , 2 π], { ξ , 0, 1}, AxesLabel \rightarrow { " $\xi = \frac{z}{H}$ ", "p" },
PlotLabel \rightarrow "pritiski na steni rezervoarja v 'začetni točki' 0 ali 2π ",
AxesOrigin \rightarrow {0, 0}]

pritiski na steni rezervoarja v 'začetni točki' 0 ali 2π

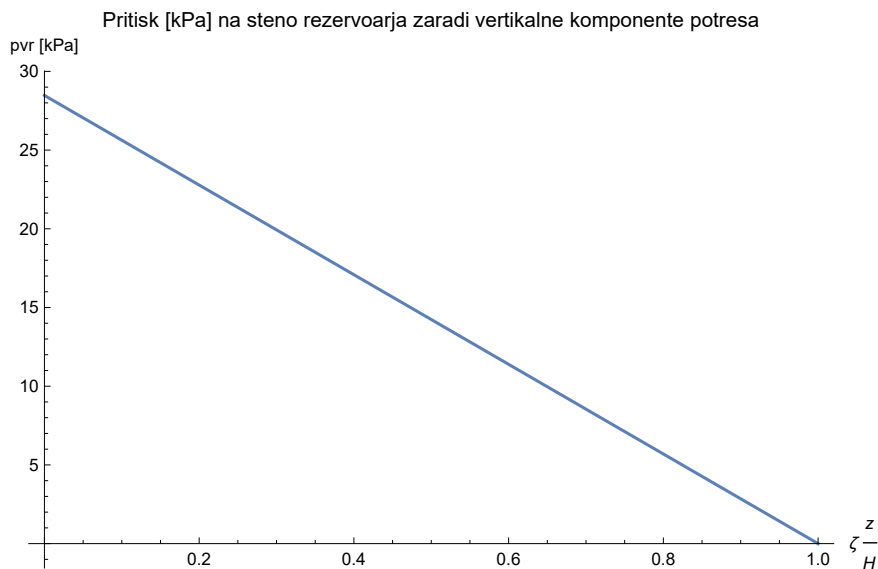


B.2.2 Vertikalna potresna obtežba

$q = 1.5$; $avg = 0.9 ag$;

$pvr[\xi] = \rho H (1 - \xi) avg$;

```
Plot[pvr[\xi] 10-3, {\xi, 0, 1}, PlotLabel →
  "Pritisk [kPa] na steno rezervoarja zaradi vertikalne komponente potresa",
  AxesLabel → {"\xi \frac{z}{H}", "pvr [kPa]"}]
```



```
pvr = Table[{pvr[\xi], \xi}, {\xi, 0, 1, 0.01}];
```

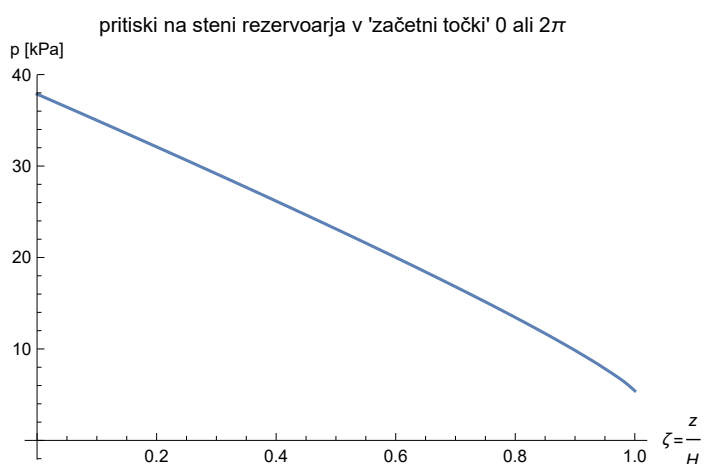
```
Export["pvr2p.xlsx", pvr]
```

```
SystemOpen[DirectoryName[AbsoluteFileName["data.xls"]]]
```

```
pvr2p.xlsx
```

B.2.3 Kombinacija horizontalne in vertikalne komponente

```
pStenaSkup = Plot[(pc[1,  $\xi$ , 2  $\pi$ ] + pi[1,  $\xi$ , 2  $\pi$ ] + pvr[ $\xi$ ]) 10-3,
  { $\xi$ , 0, 1}, AxesLabel → {" $\xi = \frac{z}{H}$ ", "p [kPa]"},
  PlotLabel → "pritiski na steni rezervoarja v 'začetni točki' 0 ali 2 $\pi$ ",
  AxesOrigin → {0, 0}]
```

