

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Jože Borovšak**

# **Projektiranje jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo**

**Diplomska naloga št.: 2871**

**Mentor:**  
prof. dr. Darko Beg

Ljubljana, 27. 2. 2006

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.014.2:624.042.7:624.95</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Jože Borovšak</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž.grad.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Projektiranje jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>105 str., 25 preg., 48 sl., 104 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>jeklene konstrukcije, cilindrični rezervoarji, potresna obtežba</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi je analizirano projektiranje jeklenih rezervoarjev po standardu prEN 1998-4. Podrobno so predstavljena mejna stanja, zahteve pri mejnem stanju nosilnosti, zahteve o zanesljivosti konstrukcije, analiza obnašanja rezervoarjev pri potresni obtežbi. Potresno obtežbo zaradi velike zapletenosti skupnega odziva analiziramo po komponentah v vertikalni in horizontalni smeri za predpostavki togih in deformabilnih rezervoarjev.

Rezervoarje razdelimo glede na togost, kar nam poenostavi razumevanje obnašanja in določitev obremenitev za posamezne komponente. Pri predpostavki togih rezervoarjev imamo tako komponento togega nihanja, ki je posledica togega horizontalnega premika sten in komponento valovanja, ki nastane zaradi vodoravnega gibanja rezervoarja. Pri deformabilnem rezervoarju določimo le komponento elastičnega nihanja sten rezervoarja, ki nastane zaradi elastičnega nihanja sten relativno glede na temelj. Komponente nato med seboj kombiniramo, da dobimo čim realnejši odziv konstrukcije. Kombinirane vrednosti obremenitev uporabimo za določitev napetosti v plašču rezervoarja in potem za kontrolo plastične porušitve prereza, kontrolo elastičnega izbočenja in kontrolo plastičnega izbočenja (»slonova noga«). Posamezne komponente in medsebojne primerjave njihovih vplivov so prikazane grafično in s komentarji. Za primerjavo obtežbe in kontrol je predstavljen postopek določitve po standardu API 650, dodatek E.

Za prikaz projektiranja jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo je na podlagi primera obstoječega rezervoarja izdelan celoten račun potresne obtežbe, kombinacij, napetosti in potrebnih kontrol po postopku prEN 1998-4 in po API 650, Dodatek E.

## **BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 624.014.2:624.042.7:624.95  
**Author:** Jože Borovšak  
**Supervisor:** prof. dr. Darko Beg  
**Title:** Design of steel tanks for seismic loading  
**Notes:** 105 p., 25 tab., 48 fig., 104 eq.  
**Key words:** steel structures, cylindrical tanks, earthquake loading

### **Abstract**

Diploma analyses steel cylindrical tanks design according to prEN 1998-4 standard. Emphasis is given to limit states, ultimate limit state requirements, reliability differentiation requirements and analysis of tanks behaviour at seismic loading. Seismic loading is due to great complexity of mutual response analysed by components in vertical and horizontal directions at presumption of rigid and deformable tanks.

Tanks are divided into groups according to rigidity which enabled us easier understanding of behaviour and defining loading for individual components. With presumption of rigid tanks we have rigid impulsive component that is consequence of horizontal movement of walls and component of sloshing that is caused by horizontal movement of tank. With deformable tank we define only the flexible component of tank walls that are caused by flexible moving of walls relative to base. Components are then mutually combined in order to get more realistic response of construction. Combined values of loads are used to define stresses in tank shell and afterwards to verification of plastic limit, elastic buckling and elastic-plastic collapse (elephant's foot). Individual components and mutual comparison of their influences are depicted graphically and using comments. To compare loading and verification, procedure for defining, according to API 650 (Annex E) standard, is presented.

To present design of steel tanks for seismic loading complete calculation of seismic loading, combinations, stresses and verifications needed according to procedure prEN 1998-4 and API 650 (Annex) E has been made.

## **ZAHVALA**

Najprej bi se rad zahvalil mentorju prof. dr. Darku Begu za vodenje in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvala gre tudi sodelavcem Katedre za metalne konstrukcije, ki so mi s svojimi konstruktivnimi komentarji ali kako drugače pomagali pri delu.

Zahvalil bi se tudi mojim staršem, ki so mi v letih študija stali ob strani in me vzpodbujali ter mi bili na voljo, ko sem jih potreboval.

## KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....	V
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION .....	VI
ZAHVALA .....	VII
KAZALO VSEBINE .....	IX
KAZALO SLIK .....	XIII
KAZALO TABEL .....	XIV
1 UVOD .....	1
1.1 Splošno o rezervoarjih .....	1
1.2 Dinamični odziv rezervoarjev .....	2
1.3 Pregled diplomske naloge .....	4
2 PROJEKTIRANJE JEKLENIH REZERVOARJEV PO prEN 1998-4 .....	7
2.1 Uvod in področje .....	7
2.2 Mejna stanja .....	7
2.2.1 Splošno .....	7
2.2.2 Mejno stanje nosilnosti .....	8
2.2.3 Mejno stanje uporabnosti .....	8
2.2.4 Zanesljivost konstrukcije .....	8
2.3 Potresna obtežba .....	9
2.3.1 Horizontalno potresno vzbujanje .....	9
2.3.2 Vertikalno potresno vzbujanje .....	11
2.4 Hidrodinamična obtežba .....	12
2.5 Analiza .....	13
2.5.1 Izhodišča za dimenzioniranje .....	13
2.5.2 Dušenje .....	13
2.5.3 Faktor obnašanja konstrukcije .....	14
2.5.4 Hidrodinamični efekt .....	14
2.5.5 Kontrole mejnih stanj .....	14
2.6 Togi vertikalni krožni rezervoarji, sidrani v temelj .....	15
2.6.1 Vodoravno potresno vzbujanje .....	15
2.6.2 Vertikalna komponenta potresnega vzbujanja krožno togega rezervoarja .....	25
2.7 Deformabilni vertikalni krožni rezervoarji, sidrani v temelj .....	26

2.7.1	<i>Horizontalna komponenta potresnega vzburjanja</i> .....	26
2.7.2	<i>Vertikalna komponenta potresne obtežbe</i> .....	28
2.8	Kombinacije vplivov .....	29
2.8.1	<i>Kombinacije vplivov horizontalnih komponent</i> .....	29
2.8.2	<i>Kombinacija vpliva vertikalne potresne obtežbe</i> .....	35
2.8.3	<i>Kombinacija vplivov horizontalne in vertikalne potresne obtežbe</i> .....	35
2.9	Napetosti v plašču pri potresni obtežbi .....	36
2.9.1	<i>Horizontalna potresna obtežba</i> .....	36
2.9.2	<i>Vertikalna potresna obtežba</i> .....	36
2.10	Projektne vrednosti napetosti .....	38
2.10.1	<i>Nosilnosti prereza (trajno projektno stanje)</i> .....	38
2.10.2	<i>Stabilnosti plašča (potresno projektno stanje)</i> .....	39
2.11	Kontrole za jeklene rezervoarje .....	39
2.11.1	<i>Plastična nosilnost prereza (trajno projektno stanje)</i> .....	40
2.11.2	<i>Elastična izbočitev (potresno projektno stanje)</i> .....	40
2.11.3	<i>Plastična izbočitev – »Slonova noga« (potresno projektno stanje)</i> .....	42
3	NESIDRANI REZERVOARJI .....	43
3.1	Splošno.....	43
3.2	Tlačne vertikalne membranske sile in napetosti v steni zaradi dvigovanja .....	43
3.3	Dvigovanje plašča in dvignjena dolžina dna rezervoarja.....	45
3.4	Radialne membranske napetosti.....	46
3.5	Plastična rotacija dna rezervoarja .....	48
4	POTRESNA OBTEŽBA PO API 650.....	49
4.1	Splošno.....	49
4.2	Prevrnitveni moment.....	49
4.3	Odpornost proti prevrnitvi .....	50
4.4	Vertikalne tlačne napetosti v plašču.....	52
4.4.1	<i>Nesidrani rezervoarji</i> .....	52
4.4.2	<i>Sidrani rezervoarji</i> .....	54
4.4.3	<i>Največja dovoljena tlačna napetost</i> .....	54
5	PRIMERJAVE.....	56
5.1	Kombinacije momentov in prečnih sil .....	56
5.1.1	<i>Horizontalna komponenta</i> .....	56
5.1.2	<i>Vertikalna komponenta</i> .....	59
5.2	Vpliv pospeška tal na velikost potresnih sil.....	60

5.2.1	<i>Vpliv horizontalnega pospeška tal na velikost potresnih sil</i> .....	60
5.2.2	<i>Vpliv pospeška tal <math>a_{vg}</math> na spremembo velikosti hidrostatičnega pritiska</i> ....	61
5.3	Pprispevki višjih nihajnih oblik nihanja .....	62
5.3.1	<i>Vpliv druge nihajne oblike valovanja na strižno silo in upogibni moment</i> ..	62
5.4	Primerjave kontrol .....	63
5.4.1	<i>Kontrola elastične izbočitve po prEN 1998-4 in EN 1993-1-6</i> .....	63
5.4.2	<i>Kontrole plastičnega izbočenja</i> .....	65
5.4.3	<i>Primerjava nosilnosti elastične in plastične izbočitve</i> .....	66
5.4.4	<i>Primerjava potrebnih debelin za izpolnitev pogojev</i> .....	67
5.5	Primerjave količin med API 650 in prEN 1998-4 .....	70
5.5.1	<i>Prevrnitveni moment</i> .....	70
5.5.2	<i>Vpliv pospeška tal na velikost prevrnitvenega momenta</i> .....	70
5.5.3	<i>Največje dovoljene napetosti</i> .....	72
6	RAČUNSKI PRIMER PO prEN 1998-4 .....	73
6.1	Tehnični podatki primera rezervoarja.....	73
6.2	Določitev potresne obtežbe .....	73
6.2.1	<i>Togi vertikalni krožni rezervoarji, sidrani v temelj</i> .....	73
6.2.2	<i>Deformabilni vertikalni krožni rezervoarji, sidrani v temelj</i> .....	75
6.2.3	<i>Določitev potresne obtežbe po poenostavljenem postopku [8]</i> .....	76
6.3	Kombinacije vplivov .....	77
6.3.1	<i>Horizontalne komponente potresne obtežbe</i> .....	77
6.3.2	<i>Kombinacija vpliva vertikalne obtežbe</i> .....	78
6.4	Napetosti v plašču pri potresni obtežbi.....	78
6.4.1	<i>Horizontalna potresna obtežba</i> .....	78
6.4.2	<i>Vertikalna potresna obtežba</i> .....	78
6.5	Projektne vrednosti napetosti .....	80
6.5.1	<i>Kontrola nosilnosti prereza (trajno projektno stanje)</i> .....	80
6.5.2	<i>Kontrola stabilnosti plašča (potresno projektno stanje)</i> .....	80
6.6	Kontrole za jeklene rezervoarje .....	81
6.6.1	<i>Plastična nosilnost prereza (trajno projektno stanje)</i> .....	81
6.6.2	<i>Elastična izbočitev (potresno projektno stanje)</i> .....	81
6.6.3	<i>Plastična izbočitev (»slonova noga«) (potresno projektno stanje)</i> .....	82
6.6.4	<i>Elastična izbočitev – vpliv striga na izbočenje (potresno projektno stanje)</i> 83	
7	RAČUNSKI PRIMER PO API 650 .....	85
7.1	Tehnični podatki o rezervoarju.....	85
7.2	Prevrnitveni moment .....	85