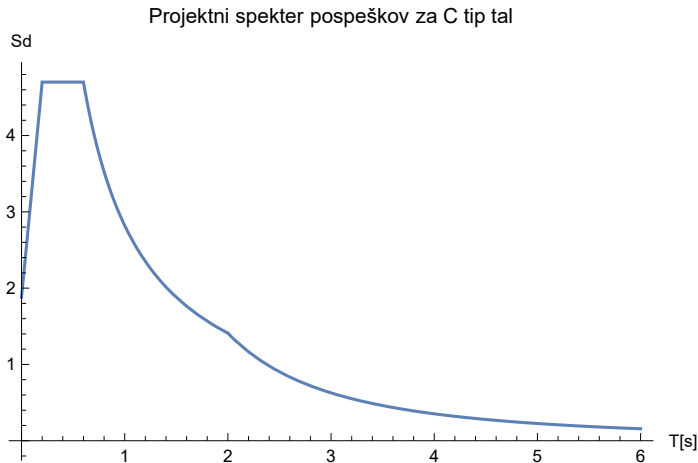


B.3 Vertikalni deformabilni cilindrični rezervoarji

B.3.1 Horizontalna potresna obtežba

Pri deformabilnih rezervoarjih (jekleni so skoraj vedno deformabilni) je celotna rešitev horizontalne potresne obtežbe, seštevek treh vrst napetosti: togi impulzivni pritisk + konvekcijske napetosti + napetosti deformabilnega rezervoarja

```
S = 1.15; TB = 0.2; TC = 0.6; TD = 2; η = 1; q = 1.5; g = 9.81;
Sd[T_] = Piecewise[{{ag S (2 / 3 + T / TB (2.5 / q - 2 / 3)), T >= 0 && T <= TB},
    {ag S 2.5 / q, T > TB && T <= TC}, {ag S 2.5 / q (TC / T), T > TC && T <= TD},
    {ag S 2.5 / q (TC TD / T^2), T > TD}}];
Plot[Sd[T], {T, 0, 6}, AxesLabel -> {"T[s]", "Sd"},
    PlotLabel -> "Projektni spekter pospeškov za C tip tal"]
```



$$\omega f = \sqrt{\frac{E m s [1 / 3]}{\rho H}} / (2 R (0.01675 \gamma^2 - 0.15 \gamma + 0.46))$$

Tf = 2 π / ωf

40.3232

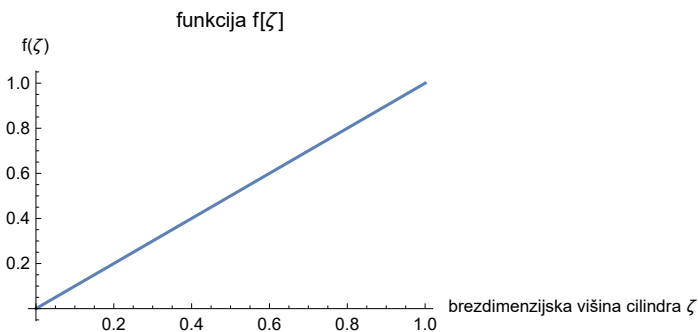
0.155821

Afn = Sd[Tf]

4.07761

f[ξ_] = ξ;

```
Plot[f[ξ], {ξ, 0, 1}, AxesLabel -> {"brezdimenzijska višina cilindra ξ", "f(ξ)"},
    PlotLabel -> "funkcija f[ξ]"]
```



$$\rho i [\xi_] = \frac{p f [\xi, 2 \pi]}{2 g s [\xi] f [\xi]}$$

$$d n = 2 \frac{\left(\int_0^1 f [\xi] \text{Cos} [v n \xi] d \xi \right) I 1 [v n / \gamma]}{v n d I 1 [v n / \gamma]}$$

$$b_n = 2 \frac{(-1)^n I_1[v_n / \gamma]}{v_n^2 d I_1[v_n / \gamma]};$$

$$\psi = \left(\int_0^1 f[\xi] \left(\frac{\rho s s[\xi]}{\rho H} + \sum_{n=0}^1 b_n \cos[v_n \xi] \right) d\xi \right) /$$

$$\left(\int_0^1 f[\xi] \left(\frac{\rho s s[\xi]}{\rho H} f[\xi] + \sum_{n=0}^1 d_n \cos[v_n \xi] \right) d\xi \right);$$

$$pf[\xi_-, \theta_-] = \rho H \psi \cos[\theta] \sum_{n=0}^1 d_n \cos[v_n \xi] A_{fn};$$

```
pf = Table[{pf[\xi, 2 \pi], \xi}, {\xi, 0, 1, 0.01}];
```

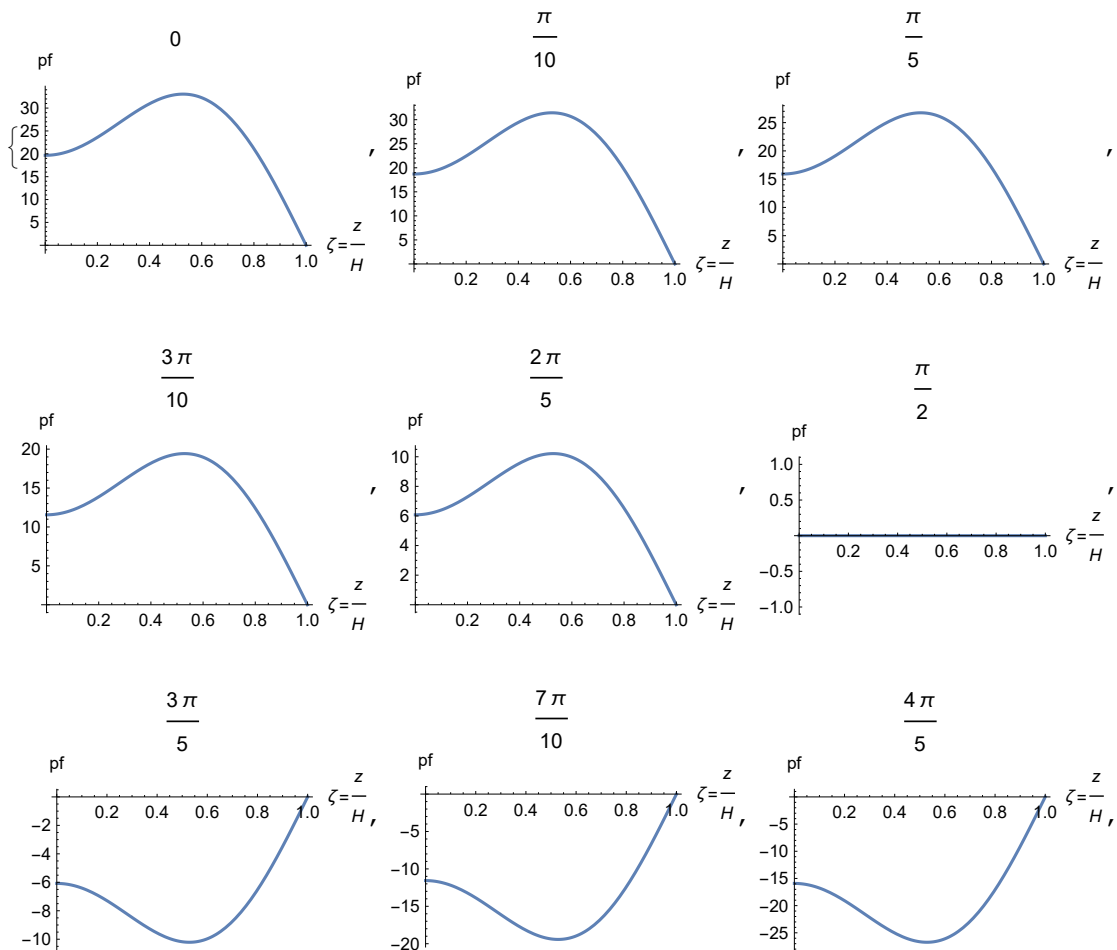
```
Export["pf2p.xlsx", pff]
```

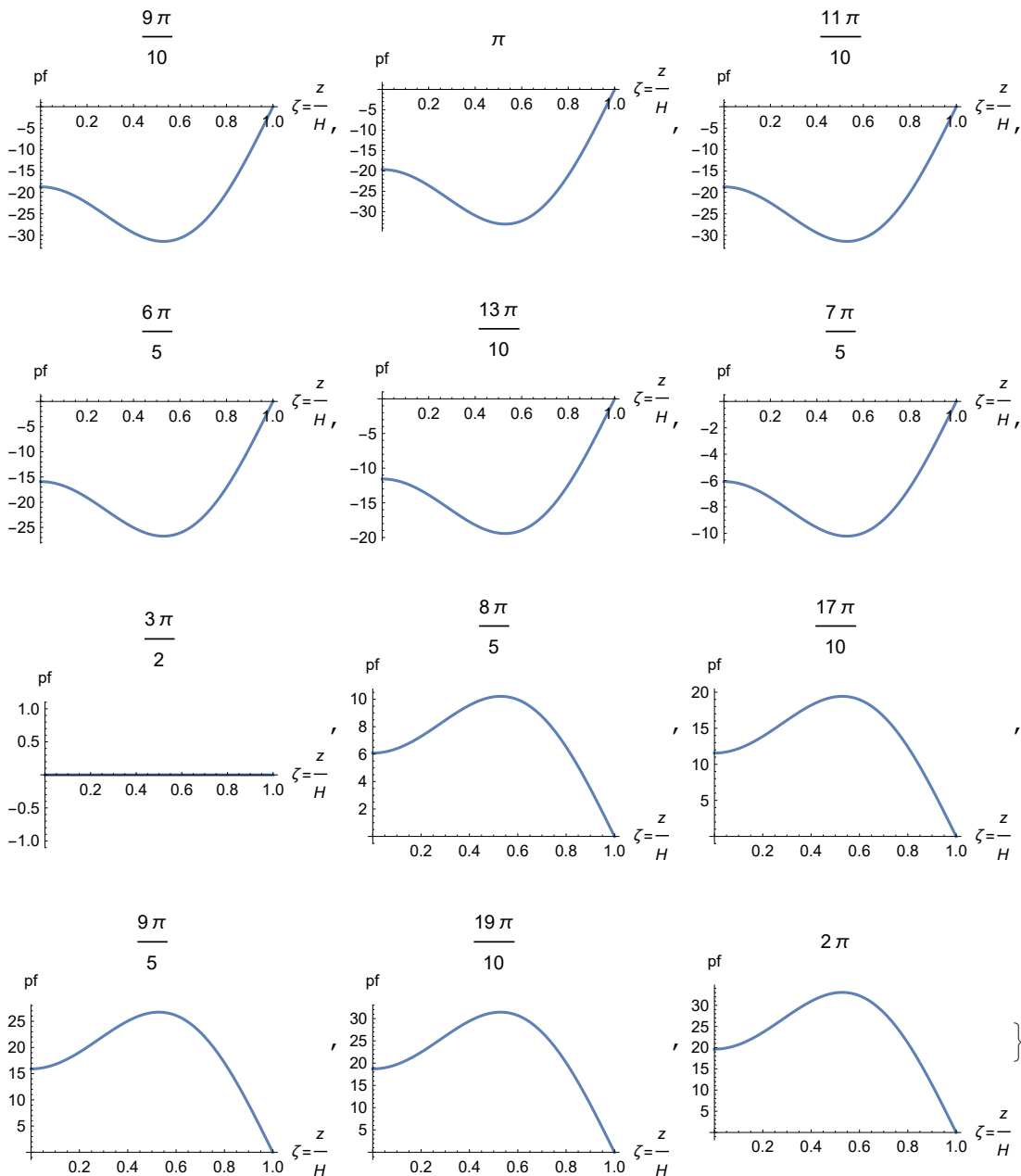
```
SystemOpen[DirectoryName[AbsoluteFileName["data.xls"]]]
```

```
pf2p.xlsx
```

```
pf1Oblika = Table[Plot[pf[\xi, \theta] 10^{-3}, {\xi, 0, 1},
```

```
  AxesLabel -> {"\xi = \frac{z}{H}", "pf"}, PlotLabel -> \theta], {\theta, 0, 2 \pi, \pi / 10}]
```





Rezultante pritiskov

$$mf = m \psi \gamma \sum_{n=0}^{100} \frac{(-1)^n}{\nu n} dn$$

$$4.19731 \times 10^6$$

$$Qf = mf Afn 10^{-3}$$

$$17115.$$

$$hf = H \frac{\gamma \sum_{n=0}^{100} dn \frac{(-1)^n \nu n - 2}{\nu n^2} + \sum_{n=0}^0 \frac{dn \, dI1[\nu n/\gamma]}{\nu n}}{\gamma \sum_{n=0}^{100} dn \frac{(-1)^n}{\nu n}}$$

12.1314

Mf = Qf hf

207 630.