7.2.1	<i>Koeficienti za določitev momenta odvisni od karakteristik rezervoarja.....</i>	85
7.2.2	<i>Deleži mas.....</i>	86
7.2.3	<i>Ročice rezultat sil.....</i>	86
7.2.4	<i>Prevrnitveni moment.....</i>	86
7.2.5	<i>Odpornost proti prevrnitvi.....</i>	87
7.2.6	<i>Vertikalna tlačna sila zaradi lastne teže.....</i>	87
7.2.7	<i>Vertikalne tlačne napetosti v plašču.....</i>	87
7.2.8	<i>Največja dovoljena tlačna napetost.....</i>	87
7.2.9	<i>Dejanske napetosti v plašču.....</i>	88
7.2.10	<i>Kontrola.....</i>	88
8	ZAKLJUČEK IN SKLEPNE UGOTOVITVE.....	89
	SEZNAM LITERATURE.....	91
	PRILOGE.....	93
	Priloga A: Pregled projektiranja jeklenih rezervoarjev po prEN 1998-4.....	93
	Priloga B: Debelina stene rezervoarja za različne pospeške tal in material.....	95



## KAZALO SLIK

Slika 1.1: Togo nihanje rezervoarja.....	2
Slika 1.2: Valovanje tekočine.....	2
Slika 1.3: Elastično nihanje plašča.....	3
Slika 1.4: Elastična izbočitev.....	4
Slika 1.5: »Slonova noga«.....	4
Slika 2.1: Normirani elastični spekter za horizontalno vzbujanje.....	11
Slika 2.2: Normirani elastični spekter za vertikalno potresno vzbujanje.....	12
Slika 2.3: Delež mase $m_i$ pri togem nihanju.....	16
Slika 2.4: Ročica $h_i$ za določitev momentov.....	17
Slika 2.5: Ročica $h'_i$ za določitev momenta.....	18
Slika 2.6: Odvisnost nihajnega časa $T_{c1}$ valovanja od radija $R$ in razmerja $\gamma$ .....	19
Slika 2.7: Delež mas $m_{c1}$ in $m_{c2}$ pri valovanju tekočine.....	20
Slika 2.8: Ročice $h_{c1}$ in $h_{c2}$ za določitev momenta tik nad dnom rezervoarja $M_c$ .....	21
Slika 2.9: Ročice $h'_{c1}$ in $h'_{c2}$ za določitev momenta tik pod dnom rezervoarja $M'_c$ .....	22
Slika 2.10: Višina vala $d_{\max}$ v odvisnosti od pospeška $a_g$ in radija $R$ .....	23
Slika 2.11: Višina vala tekočine $d_{\max}$ .....	23
Slika 2.12: Odvisnost nihajnega časa sistema $T_f$ od radija $R$ in razmerja $\gamma$ .....	27
Slika 2.13: Odvisnost vertikalnega nihajnega časa $T_{vf}$ od radija $R$ in razmerja $\gamma$ .....	28
Slika 2.14: Prikaz neustrezne redukcije strižne sile $Q$ .....	31
Slika 3.1: Razmerje $k$ tlačnih napetosti $N_{nesidrano} / N_{sidrano}$ .....	44
Slika 3.2: Največje dvigovanje roba rezervoarja $w_{\max}$ .....	45
Slika 3.3: Dolžina dvignjenega dela $L$ v odvisnosti od dviga na robu $w_{\max}$ .....	46
Slika 3.4: Membranske napetosti v podnici $\sigma_{rb}$ .....	47
Slika 3.5: Skica določitve rotacije plastičnega členka $\theta$ .....	48
Slika 4.1: Izkoriščenost podnice rezervoarja v odvisnosti od radija rezervoarja.....	51
Slika 4.2: Normirani pogoj sidranja rezervoarjev $\left( \frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t) \cdot 1,57} \right)$ .....	53
Slika 4.3: Dejanske in dovoljene tlačne napetosti v plašču.....	55

Slika 5.1: Kombinirane vrednosti za $R = 10\text{ m}$ in $s = 0,01\text{ m}$ .....	56
Slika 5.2: Kombinirane vrednosti $R = 10\text{ m}$ in $s = 0,02\text{ m}$ .....	57
Slika 5.3: Kombinirane vrednosti za $R = 10\text{ m}$ in $s = 0,01\text{ m}$ .....	57
Slika 5.4: Kombinirane vrednosti za $R = 10\text{ m}$ in $s = 0,02\text{ m}$ .....	58
Slika 5.5: Velikost strižne sile $Q$ za različne radije $R$ .....	59
Slika 5.6: Vpliv razmerja $\gamma$ na hidrostatično obtežbo.....	60
Slika 5.7: Prevrnitveni moment $M$ odvisen od pospeška tal $a_g$ za $R = 10\text{ m}$ in $s = 0,01\text{ m}$ .	61
Slika 5.8: Strižna sila $Q$ odvisna od pospeška tal $a_g$ za $R = 10\text{ m}$ in $s = 0,01\text{ m}$ .....	61
Slika 5.9: Vpliv pospeška $a_{vg}$ na velikost hidrostatičnih pritiskov $p_{v,max}$ ( $\Delta H_{nad}$ ) .....	62
Slika 5.10: Vpliv druge nihajne oblike valovanja.....	63
Slika 5.11: Elastično izbočenje - nosilnost $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$ za $H = 10\text{ m}$ in $s = 0,01\text{ m}$ .....	64
Slika 5.12: Elastično izbočenje - nosilnost $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$ za $H = 20\text{ m}$ in $s = 0,015\text{ m}$ .....	64
Slika 5.13: Elastično izbočenje - nosilnost $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$ za $H = 30\text{ m}$ in $s = 0,015\text{ m}$ .....	65
Slika 5.14: Plastično izbočenje – nosilnost $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$ za $H = 10\text{ m}$ in $s = 0,012\text{ m}$ .....	66
Slika 5.15: Primerjava elastičnega in plastičnega izbočenja za $H = 10\text{ m}$ in $s = 0,015\text{ m}$ ....	67
Slika 5.16: Potrebna debelina stene $s$ za $H = 30\text{ m}$ in $f_y = 49\text{ kN/cm}^2$ .....	68
Slika 5.17: Potrebna debelina stene $s$ za $H = 20\text{ m}$ in $f_y = 49\text{ kN/cm}^2$ .....	69
Slika 5.18: Primerjava prevrnitvenih momentov med API 650 in prEN 1998-4.....	70
Slika 5.19: Prevrnitveni moment za $R = 10\text{ m}$ in različne pospeške tal $a_g$ .....	71
Slika 5.20: Prevrnitveni moment za $R = 50\text{ m}$ in različne pospeške tal $a_g$ .....	71
Slika 5.21: Največje dovoljene napetosti.....	72

## KAZALO TABEL

Tabela 2.1: Razred pomembnosti konstrukcije $\gamma_I$ .....	9
Tabela 2.2: Vrednosti koeficientov v odvisnosti od razreda temeljnih tal.....	10
Tabela 2.3: Koeficienti za elastični spekter vertikalnega potresnega vzbujanja.....	12
Tabela 2.4: Redukcijski koeficient $\varepsilon_0$ .....	31
Tabela 2.5: Koeficienti za poenostavljeno metodo.....	34

## **1 UVOD**

Potresi povzročajo veliko škode na konstrukcijah, zaradi česar so lahko potencialno nevarne za človeška življenja in okolje, v kolikor jih ne projektiramo na potresno obtežbo, s tem pa med manjšim potresom zagotovimo sorazmerno majhno škodo na objektih in v okolju, v primeru močnih potresov pa predvsem varovanje človeških življenj kot tudi potencialne ekološke katastrofe. Po naravnih nesrečah, med katere spada tudi potres, je najpomembnejša zagotovitev oskrbe s pitno vodo in energijo. Rezervoarji za hranjenje tekočin, v katerih je lahko voda, gorivo ali druge tekočine, morajo glede na projektirano pomembnost zagotoviti ustrezno mejo uporabnosti po delovanju potresne obtežbe. Iz tega nastane izziv, kako projektirati konstrukcijsko čim enostavnejše rezervoarje ob najmanjši porabi materiala in energije, s tem da bodo med normalno uporabo in po potresu še vedno uporabni, kot je bilo predvideno pri načrtovanju.

V diplomski nalogi je analizirano projektiranje jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo po standardu prEN 1998-4. Naloga obravnava določitev obremenitev zaradi potresne obtežbe in kontrolo mejnega stanja nosilnosti. Prikazane so tudi različne primerjave in vplivi posameznih komponent na velikost obtežbe ter vplive spreminjanja določenih faktorjev.

### ***1.1 SPLOŠNO O REZERVOARJIH***

Rezervoarji so velike posode, namenjene shranjevanju različnih tekočin, kot je nafta in njeni derivati, kemikalije za uporabo v industriji, voda za oskrbo ali kot požarnovarnostna zaščita, mleko v agroživilski industriji in druge tekočine, ki jih hranimo v velikih količinah.

Rezervoarji so običajno pokončne cilindrične oblike, plašč je glede na dimenzije rezervoarja relativno tanek in je sestavljen iz posameznih jeklenih plošč, ki so zvarjene ali pa zakovičene.

Sestavljen je iz več konstrukcijskih sklopov, katere delimo na:

- temelj rezervoarja in sidranje plašča v temelj,
- dno rezervoarja,
- plašč rezervoarja,
- streha rezervoarja,
- sekundarni konstrukcijski elementi (podesti, stopnice, priključki cevovodov).

Pri projektiranju rezervoarjev moramo dobro poznati obnašanje rezervoarjev pri različnih obtežbah. Potresna obtežba je dinamična, zato je tudi odziv konstrukcije na obtežbo

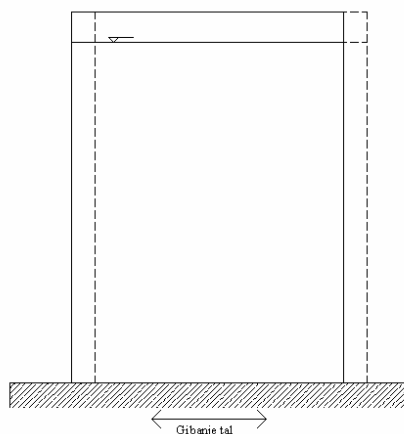
dinamičen. Rešitve enačb, ki opisujejo odziv rezervoarjev na potresno obtežbo, so že za enostavne primere zelo zapletene, za kompleksnejše primere pa ni nujno da obstajajo. Odziv obnašanja rezervoarjev je zelo kompleksen, zato standard obravnava ločeno posamezne odzive, katere nato kombiniramo po pravilih, da se čim bolj približamo realnemu odzivu.

## 1.2 DINAMIČNI ODZIV REZERVOARJEV

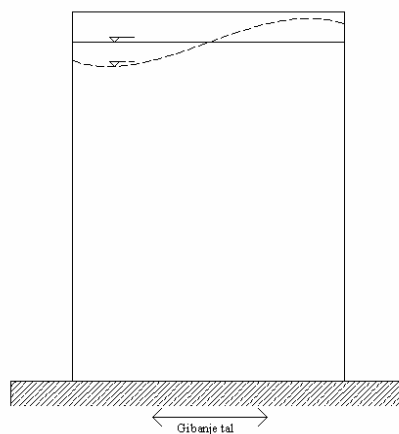
Dinamični odziv rezervoarjev je odvisen od togosti lupine rezervoarja in sidranja v temelj, ter vrste temeljenja. Na grobo delimo rezervoarje v tri skupine:

- togi vertikalni rezervoarji, sidrani v temelj,
- deformabilni vertikalni rezervoarji, sidrani v temelj,
- nesidrani vertikalni rezervoarji.