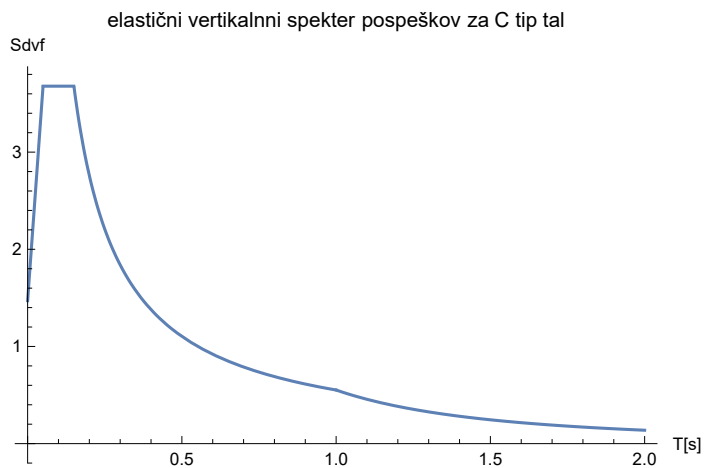
B.3.2 Vertikalna potresna obtežba

 $f\gamma = 1.078 + 0.274 \text{ Log}[\gamma]; \nu = 0.3;$

$$\gamma_1 = \frac{\pi}{2\gamma};$$

 $I0[x_] = \text{BesselI}[0, x];$

$$fvd = \frac{1}{4R} \left(\frac{2 \text{Em} I1[\gamma_1] s[1/3]}{\pi \rho H (1 - \nu^2) I0[\gamma_1]} \right)^{1/2};$$

 $TB = 0.05; TC = 0.15; TD = 1; \eta = 1; g = 9.81; avg = ag 0.9; q = 1.5;$
 $\text{Sdvf}[T_] = \text{Piecewise}[\{\{avg (2/3 + T/TB (2.5/q - 2/3)), T \ge 0 \ \&\& \ T \le TB\},$
 $\{avg 2.5/q, T > TB \ \&\& \ T \le TC\}, \{avg (2.5/q) (TC/T), T > TC \ \&\& \ T \le TD\},$
 $\{avg (2.5/q) (TC TD/T^2), T > TD\}\};$
 $\text{Plot}[\text{Sdvf}[T], \{T, 0, 2\}, \text{AxesLabel} \rightarrow \{ "T[s]", "Sdvf" \},$
 $\text{PlotLabel} \rightarrow \text{"elastični vertikalni spekter pospeškov za C tip tal"}]$

 $Tvf = 1 / fvd$

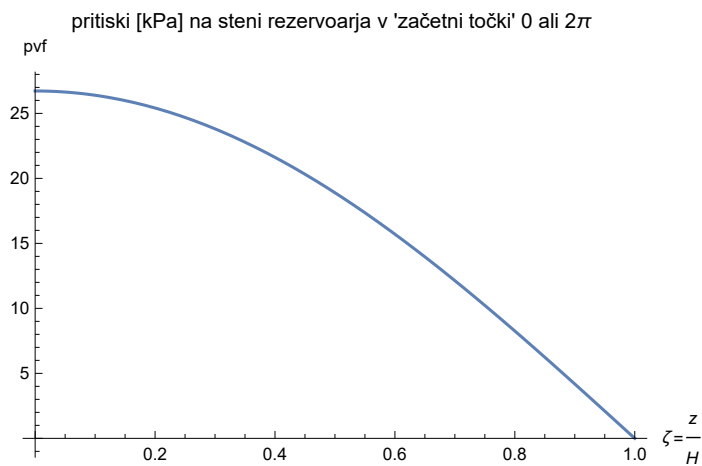
0.235428

 $Avf = \text{Sdvf}[Tvf]$

2.34387

$$pvf[\xi_] = 0.815 f\gamma \rho H \text{Cos}\left[\frac{\pi}{2} \xi\right] Avf;$$