Predpostavka togega rezervoarja pomeni, da med potresom rezervoar ne spreminja svoje geometrije glede na projektirano. Pri odzivu na potresno obtežbo pri togih rezervoarjih obravnavamo dve komponenti, ki prispevata k horizontalnih obremenitvam in eno komponento, ki prispeva k povečanju vertikalnih pritiskov. Horizontalna komponenta je sestavljena iz togega nihanja rezervoarja in valovanja tekočine. Komponenta togega nihanja predstavlja horizontalno togo nihanje, pri katerem zaradi pospeškov tal nastanejo pritiski in srki na stene rezervoarja, katerih rezultante so strižne obremenitve pri dnu in prevrtni moment z tendenco prevrnitve. Valovanje zgornjega dela tekočine v rezervoarju prav tako povzroča pritiske na stene rezervoarja, ki povzročajo strižno silo in prevrtni moment pri dnu rezervoarja. Grafično je togo nihanje in valovanje predstavljeno na sliki 1.1 in sliki 1.2.

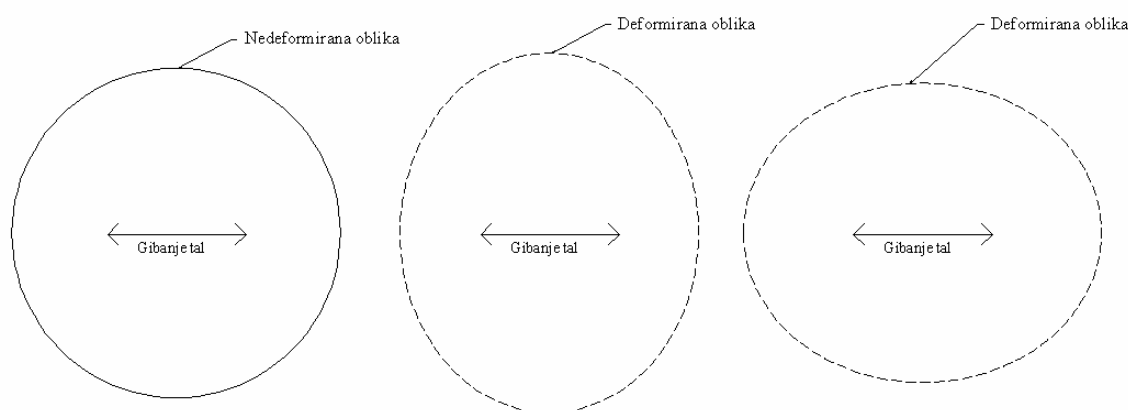


Slika 1.1: Togo nihanje rezervoarja



Slika 1.2: Valovanje tekočine

Vertikalna komponenta potresne obtežbe je odvisna le od vertikalnega pospeška tal, kar predstavlja povečanje ali zmanjšanje hidrostatičnih pritiskov zaradi spremembe teže tekočine. Pri deformabilnih rezervoarjih je upoštevana deformabilnost plašča, kar velja skoraj za vse jeklene rezervoarje. Pri tej komponenti nastopajo obremenitve zaradi deformacij oblike rezervoarja v tlorisni obliki glede na osnovno obliko. Zaradi nihanj nastanejo na plašč veliki pritiski, ki povzročajo strižne obremenitve in prevrtni moment. Pri deformiranih oblikah je v računih upoštevana le prva nihajna oblika, ki je prikazana na sliki 1.3. Rezervoar niha iz ene skrajno deformirane lege v drugo. Nihajna oblika je v računih zajeta z nihajnim časom.



**Slika 1.3: Elastično nihanje plašča**

Vertikalna komponenta pri deformabilnih rezervoarjih zajema pri vertikalnih pospeških tal tudi radialno deformabilnost plašča, zaradi katere na plašč delujejo večji hidrostatični pritiski, kot v predpostavki togega rezervoarja.

Dinamični odziv rezervoarja na potresno obtežbo je kombinacija komponent togega in deformabilnega rezervoarja, zato projektne obremenitve dobimo s kombinacijo posameznih komponent pri teh predpostavkah. Več avtorjev predlaga različne kombinacije, ki nam dajo bolj ali manj podobne rezultate obremenitev rezervoarja pri potresni obtežbi.

Na podlagi obremenitev rezervoarja preverjamo stabilnost rezervoarja, ki se lahko poruši v treh oblikah. Prva je plastična porušitev prereza, ko je izkoriščena plastična nosilnost prereza, druga oblika je klasično elastično izbočenje zaradi tlačnih membranskih napetosti v plašču, le da imamo v potresnem obtežnem primeru ugoden vpliv delovanja notranjega pritiska, ki stabilizacijsko deluje na izbočenje, tretja oblika porušitve pa je tako imenovana »slonova noga«, do katere pride ob hkratnem delovanju tlačnih membranskih napetosti v plašču in

velikih notranjih hidrostatičnih pritiskov. Grafično so oblike porušitve prikazane na sliki 1.4 in sliki 1.5.



**Slika 1.4: Elastična izbočitev**



**Slika 1.5: »Slonova noga«**

Pri nesidranih rezervoarjih lahko pride zaradi prevrtnenega momenta do dvigovanja plašča pri dnu, zaradi česar v plašču in podnici nastanejo povečane membranske napetosti. Povečanje membranskih napetosti, dvigovanje plašča in dolžina dvignjenega dela je odvisna od karakteristik rezervoarja. Te količine za različna razmerja in obremenitve rezervoarja določimo na podlagi empirično določenih grafov dobljenih z numeričnimi parametričnimi študijami v poglavju 3.

### ***1.3 PREGLED DIPLOMSKE NALOGE***

V diplomski nalogi je analizirano projektiranje jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo po standardu prEN 1998-4.

V drugem poglavju je na splošno predstavljen problem, katera mejna stanja je potrebno zagotoviti, predstavljeni so projektni spektri za horizontalno in vertikalno potresno vzbujanje, kateri so osnova pri določanju obremenitev na rezervoar. Po komponentah so določene potresne obtežbe za toge in deformabilne rezervoarje v horizontalni in vertikalni smeri, katere nato kombiniramo, da dobimo čim bolj realen odziv rezervoarja na potresno obtežbo. Na podlagi kombiniranih vrednosti komponent določimo napetosti v plašču zaradi potresne

obtežbe, kot tudi zaradi stalnih vplivov, lastne teže strehe in plašča, snega ter hidrostatičnega pritiska tekočine. Te napetosti kombiniramo v skladu s standardom EN 1991-1 in EN 1998-1, ki jih nadalje uporabimo za kontrolo nosilnosti prereza, izbočenja in kontrole elastoplastične porušitve prereza (»slonova noga«).

V tretjem poglavju so predstavljeni nesidrani rezervoarji, kjer so na podlagi parametričnih študij predstavljeni grafi, na podlagi katerih lahko določimo povečanje tlačnih napetosti v plašču, v primeru, da plašča rezervoarja ne sidramo v temelj. Podobno je iz grafov mogoče določiti dolžino dvignjenega dela rezervoarja v odvisnosti od višine in radija, ter brezdimezionalnega prevrnitvenega momenta.

V četrtem poglavju je predstavljena določitev potresne obtežbe po ameriškem standardu API 650 Dodatek E. Postopek predpisuje določitev potresne obtežbe v odvisnosti od parametrov rezervoarja. Podane so kontrole, katere morajo biti izpolnjene, da je rezervoar stabilen.

V petem poglavju so narejene primerjave določitve potresne obtežbe po prEN 1998-4. Ločeno so obdelane različne kombinacije momentov in prečnih sil, prikazan je vpliv pospeška tal na velikost potresnih obremenitev, primerjave kontrol stabilnosti po različnih postopkih ter primerjave količin med standardoma prEN 1998-4 in API 650.

V šestem poglavju je narejen računski primer za dejansko izveden rezervoar na območju Kopra po prEN 1998-4. Izveden je celoten postopek od določitve potresnih obremenitev, napetosti v plašču do kontrol, katere morajo biti izpolnjene, da je rezervoar stabilen.

V sedmem poglavju je računski primer za enak rezervoar kot v šestem poglavju, le da sta računski postopek in kontrole izvedena po standardu API 650, Dodatek E.

V osmem poglavju je grafično predstavljen postopek določitve potresne analize po standardu EN 1998-4, nakar v devetem navajamo ugotovitve in zaključke glede projektiranja jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo po standardu prEN 1998-4.





## **2 PROJEKTIRANJE JEKLENIH REZERVOARJEV PO prEN 1998-4**

### **2.1 UVOD IN PODROČJE**

Postopki potresne analize za rezervoarje, podvržene vodoravnemu in navpičnemu vzbujanju tal z naslednjimi lastnostmi:

- cilindrična oblika, vertikalna os, krožni ali pravokotni presek,
- togo ali elastično temeljenje,
- polno ali delno sidranje v temeljno ploščo.

Zapletena analiza fenomena dinamičnega sodelovanja gibanja vsebine rezervoarja (fluida), deformacij sten rezervoarja in temeljnih tal, upoštevajoč možno dvigovanje rezervoarja, je problem znatne analitične zapletenosti in zahteva veliko računskih raziskav. Čeprav so rešitve enostavnih primerov odziva na potresno obtežbo znani iz zgodnjih sedemdesetih let, postopek razvoja bolj zapletenih in natančnih odzivov še vedno ni končan.

Numerične analize, ki so objavljene v [3], [13] in [15], ponujajo bolj ali manj približke za posebne projektne situacije. Njihova natančnost je v veliki meri odvisna od izkušenj oziroma zahteva dobro poznavanje in izkušnje projektanta.

Potrebna omejitev v obsegu in prostoru tega dodatka ne dopušča poglobljene razlage preko meje natančne predstavitve postopka projektiranja za enostavne od vseh primerov: krožni rezervoar sidran v togo podlago. Za vse situacije kjer je problem bolj zapleten, kot na primer elastičnost podlage rezervoarja, način sidranja, so rešitve enačbe takšnega sistema komplicirane in predolge ali pa celo ne obstajajo. Z načinom sidranja lahko preprečimo samo dvigovanje plašča ali pa tudi rotacijo na s tiku s podnico, kar ima za posledico različne robne pogoje v enačbah in obnašanju rezervoarja.

### **2.2 MEJNA STANJA**

#### **2.2.1 Splošno**

Standard obravnava konstrukcije, ki se lahko razlikujejo po njenih osnovnih značilnostih:

- vrsta in količina shranjenih proizvodov in potencialna nevarnost,
- posebne zahteve med in po potresu,
- pogoji varovanja okolja.

### 2.2.2 Mejno stanje nosilnosti

Mejno stanje nosilnosti za vsak preverjen konstrukcijski sistem je definirano kot izguba obratovalne sposobnosti konstrukcijskega sistema, z možnostjo popravila v mejah sprejemljivih stroškov.

Projektna potresna obtežba  $A_{Ed}$  je izražena kot: a) referenčna potresna obtežba  $A_{Ek}$  (EN 1998-1: 2004, 2.1(1)P in 3.2.1(3)) in b) faktor pomembnosti konstrukcije  $\gamma_I$ , ki je določen v (EN 1990: 2002 in EN 1998-1: 2004, 2.1(2)P, 2.1(3)P in 2.1(4)P) z upoštevanjem zanesljivosti konstrukcije, katero upoštevamo z razvrščanjem konstrukcije v različne razrede pomembnosti.

$$A_{Ed} = \gamma_I \cdot A_{Ek} \quad (2.1)$$

Konstrukcijski sistemi zasnovani za obnašanje konstrukcije v nelinearnem območju so projektirani na manjše potresne obtežbe v primerjavi z elastičnim odzivom konstrukcije. Vrednosti faktorja obnašanja konstrukcije vključno z viskoznim dušenjem so za različne tipe konstrukcije podani v nadaljevanju.

### 2.2.3 Mejno stanje uporabnosti

Glede na karakteristike in predvideni namen konstrukcije mejno stanje uporabnosti zagotavlja eno ali obe od naslednjih ravni zahtev:

- popolno uporabnost (integriteto),
- minimalno raven obratovanja.