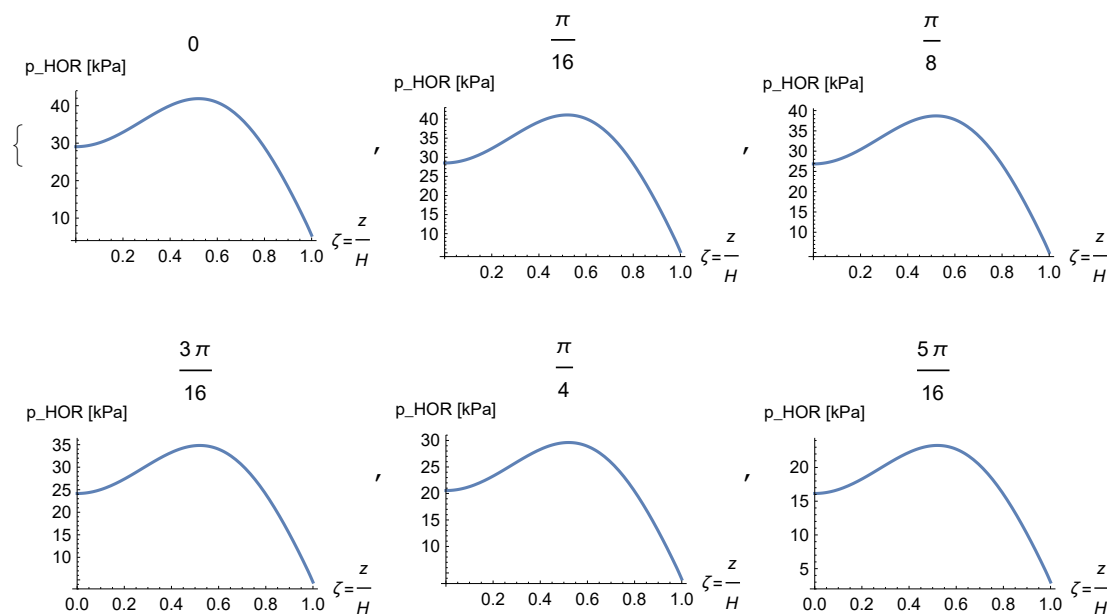
```
pvfOblika = Plot[pvf[ξ] 10-3, {ξ, 0, 1}, AxesLabel → {"ξ =  $\frac{z}{H}$ ", "pvf"}, PlotLabel → "pritiski [kPa] na steni rezervoarja v 'začetni točki' 0 ali 2π"]
```