### 2.2.4 Zanesljivost konstrukcije

Mreže cevovodov, neodvisne konstrukcije, prav tako rezervoarji ali silosi morajo biti zagotovljeni s stopnjo varnosti glede na število ogroženih ljudi, ekonomske in okoljske izgube.

Za konstrukcije znotraj področja uporabe tega standarda je primerno upoštevati tri različne razrede pomembnosti, ki se nanašajo na izgubo človeških življenj zaradi porušitve delov konstrukcije ali celote, katere imajo gospodarske, družbene in okoljske posledice. Razredi pomembnosti se približno ujemajo z razredi glede na posledice CC1, CC2 in CC3 določene v 1990: 2002, Dodatek B.

- Razred I se nanaša na situacije z maloštevilnimi izgubami človeških življenj, majhno ali zanemarljivo gospodarsko, družbeno in okoljsko škodo.
- Razred II se nanaša na situacije s srednje velikimi izgubami človeških življenj, občutno gospodarsko, družbeno in okoljsko škodo.
- Razred III se nanaša na situacije s številnimi izgubami človeških življenj, veliko gospodarsko, družbeno in okoljsko škodo.

**Tabela 2.1: Razred pomembnosti konstrukcije  $\gamma_I$**

Namen konstrukcije	Razredi pomembnosti		
	Razred I	Razred II	Razred III
Oskrba s pitno vodo, nestrupene, negorljive tekočine	0,8	1,0	1,2
Voda za gašenje, nehlapljive strupene kemikalije, Nizko vnetljive kemikalije	1,0	1,2	1,4
Hlapljive strupene kemikalije, Eksplozivne in ostale visoko vnetljive tekočine	1,2	1,4	1,6

### 2.3 POTRESNA OBTEŽBA

Potresno obtežbo določimo v skladu s standardom EN 1998-1:2004, 3.2.2, kjer je določena v obliki elastičnega spektra pospeškov. Velikost projektnega pospeška je odvisna od faktorja obnašanja konstrukcije  $q$ , od vrste temeljnih tal na katerih projektiramo konstrukcijo oziroma konstrukcijski sistem, od koeficienta dušenja  $\xi$ , ter od nihajnega časa sistema, na podlagi katerega določimo pospešek iz spektra. Pospeški so ločeno obravnavani za potresno vzbujanje v horizontalni ali vertikalni smeri.

#### 2.3.1 Horizontalno potresno vzbujanje

Vrednost pospeška v horizontalni smeri v odvisnosti od nihajnega časa določimo po enačbah (2.2), (2.3), (2.4) in (2.5),

$$0 \leq T \leq T_B : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (2.2)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (2.3)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad (2.4)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (2.5)$$

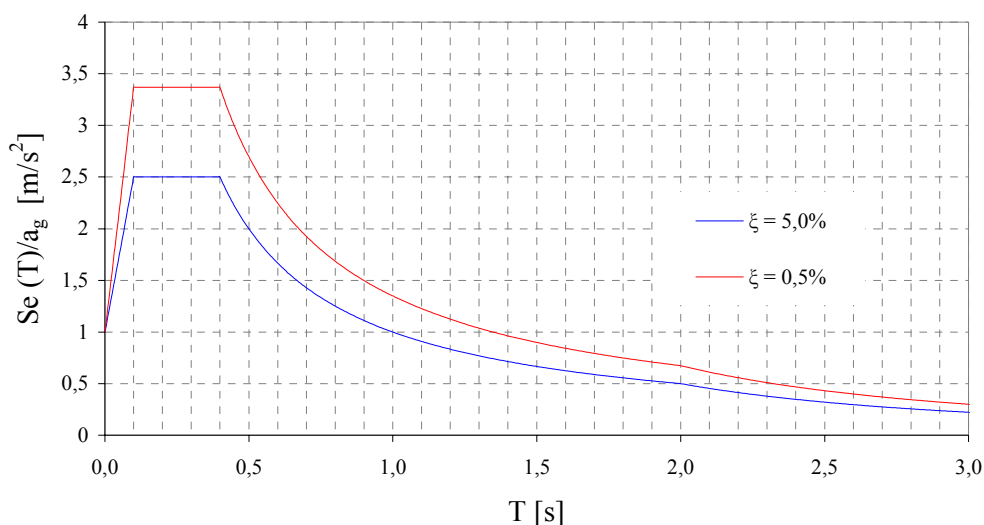
kjer je  $a_g$  projektni pospešek tal določen v karti potresne aktivnosti območja. Koeficient  $S$  kot tudi ostali odvisni od vrste tal, so zbrani v tabeli 2.2. Koeficient  $\eta$  zajema vpliv dušenja, ki ga določimo po enačbi (2.6). Vrednosti koeficientov v tabeli 2.2 za določitev elastičnega spektra so v skladu s SIST EN 1998-1-1 in pripadajočim nacionalnim dodatkom.

**Tabela 2.2: Vrednosti koeficientov v odvisnosti od razreda temeljnih tal**

Razred temeljnih tal	$S$	$T_B(s)$	$T_C(s)$	$T_D(s)$
A	1,0	0,10	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	1,7	0,10	0,4	2,0

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{(5 + \xi)}} \geq 0,55 \quad (2.6)$$

Elastični spekter odziva uporabimo enak tako za mejno stanje nosilnosti, kot za mejno stanje uporabnosti, le da za mejno stanje uporabnosti vrednosti reduciramo z faktorjem  $\nu$ , ki je odvisen od razreda pomembnosti konstrukcije. Elastični spekter odziva za horizontalno potresno vzbujanje in razred temeljnih tal  $A$  je prikazan na sliki 2.1.



**Slika 2.1: Normirani elastični spekter za horizontalno vzbujanje**

### 2.3.2 Vertikalno potresno vzbujanje

Vertikalno potresno vzbujanje upoštevamo kot povečane pritiske zaradi vertikalnih pospeškov tal. Pri vertikalno togih rezervoarjih se to odraža kot linearni hidrostatični pritisk zaradi projektnega vertikalnega pospeška tal, medtem ko pri vertikalnih deformabilnih rezervoarjih upoštevamo osnovni nihajni čas vertikalnega nihanja rezervoarja, na podlagi katerega določimo projektni pospešek iz elastičnega spektra za vertikalno potresno vzbujanje po enačbah (2.7), (2.8), (2.9) in (2.10),

$$0 \leq T \leq T_B : \quad S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right] \quad (2.7)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : \quad S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \quad (2.8)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : \quad S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \frac{T_C}{T} \quad (2.9)$$

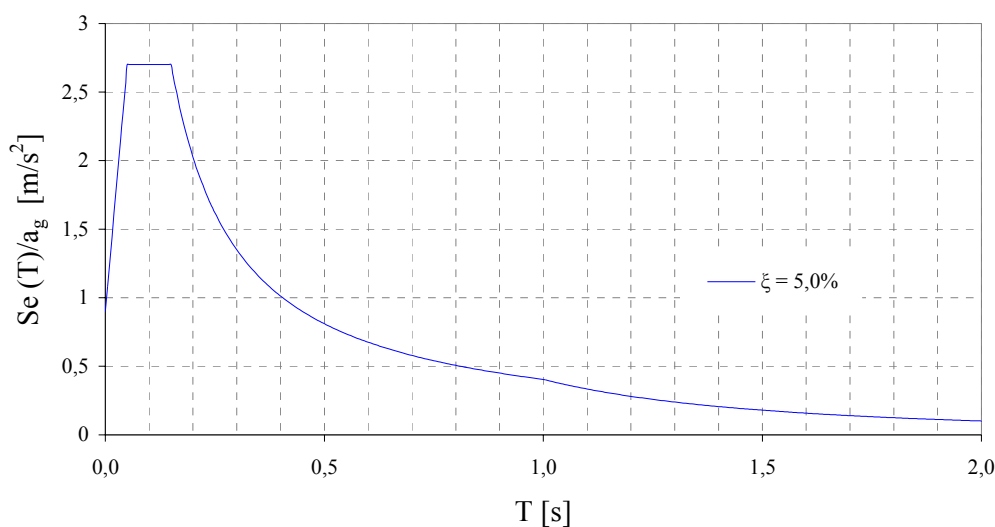
$$T_D \leq T \leq 4s : \quad S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (2.10)$$

kjer je  $a_{vg}$  delež horizontalnega vzbujanja ter koeficienti zbrani v tabeli 2.3 v skladu s standardom SIST EN 1998-1-1.

**Tabela 2.3: Koeficienti za elastični spekter vertikalnega potresnega vzbujanja**

$a_{vg} / a_g$	$T_B (s)$	$T_C (s)$	$T_D (s)$
0,9	0,05	0,15	1,0

Na sliki 2.2 je prikazan elastični spekter odziva vertikalnega potresnega vzbujanja za vrednost dušenja  $\xi = 5,0\%$ .



**Slika 2.2: Normirani elastični spekter za vertikalno potresno vzbujanje**

## 2.4 HIDRODINAMIČNA OBTEŽBA

V predlogu standarda prEN 1998-4 so pri hidrodinamični obtežbi obravnavane tri prevladujoče oblike obtežbe sidranih rezervoarjev, ki so posledica vodoravnega potresnega vzbujanja.

Prvi del obtežbe izhaja iz togega vodoravnega premika konstrukcije in vsebine, ki se imenuje »togo nihanje« (rigid impulsive mode). V tem primeru se obravnava togo gibanje konstrukcije in vsebine skupaj s tlemi.

Drugi del obtežbe izhaja iz valovanja tekočine v zgornjem delu rezervoarja. Ta del tekočine se pod vplivom potresne obtežbe ne giblje skupaj s stenami rezervoarja. Posledica takšne oblike gibanja so vertikalni pomiki tekočine, ki jih lahko primerjamo z »valovanjem« (sloshing). V

praksi lahko z dovolj veliko natančnostjo vzamemo samo prvo obliko nihanja. Tipični nihajni časi za valovanje so od 6 do 13 sekund za široke rezervoarje, dušenje tekočine pa je približno 0,5% kritičnega dušenja.

Tretji najbolj zapleteni del je »elastično nihanje« (flexible impulsive mode). Ta del obravnava gibanje sten rezervoarja in vsebine relativno na temelj rezervoarja. Tipični nihajni časi za rezervoarje s tekočino so od 0,1 do 0,6 sekunde, dušenje sistema pa je približno 5% kritičnega.

## **2.5 ANALIZA**

### **2.5.1 Izhodišča za dimenzioniranje**

Za konstrukcije znotraj področja tega standarda so vplivi potresne obtežbe v splošnem določeni na osnovi linearnega obnašanja konstrukcije in zemljine v njeni bližini.

Za mejno stanje nosilnosti uporabimo za določitev potresne obtežbe elastični spekter za horizontalno in vertikalno komponento obtežbe, določene v t.č. 2.3.1 in 2.3.2.

Analiza za določitev vplivov potresne obtežbe primerne za mejno stanje uporabnosti je elastična, z uporabo elastičnega spektra definiranega v t.č. 2.3.1 in 2.3.2 ali v EN 1998-1: 2004, 3.2.2.2 in 3.2.2.3, pomnožene z redukcijskim faktorjem  $\nu$ , ki so priporočene za razred pomembnosti I  $\nu = 0,5$  in  $\nu = 0,4$  za razreda II in III. Elastični spekter odziva je potrebno določiti za ustrezen koeficient viskoznega dušenja konstrukcije. Pri potresni obtežbi rezervoarjev je za mejno stanje uporabnosti mišljena tista potresna obtežba, ki se bo med življenjsko dobo skoraj zagotovo zgodila. To pomeni, da morajo rezervoarji takšen potres prenesti brez večjih poškodb, ki bi ogrozile obratovanje rezervoarja (oprema, priključki, cevovodi, spremljajoča sekundarna oprema...). V nadaljevanju se bomo osredotočili le na obravnavo mejnega stanja nosilnosti, ki ga obravnava prEN 1998-4.

### **2.5.2 Dušenje**

Faktor dušenja je odvisen glede na vrsto analize posameznih vplivov, kot tudi od mejnega stanja. Za dušenje konstrukcije pri analizi uporabimo naslednje vrednosti:

- mejno stanje nosilnosti:  $\xi = 5\%$ ,
- mejno stanje uporabnosti:  $\xi = 2\%$ .

Dušenje vsebine rezervoarja je odvisno od vrste tekočine, vendar se glede na podobne karakteristike med sabo ne razlikujejo preveč, tako da vzamemo za dušenje tekočine v rezervoarju vrednost  $\xi = 0,5\%$ , v kolikor ni to drugače določeno.

### **2.5.3 Faktor obnašanja konstrukcije**

Za vse konstrukcije predpostavimo faktor obnašanja konstrukcije  $q = 1,0$ , ker ni posebej predvidenih mehanizmov oziroma mest disipacije energije, v kolikor pa vzamemo višje faktorje obnašanja, moramo disipacijo energije posebej zagotoviti in ustrezno rešiti in dokazati z detajli.

### **2.5.4 Hidrodinamični efekt**

Analitične metode temeljijo na rešitvah hidrodinamičnih enačb s primernimi robnimi pogoji, ki jih uporabimo za račun odziva rezervoarjev pri potresni obtežbi. V posebnih primerih je analiza primerna za določitev:

- komponente valovanja in togega nihanja tekočine,
- deformacije plašča rezervoarja zaradi hidrodinamičnih pritiskov in interakcije s komponento togega nihanja,
- deformabilnost temeljnih tal in pripadajoč modificiran odziv,
- vpliv plavajoče strehe.

Za izračun dinamičnega odziva konstrukcije je tekočina upoštevana kot nestisljiva.

### **2.5.5 Kontrole mejnih stanj**

#### **2.5.5.1 Mejno stanje nosilnosti**

##### Globalna stabilnost

Glede na globalno stabilnost so dovoljena omejena drsenja rezervoarja po temeljni plošči, če je to predvideno pri konstruiranju, pri povezavah cevovodov z rezervoarjem.

##### Plašč

Pri kontroli plašča je potrebno zagotoviti zadostno odpornost plašča, ki bo večja od napetosti, ki nastanejo pri potresni obtežbi (strižne, normalne napetosti v steni plašča). Lahko pride do več tipov porušitve rezervoarja:



- plastična porušitev prereza,
- elastično izbočenje,
- plastično izbočenje - izbočenje zaradi vertikalnih membranskih napetosti ob hkratnem delovanju notranjega pritiska (»slonova noga«).

V nadaljevanju zaradi krajšega poimenovanja namesto plastično izbočenje – izbočenje zaradi vertikalnih membranskih napetosti ob hkratnem delovanju notranjega pritiska uporabljamo termin plastično izbočenje.

#### 2.5.5.2 Mejno stanje uporabnosti

Pri mejnem stanju uporabnosti je potrebno zagotoviti ustrezno mejo uporabnosti v skladu z ustreznimi standardi.

## **2.6 TOGI VERTIKALNI KROŽNI REZERVOARJI, SIDRANI V TEMELJ**

### **2.6.1 Vodoravno potresno vzbujanje**

Rešitev Laplaceove enačbe za gibanje vertikalnega togega krožnega rezervoarja s tekočino je izražena kot vsota dveh ločenih prispevkov komponent »tosega nihanja« in »valovanja«. Prva komponenta obravnava del, kjer se tekočina giblje skupaj z rezervoarjem, druga komponenta pa prispevek valovanja zgornjega dela tekočine.

#### 2.6.1.1 Togo nihanje

Pri togem vodoravnem nihanju na rezervoar delujeta dve obtežbi in sicer strižna sila na dnu rezervoarja  $Q_i$  ter upogibni moment tik nad dnom rezervoarja  $M_i$ , ki ima tendenco prevrnitve rezervoarja. Za določitev strižne sile ob dnu rezervoarja  $Q_i$  potrebujemo vrednost maksimalnega pospeška tal  $a_g$  na predvidenem območju.

Ker se sistem togo giblje s podlago, vzamemo za vrednost  $a_g$  kar projektni pospešek gibanja tal. Nadalje je za določitev strižne sile  $Q_i$  potrebno določiti del vsebine rezervoarja  $m_i$ , ki togo niha skupaj z rezervoarjem. Ta del je odvisen od razmerja višine polnjenja  $H$  in polmera rezervoarja  $R$ , ki ga lahko določimo po enačbi (2.11) ali pa grafično iz slike 2.3. Enačba (2.11) je določena na podlagi resultant pritiskov tekočine na stene rezervoarja pri togem nihanju sten v horizontalni smeri.

$$m_i = m_{tot} \cdot 2 \cdot \gamma \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1(v_n / \gamma)}{v_n^3 \cdot I_1'(v_n / \gamma)} \quad (2.11)$$

$m_i$  ... delež mase, ki togo niha skupaj z rezervoarjem v kg

$m_{tot} = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h$  ... celotna masa vsebine rezervoarja v kg

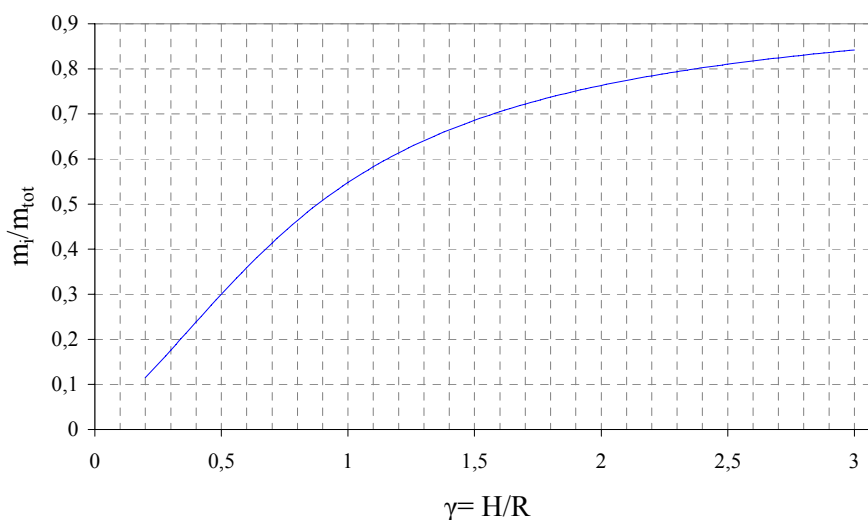
$\gamma = \frac{H}{R}$  ... razmerje višine in polmera rezervoarja

$H$  ... projektna višina polnjenja rezervoarja v m

$R$  ... polmer krožnega rezervoarja v m

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

$I_1(\cdot)$  in  $I_1'(\cdot)$  je modificirana Bessel – ova funkcija reda 1 in njen odvod



**Slika 2.3: Delež mase  $m_i$  pri togem nihanju**

Na podlagi karakteristik rezervoarja določimo delež mase  $m_i$ , projektni pospešek tal  $a_g$  določimo v skladu s EN 1998-1. Po enačbi (2.12) izračunamo največjo strižno silo  $Q_i$ , ki deluje na dnu rezervoarja.

$$Q_i = m_i \cdot a_g \quad (2.12)$$

Moment tik nad dnom rezervoarja  $M_i$  določimo kot produkt strižne sile  $Q_i$  in ročice  $h_i$ , uporabimo ga za dimenzioniranje sten rezervoarja in sidranje v temelj. Ročica  $h_i$  je odvisna

samo od razmerja višine  $H$  in radija rezervoarja  $R$ , določimo jo po enačbi (2.13) ali grafično iz slike 2.4 v  $m$ .

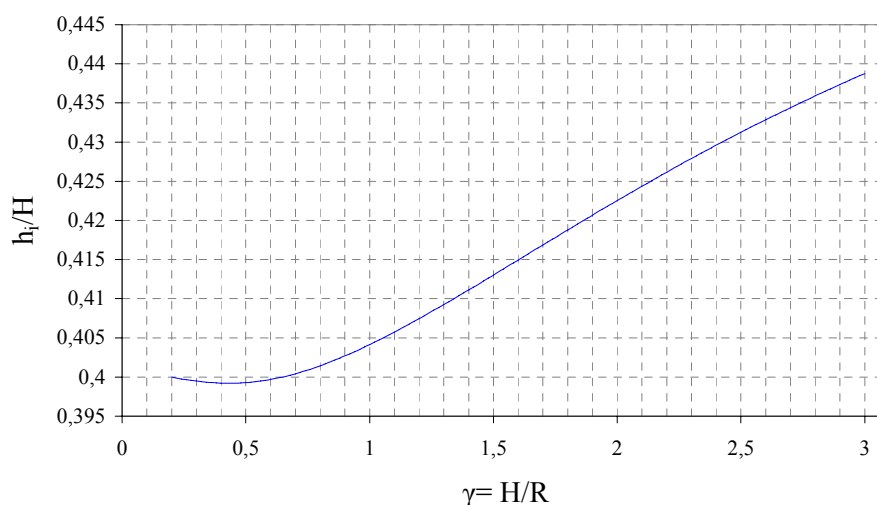
$$h_i = H \cdot \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( 1 - \frac{2(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \right) \cdot \alpha_n \right]}{\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n} \quad (2.13)$$

$$\alpha_n = \frac{16}{\pi^3} \cdot \frac{H}{R} \cdot \frac{1}{(2n-1)^3} \cdot \frac{I_1 \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{R}{H} \right]}{I_1' \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{R}{H} \right]} \quad (2.14)$$

$h_i$  ... ročica rezultante strižne sile  $Q_i$  za določitev prevrtnenega momenta  $M_i$  v  $m$

Tako je velikost prevrtnenega momenta  $M_i$  odvisna le od razmerja višine  $H$  in radija  $R$  rezervoarja, ter od velikosti projektnega pospeška tal  $a_g$ .

$$M_i = Q_i \cdot h_i = m_i \cdot h_i \cdot a_g \quad (2.15)$$



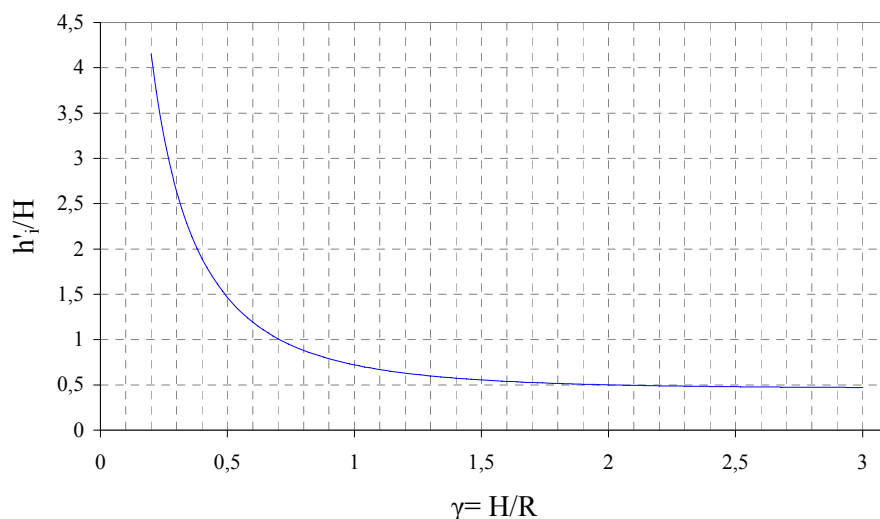
**Slika 2.4: Ročica  $h_i$  za določitev momentov**