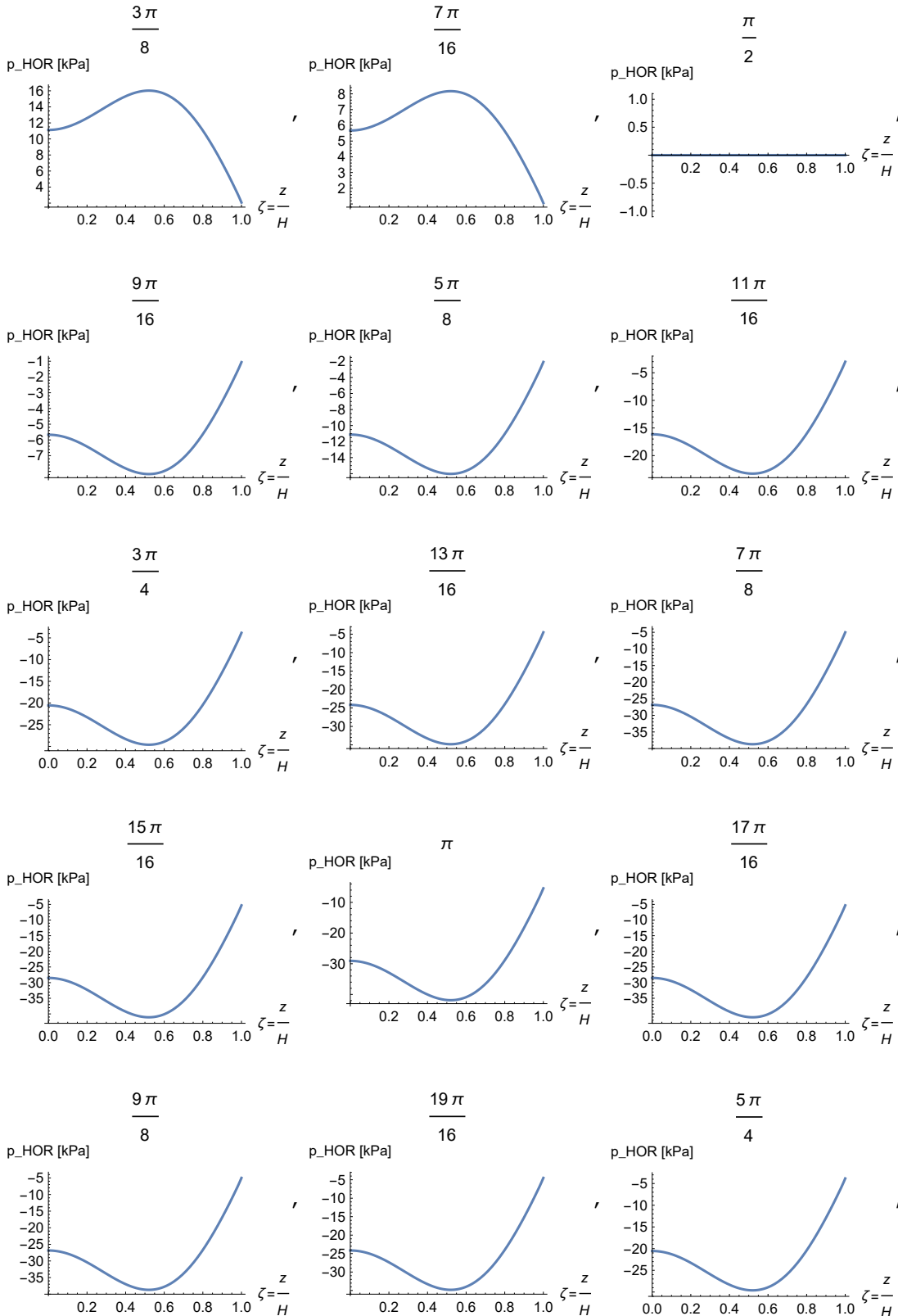


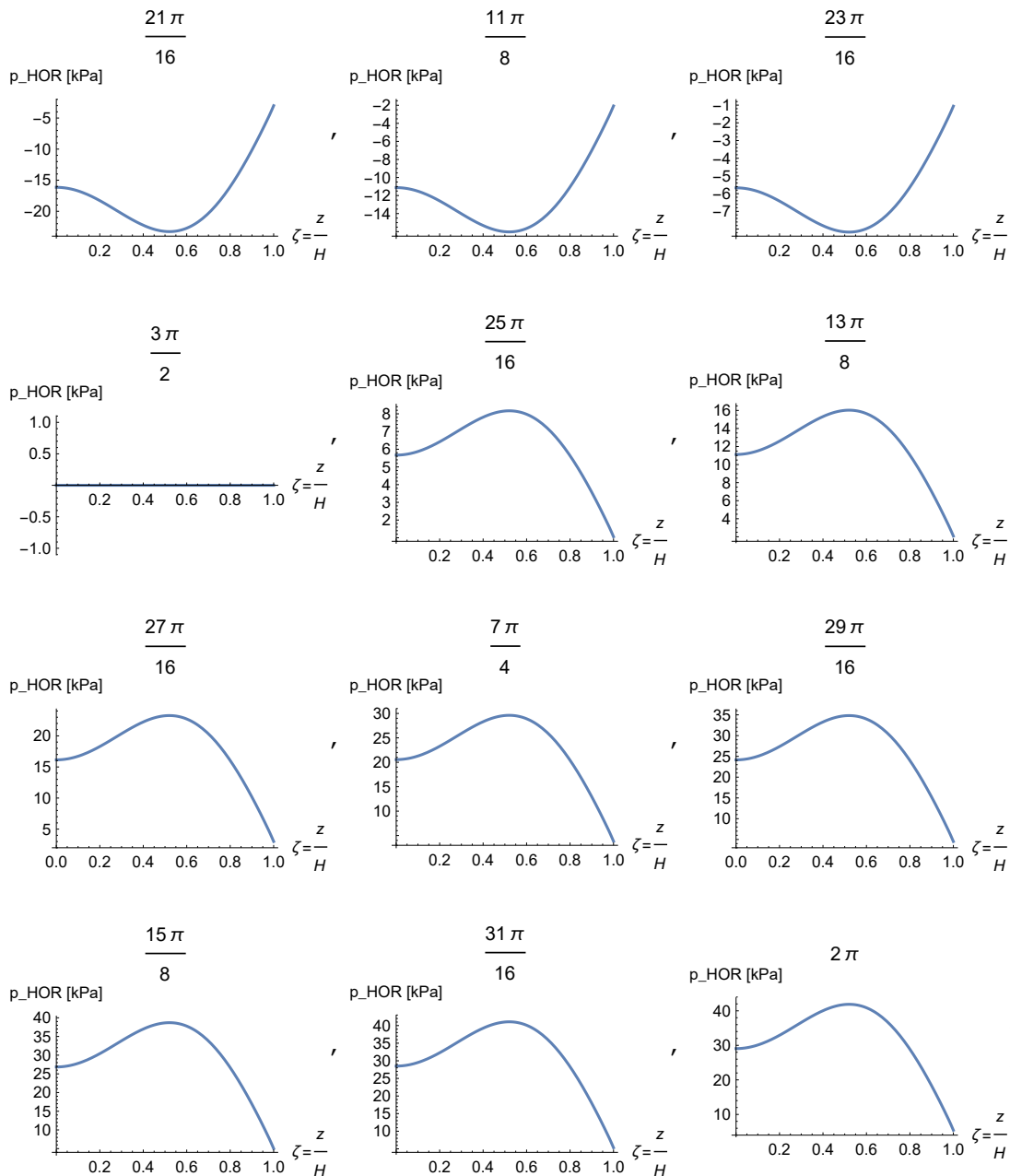
```
pvfff = Table[{pvf[ξ], ξ}, {ξ, 0, 1, 0.01}];
Export["pvf2p.xlsx", pvfff]
SystemOpen[DirectoryName[AbsoluteFileName["data.xls"]]]
pvf2p.xlsx
```