Moment tik pod dnom rezervoarja  $M_i'$ , ki ga uporabimo za dimenzioniranje temeljev, dobimo po enačbi (2.18), tako da strižno silo  $Q_i$  iz enačbe (2.12) pomnožimo z višino  $h_i'$ , ki jo dobimo po enačbi (2.16) ali pa grafično iz slike 2.5. Višina  $h_i'$  predstavlja ročico strižne sile  $Q_i$  tekočine pod dno rezervoarja, ki se togo giblje skupaj z rezervoarjem.

$$h'_i = H \cdot \left( \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n}{\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n} + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( 1 - \frac{2(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \right) \cdot \alpha_n \right]}{\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n} \right) \quad (2.16)$$

$$\beta_n = \frac{16}{\pi^3} \cdot \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \cdot \frac{I_2 \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{R}{H} \right]}{I_1 \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{R}{H} \right]} \quad (2.17)$$

$I_2(\cdot)$  ... modificirana Bessel-ova funkcija reda 2



**Slika 2.5: Ročica  $h'_i$  za določitev momenta**

Določitev momenta tik pod dnom rezervoarja  $M'_i$  po enačbi (2.18), ki se od momenta tik nad dnom  $M_i$  bolj razlikuje za široke rezervoarje, pri visokih se pa bolj ali manj približata.

$$M'_i = Q_i \cdot h'_i = m_i \cdot h'_i \cdot a_g \quad (2.18)$$

### 2.6.1.2 Valovanje tekočine

Togo vodoravno nihanje rezervoarja ima za posledico, da se v zgornjem delu tekočine pojavi valovanje, ki s pritiski na stene rezervoarja povzroča strižno silo na dnu rezervoarja  $Q_c$  ter moment nad dnom rezervoarja  $M_c$  s tendenco prevrnitve. Valovanje tekočine je odvisno od

oblike rezervoarja in vrste tekočine. Običajne tekočine imajo vrednost dušenja približno  $\xi = 0,5\%$  kritičnega.

Na velikost strižne sile  $Q_c$  in momenta tik nad dnom rezervoarja  $M_c$  ima glavni oziroma prevladujoč vpliv le prva nihajna oblika valovanja, zato lahko višje oblike valovanja zanemarimo, vendar bodo v nadaljevanju enačbe in izračuni za obe nihajni obliki, v primerjavah pa je tudi prikazan dejanski vpliv druge nihajne oblike na velikost potresnih obremenitev zaradi valovanja tekočine.

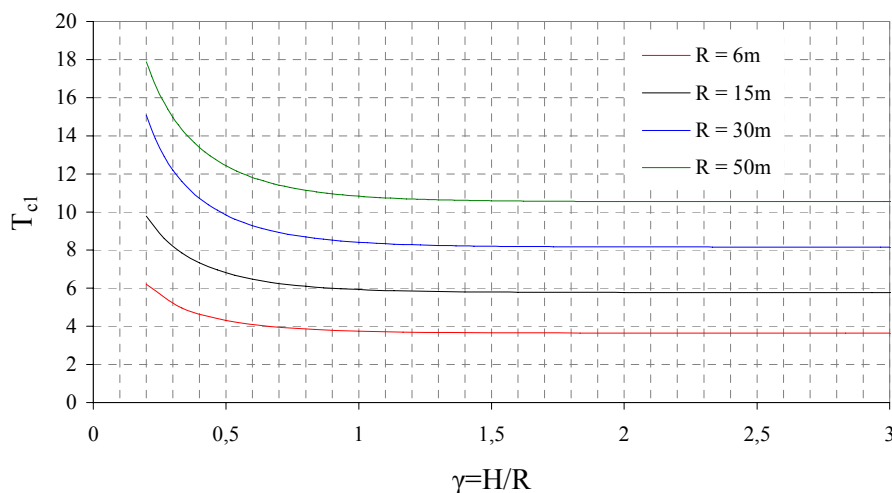
Nihajni čas prve nihajne oblike  $T_{c1}$  je odvisen od razmerja višine  $H$  in polmera  $R$ . Vrednosti  $\lambda_1 = 1,8112$  in  $\lambda_2 = 5,3314$  sta faktorja prve  $\lambda_1$  in druge nihajne oblike  $\lambda_2$ . Nihajni čas  $T_{cj}$  za prvo in drugo nihajno obliko izračunamo po enačbi (2.19), ki ga nadalje potrebujemo za določitev pospeška  $S_e(T_{cj})$  iz elastičnega spektra pospeškov v skladu s EN 1998-1.

$$T_{cj} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{\lambda_j}{R} \cdot \tanh(\lambda_j \cdot \gamma)} \quad (2.19)$$

$g$  ... težnostni pospešek v  $m/s^2$

$\lambda_j$  ...  $\lambda_1$  in  $\lambda_2$  faktorja za prvo oz. drugo nihajno obliko

$j = 1$  ... za 1. nihajno obliko,  $j = 2$  ... za 2. nihajno obliko



**Slika 2.6: Odvisnost nihajnega časa  $T_{c1}$  valovanja od radija  $R$  in razmerja  $\gamma$**

Strižno silo na dno rezervoarja prve  $Q_{c1} = m_{c1} \cdot S_e(T_{c1})$  in druge nihajne oblike valovanja  $Q_{c2} = m_{c2} \cdot S_e(T_{c2})$  po enačbi (2.20):

$$Q_{cj} = m_{cj} \cdot S_e(T_{cj}) \quad (2.20)$$

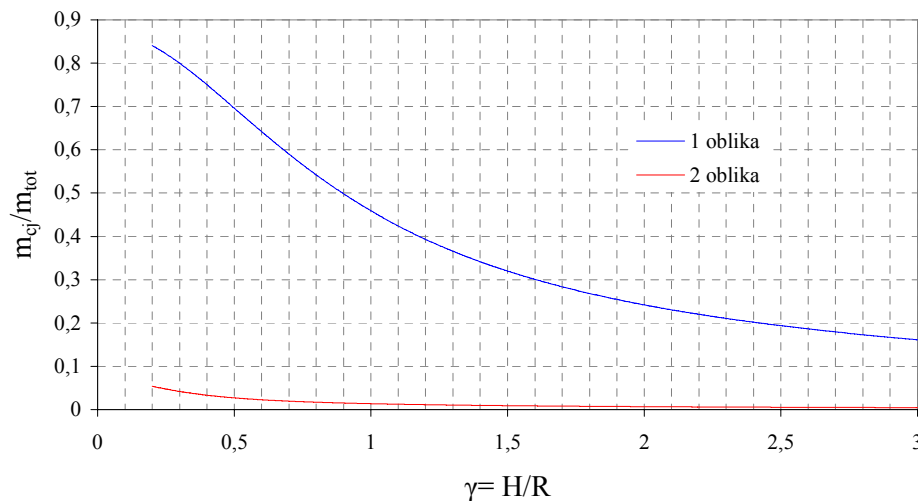
$S_e(T_{cj})$  ... vrednost pospeška iz elastičnega spektra pospeškov v odvisnosti od nihajnega časa  $T_{cj}$  za ustrezen koeficient dušenja.

Deleža mas  $m_{c1}$  in  $m_{c2}$ , ki predstavljata del valujoče mase tekočine prve oziroma druge nihajne oblike, določimo po enačbi (2.21) ali grafično iz slike 2.7.

$$m_{cj} = m_{tot} \cdot \frac{2 \cdot \tanh(\lambda_j \cdot \gamma)}{\gamma \cdot \lambda_j (\lambda_j^2 - 1)} \quad (2.21)$$

$m_{c1}$  ... delež mase prve nihajne oblike valovanja v kg

$m_{c2}$  ... delež mase druge nihajne oblike valovanja v kg



**Slika 2.7: Delež mas  $m_{c1}$  in  $m_{c2}$  pri valovanju tekočine**

Pospeška  $S_e(T_{c1})$  in  $S_e(T_{c2})$  določimo iz elastičnega spektra pospeškov v t.č. 2.3.1 v odvisnosti od nihajnega časa prve  $T_{c1}$  in druge nihajne oblike valovanja  $T_{c2}$ , ki ju določimo po enačbi (2.19). Največjo strižno silo na dnu rezervoarja  $Q_c$  zaradi valovanja tekočine v zgornjem delu rezervoarja določimo po enačbi (2.22) kot vsoto prispevkov prve  $Q_{c1}$  in druge nihajne oblike valovanja tekočine  $Q_{c2}$ .

$$Q_c = m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) \quad (2.22)$$

Moment tik nad dnom rezervoarja  $M_c$ , ki ga povzročajo pritiski valovanja tekočine v zgornjem delu, določimo kot produkt posamezne komponente strižne sile  $Q_{cj}$  pomnožene s koeficientom  $h_{cj}$  za prvo in drugo nihajno obliko po (2.23).

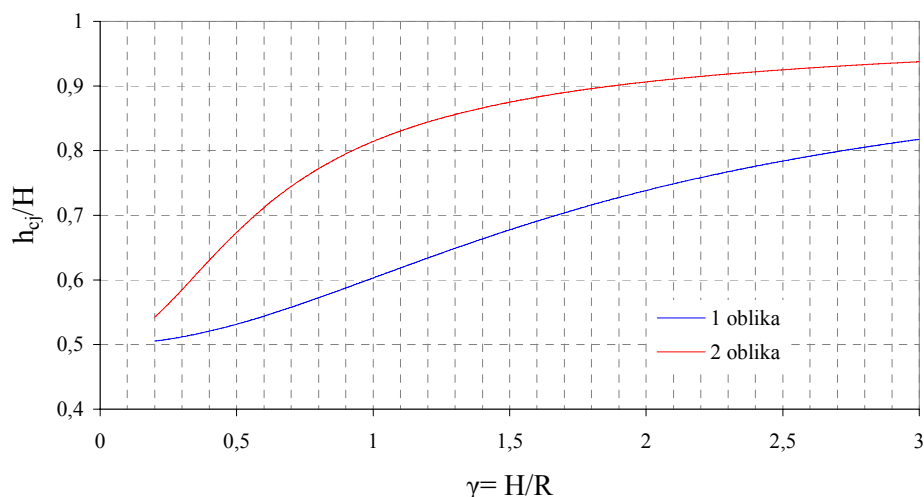
$$M_c = Q_{c1} \cdot h_{c1} + Q_{c2} \cdot h_{c2} = m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) \quad (2.23)$$

Koeficienta  $h_{c1}$  in  $h_{c2}$  v določimo po enačbi (2.24) ali grafično iz slike 2.8.

$$h_{cj} = H \cdot \left( 1 + \frac{1 - \cosh(\lambda_j \cdot \gamma)}{\lambda_j \cdot \gamma \cdot \sinh(\lambda_j \cdot \gamma)} \right) \quad (2.24)$$

$h_{c1}$  ... ročica rezultante  $Q_{c1}$  zaradi prve nihajne oblike valovanja tekočine v  $m$

$h_{c2}$  ... ročica rezultante  $Q_{c2}$  zaradi druge nihajne oblike valovanja tekočine v  $m$

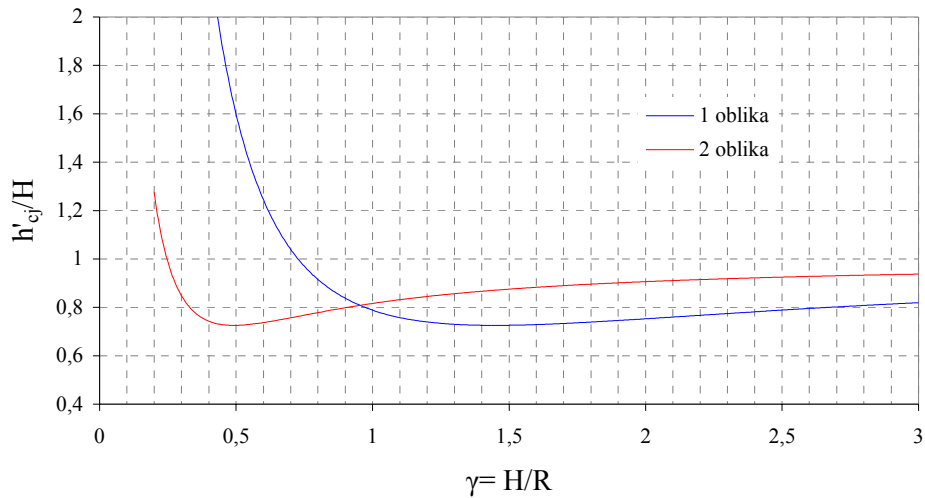


**Slika 2.8: Ročice  $h_{c1}$  in  $h_{c2}$  za določitev momenta tik nad dnom rezervoarja  $M_c$**

Moment tik pod dnom  $M'_c$  izračunamo po enačbi (2.26) podobno kot moment tik nad dnom rezervoarja  $M_c$ , ročico  $h'_{cj}$  določimo po enačbi (2.25) ali grafično iz slike 2.9.

$$h'_{cj} = H \cdot \left( 1 + \frac{2 - \cosh(\lambda_j \cdot \gamma)}{\lambda_j \cdot \gamma \cdot \sinh(\lambda_j \cdot \gamma)} \right) \quad (2.25)$$

$$M'_c = Q_{c1} \cdot h'_{c1} + Q_{c2} \cdot h'_{c2} = m_{c1} \cdot h'_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h'_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) \quad (2.26)$$



**Slika 2.9: Ročice  $h'_{c1}$  in  $h'_{c2}$  za določitev momenta tik pod dnom rezervoarja  $M'_c$**

Tako pri strižnih silah  $Q_c$  in  $Q'_c$  kot pri upogibnih momentih  $M_c$  in  $M'_c$  lahko zanemarimo prispevek druge nihajne oblike, z računom le teh pa pokažemo dejanski prispevek druge nihajne oblike. V nadaljevanju je v računih upoštevan vpliv obeh nihajnih oblik, kjer je v primerjavah prikazan dejanski delež prispevka druge nihajne oblike valovanja na obremenitve.

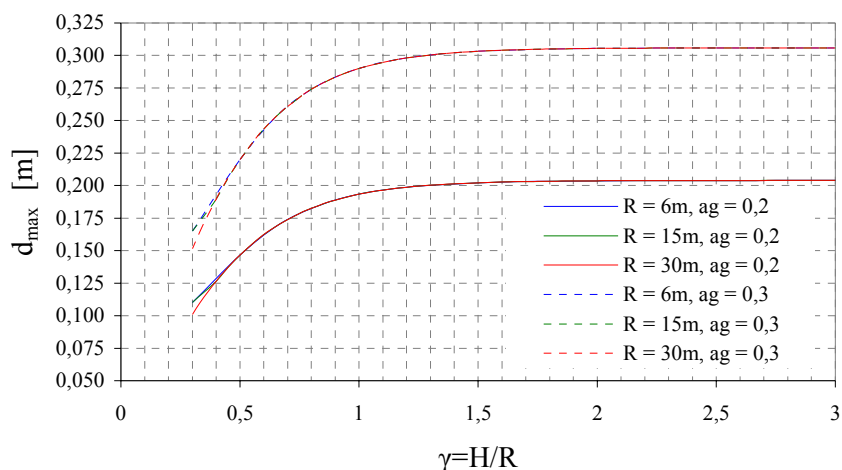
### 2.6.1.3 Višina valovanja

Pri zahtevah o varnostni višini od najvišje višine polnjenja do vrha rezervoarja je pomembno da določimo največjo višino vala tekočine zaradi valovanja tekočine v zgornjem delu rezervoarja.

Prevladujoči vpliv na največjo višino vala ima prva nihajna oblika, višino vala izračunamo po enačbi (2.27), kjer je  $S_e(T_{c1})$  projektna vrednost iz elastičnega spektra pospeškov za faktor dušenja  $\xi = 0,5\%$  določen v t.č. 2.3.1.

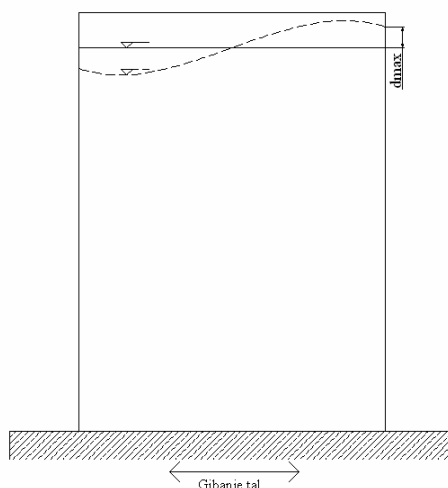
$$d_{\max} = \frac{0,84 \cdot R \cdot S_e(T_{c1})}{g} \quad (2.27)$$





**Slika 2.10: Višina vala  $d_{\max}$  v odvisnosti od pospeška  $a_g$  in radija  $R$**

Na sliki 2.10 je prikazan vpliv pospeška tal  $a_g$  in radija  $R$  na največjo višino vala tekočine  $d_{\max}$ . Vidimo, da je višina vala odvisna v glavnem od pospeška tal  $a_g$ , ker se nihajni časi valovanja z večanjem radija povečujejo, s tem pada projektni pospešek  $S_e(T_{c1})$ . Tako vidimo, da se višina vala  $d_{\max}$  linearno povečuje z večanjem pospeška tal  $a_g$ , tako je odvisna le od razmerja  $\gamma = H/R$  in pospeška tal  $a_g$ .



**Slika 2.11: Višina vala tekočine  $d_{\max}$**

#### 2.6.1.4 Efekt vztrajnosti sten pri togem vodoravnem nihanju

Za jeklene rezervoarje so vztrajnostne sile lupine rezervoarja zaradi majhne teže lupine v primerjavi z hidrodinamičnimi v večini primerov zanemarljive. Vztrajnostne sile pravokotno na os rezervoarja določimo po enačbi (2.28):

$$p_w = \rho_s \cdot s(\zeta) \cdot \cos\Theta \cdot a_g \quad (2.28)$$

$\rho_s$  ... gostota materiala plašča v  $kg/m^3$

$s(\zeta)$  ... debelina stene rezervoarja po višini v  $m$

$\Theta$  ... kot med smerjo gibanja tal in točko v kateri računamo vztrajnostne sile v  $rad$

Skupno strižno silo zaradi vztrajnosti sten na dno rezervoarja  $Q_w$  lahko določimo tudi, da skupno težo plašča rezervoarja pomnožimo s projektnim pospeškom tal  $a_g$ . Moment tik nad dnom rezervoarja  $M_w$  pa dobimo kot produkt strižne sile  $Q_w$  in razdalje od težišča rezervoarja do dna  $h_{w,težišče}$ .

#### 2.6.1.5 Efekt vztrajnosti strehe rezervoarja

Podobno kot teža lupine povzroča tudi teža strehe na rezervoarju pri potresni obtežbi strižne in upogibne obremenitve. Tako določimo strižne obremenitve strehe  $Q_{strehe}$  po enačbi (2.29).

$$Q_{strehe} = G_{strehe} \cdot a_g \quad (2.29)$$

$G_{strehe}$  ... lastna teža strehe v  $kg$

Podobno določimo upogibni moment  $M_{strehe}$  vztrajnostnih sil strehe na vrhu rezervoarja.

$$M_{strehe} = Q_{strehe} \cdot h_{strehe} = G_{strehe} \cdot a_g \cdot h_{strehe} \quad (2.30)$$

$h_{strehe}$  ... višina strehe glede na dno rezervoarja v  $m$

#### 2.6.1.6 Kombinacija komponente vodoravnega nihanja in valovanja

Celotna obtežba vplivov je vsota dveh komponent:

- vodoravnega togega nihanja
- valovanja tekočine

Pri dinamičnem odzivu konstrukcije je pomembno upoštevati ustrezno dušenje za disipacijo energije. Pri projektiranju v praksi vpliv disipacije energije zajamemo s faktorjem obnašanja konstrukcije  $q$ . V okviru tega standarda za rezervoarje ni posebej značilna disipacija energije

za mejno stanje nosilnosti, zaradi tega vzamemo za mejno stanje nosilnosti faktor obnašanja  $q = 1$ . V kolikor vzamemo višje faktorje obnašanja konstrukcije, je potrebno disipacijo energije ustrezno dokazati ter predvideti ustrezne preverjene detajle.

Pri kombinaciji vplivov togega nihanja in valovanja je lahko pravilo »koren vsote kvadratov« na nevarni strani približka, zato za kombinacijo vplivov komponent seštejemo maksimalne vrednosti posameznih komponent. Vsaka komponenta posebej mora biti določena za ustrezen faktor obnašanja  $q$  in faktor dušenja  $\xi$ .

Vrednost momentov  $M_i$  in  $M_c$ , strižne sile  $Q_i$  in  $Q_c$  tik nad dnom rezervoarja uporabimo za račun napetosti v stenah rezervoarja in sidranja v temelj. Vrednost momenta tik pod dnom rezervoarja  $M'_i$  in  $M'_c$  uporabimo za kontrolo oziroma za dimenzioniranje temelja rezervoarja. S primerjavo momentov pridemo do zaključka, da so velikosti momentov tik pod dnom rezervoarja  $M'_i$  in  $M'_c$  za široke rezervoarja tudi do štirikrat večje od momentov tik nad dnom  $M_i$  in  $M_c$ . Teoretično to ni mogoče, saj preko stene rezervoarja ni mogoče prenesti toliko večjih obremenitev, ker je stena dimenzionirana na momenta  $M_i$  in  $M_c$ , ki sta veliko manjša. Zato bi bilo potrebno raziskati ozadje določitve teh obremenitev ter upoštevane predpostavke in uporabljene računske modele.

## 2.6.2 Vertikalna komponenta potresnega vzbujanja krožno togega rezervoarja

Zaradi potresnega vzbujanja v vertikalni smeri v stenah rezervoarja nastanejo dodatni hidrostatični pritiski, ki povzročajo natezne napetosti v plašču rezervoarja. Povečani hidrostatični pritisk  $p_{vr}$  zaradi vertikalnih pospeškov določimo po enačbi (2.31).

$$p_{vr} = \rho_{fluid} \cdot H \cdot (1 - \zeta) \cdot a_v \quad (2.31)$$

$\rho_{fluid}$  ... prostorninska masa tekočine v  $kg/m^3$

$\zeta$  ... brezdimenzijska koordinata, na dnu vrednost  $\zeta = 0$ , na vrhu  $\zeta = 1$

$a_v$  ... vertikalna komponenta projektne pospeška tal določena v t.č. 2.3.2 v  $m/s^2$

Pri osno simetričnih cilindričnih rezervoarjih hidrostatični pritisk zaradi potresne obtežbe ne povzroča strižnih sil ali momentov tik nad dnom ali pod dnom rezervoarja.

## **2.7 DEFORMABILNI VERTIKALNI KROŽNI REZERVOARJI, SIDRANI V TEMELJ**

Z delitvijo rezervoarjev na toge in deformabilne dobimo dve skupini z različnim obnašanjem pri dinamični obtežbi. Med toge krožne rezervoarje spadajo tisti, ki pri delovanju obtežbe zanemarljivo malo spreminjajo svojo obliko. V to skupino uvrstimo betonske rezervoarje, ki imajo v primerjavi z jeklenimi debele stene (do cca 30 cm). Jeklene rezervoarje z relativno tankimi stenami (do cca. 2,5 cm), ki med dinamično obtežbo spreminjajo svojo obliko, ne moremo uvrstiti med toge pač pa med deformabilne. V splošnem so skoraj vsi jekleni rezervoarji deformabilni, zaradi česar pri potresni obtežbi dobimo dodatno komponento obremenitve, ki je posledica spreminjanja oblike med delovanjem dinamične obtežbe.