seštevek pritiskov zaradi horizontalne komponente potresa „impulsive” + “convective” + “flexible”

```
Table[Plot[pf[ξ, θ] 10-3 + pc[1, ξ, θ] 10-3 + pi[1, ξ, θ] 10-3, {ξ, 0, 1}, AxesLabel → {"ξ =  $\frac{z}{H}$ ", "p_HOR [kPa]"}, PlotLabel → θ], {θ, 0, 2π, π/16}]
```

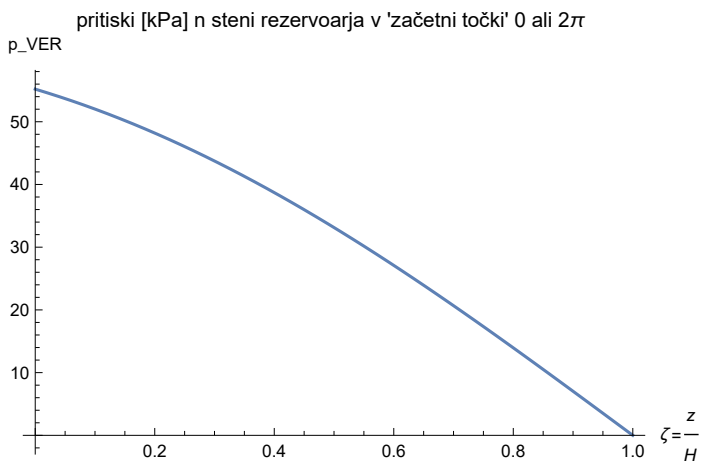






Seštevek pritiskov zaradi vertikalne komponente potresa

```
Plot[pvr[ξ] 10-3 + pvf[ξ] 10-3, {ξ, 0, 1}, AxesLabel → {"ξ =  $\frac{z}{H}$ ", "p_VER"},
PlotLabel → "pritiski [kPa] n steni rezervoarja v 'začetni točki' 0 ali 2π "]
```



Kombinacija pritiskov na steno zaradi vertikalne in horizontalne komponente potresa

Table [Plot [$p_f[\zeta, \theta] 10^{-3} + p_c[1, \zeta, \theta] 10^{-3} + p_i[1, \zeta, \theta] 10^{-3} + p_{vr}[\zeta] 10^{-3} + p_{vf}[\zeta] 10^{-3}$,
 $\{\zeta, 0, 1\}$, AxesLabel $\rightarrow \{\zeta = \frac{z}{H}, "p [kPa]"\}$, PlotLabel $\rightarrow \theta$], { $\theta, 0, 2\pi, \pi/16$ }]