### **2.7.1 Horizontalna komponenta potresnega vzbujanja**

V večini primerov jeklenih rezervoarjev ne moremo predpostaviti togega rezervoarja. Celotna rešitev Laplaceove enačbe je vsota komponent togega nihanja, valovanja tekočine in elastičnega nihanja sten rezervoarja skupaj s tekočino.

Komponenta elastičnega nihanja sten je pri deformabilnih rezervoarjih dodatna in je posledica radialne hitrosti tekočine vzdolž sten skupaj z deformacijskimi hitrostmi stene.

Razvoj deformacij sten nastopi tako zaradi valovanja tekočine kot zaradi elastične komponente nihanja, katerih rešitve so teoretično povezane. Na srečo je dinamična povezava šibka, ločimo pa jih lahko zaradi različne frekvence posameznega gibanja, to pa dopušča določiti tretjo komponento neodvisno od ostalih dveh z dovolj veliko natančnostjo. Komponenti togega nihanja in valovanja tekočine sta ločeno obdelani v prejšnjem poglavju.

#### **2.7.1.1 Elastično nihanje**

Spreminjanje oblike sten rezervoarja glede na osnovno nedeformirano obliko imajo za posledico velike obremenitve na stene rezervoarja pri temelju. Obremenitve so večje za široke rezervoarje na katere ima glavni vpliv nihajni čas sistema  $T_f$ , na podlagi katerega iz elastičnega spektra odčitamo vrednost pospeška za nihajni čas  $T_f$ .

Obremenitev zaradi elastičnega nihanja sten rezervoarja in tekočine je odvisna od osnovnega nihajnega časa sistema tekočine in rezervoarja  $T_f$ , ki ga določimo po enačbi (2.32).

$$T_f = \frac{2 \cdot R}{(0,01675 \cdot \gamma^2 - 0,15 \cdot \gamma + 0,46)} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{fluid} \cdot H}{E \cdot s}} \quad (2.32)$$

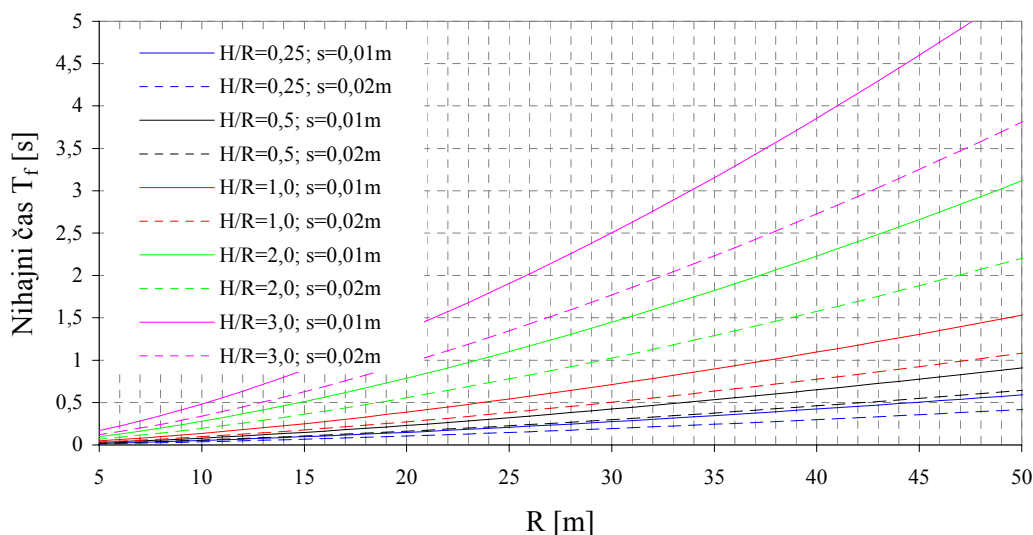
$E$  ... elastični modul jekla v  $N/m^2$

$H$  ... višina polnjenja rezervoarja v  $m$

$s$  ... debelina spodnjega ovoja plašča rezervoarja v  $m$

$\rho_{fluid}$  ... prostorninska masa tekočine v  $kg/m^3$

Na sliki 2.12 je prikazan vpliv razmerja  $\gamma = H/R$  in radija rezervoarja  $R$  na osnovni nihajni čas  $T_f$  za konstantno debelino stene  $s = 0,01 m$  in  $s = 0,02 m$ .



**Slika 2.12: Odvisnost nihajnega časa sistema  $T_f$  od radija  $R$  in razmerja  $\gamma$**

Rezultanto striga pri temeljih  $Q_f$  določimo po enačbi (2.33), v kateri predstavlja  $S_e(T_f)$  vrednost iz elastičnega spektra pospeškov za nihajni čas  $T_f$ .

$$Q_f = m_f \cdot S_e(T_f) \quad (2.33)$$

$m_f$  ... delež mase, ki niha skupaj s stenami določimo grafično iz [2] v  $kg$

Moment tik nad dnom rezervoarja  $M_f$  določimo kot produkt strižne sile  $Q_f$  in ročice  $h_f$  po enačbi (2.34).

$$M_f = Q_f \cdot h_f = m_f \cdot S_e(T_f) \cdot h_f \quad (2.34)$$

$h_f$  ... ročica rezultante strižne sile  $Q_f$ , ki jo določimo grafično iz [2] v  $m$

Koeficienta  $m_f$  in  $h_f$  sta odvisna od razmerja  $\gamma = H/R$ , ki ju določimo grafično iz [2], ali pa uporabimo približne vrednosti  $m_i$  in  $h_i$  kot pri togem nihanju v t.č. 2.6.1.1.

### 2.7.2 Vertikalna komponenta potresne obtežbe

Vertikalna komponenta potresne obtežbe pri deformabilnih rezervoarjih zajema vpliv povečanih hidrostatičnih pritiskov  $p_{vf}$  zaradi vertikalnih pospeškov, ki so odvisni od osnovnega vertikalnega nihajnega časa rezervoarja  $T_{vf}$ , izračunanega po enačbi (2.35).

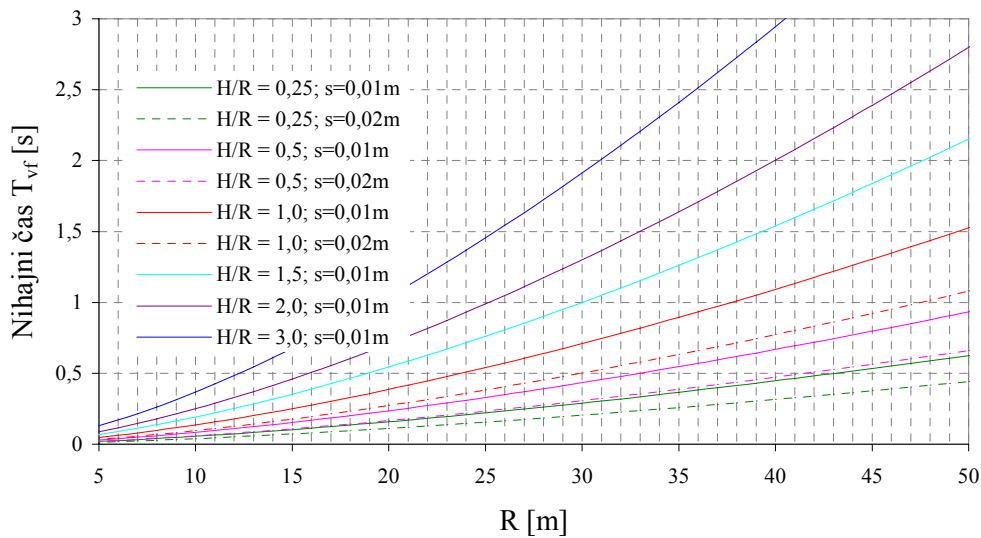
$$T_{vf} = \frac{2 \cdot R}{\sqrt{\frac{E \cdot s \cdot I_1(\gamma_1)}{2 \cdot H \cdot \pi \cdot \rho_{fluid} \cdot (I_0(\gamma_1) - \nu^2 \cdot I_1(\gamma_1))}}} \quad (2.35)$$

$\gamma_1 = \frac{\pi}{2 \cdot \gamma}$  ... brezdimenzijski koeficient odvisen od razmerja  $\gamma = H/R$

$I_0(\cdot)$  in  $I_1(\cdot)$  ... modificirani Bessel-ovi funkciji reda 0 in 1

$\nu = 0,3$  ... Poisonov količnik jekla

Na sliki 2.13 je prikazana odvisnost nihajnega časa od razmerja rezervoarja za debelino rezervoarja  $s = 0,01\text{ m}$  in  $s = 0,02\text{ m}$ .



Slika 2.13: Odvisnost vertikalnega nihajnega časa  $T_{vf}$  od radija  $R$  in razmerja  $\gamma$

Hidrostatični pritisk  $p_{vf}$ , ki nastane zaradi vertikalnih pospeškov tal, povzroča pri deformabilnih rezervoarjih samo natezne napetosti v radialni smeri, posledično tudi radialne deformacije.

$$p_{vf} = 0,815 \cdot f(\gamma) \cdot \rho_{fluid} \cdot H \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \zeta\right) \cdot S_e(T_{vf}) \quad (2.36)$$

$f(\gamma)$  ... brezdimenzijski koeficient, ki zajame vpliv oblike, določimo ga po enačbi (2.37)

$\zeta$  ... brezdimenzijska koordinata, na površini tekočine ima vrednost  $\zeta = 0$ , na dnu pa  $\zeta = 1$

V enačbi (2.36) za določitev hidrostatičnega pritiska  $p_{vf}$  zaradi vertikalnih pospeškov tal se povečuje od površja tekočine proti dnu. Koeficient  $f(\gamma)$  je odvisen od razmerja  $\gamma = H/R$  in ga določimo po enačbi (2.37), vrednost pospeška  $S_e(T_v)$  določimo po enačbah (2.7) - (2.10) za 5 % kritičnega dušenja ali pa grafično iz slike 2.2 za nihajni čas  $T_{vf}$ .

$$f(\gamma) = \begin{cases} 1,078 + 0,274 \cdot \ln(\gamma); & 0,8 \leq \gamma \leq 4 \\ 1,0; & \gamma < 0,8 \end{cases} \quad (2.37)$$

## 2.8 KOMBINACIJE VPLIVOV

Zaradi težav, kako z enostavnimi približki čim točneje opisati dejanske vrednosti, avtorji predlagajo različne poenostavitve. Predstavljenih je pet podobnih postopkov, ki uporabljajo različne poenostavitve in interpretacije uporabljenih metod. Vendar pa dajejo več ali manj podobne vrednosti, le osnovni postopek daje razmeroma veliko večje vrednosti od ostalih postopkov.

### 2.8.1 Kombinacije vplivov horizontalnih komponent

V nadaljevanju v vseh kombinacijah upoštevamo obe obliki valovanja tekočine, kjer je v primerjavah prikazan dejanski vpliv druge nihajne oblike na potresne obremenitve.

#### 2.8.1.1 Osnovni postopek

Po osnovnem postopku seštejemo vplive komponente togega nihanja, valovanja tekočine in elastičnega nihanja sten. Rezultanto strižne sile  $Q$  deformabilnega rezervoarja dobimo po enačbi (2.38), kjer upoštevamo obe nihajni obliki valovanja.

$$Q = m_i \cdot a_g + m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) + m_f \cdot S_e(T_f) \quad (2.38)$$

Pri določanju skupnega vpliva komponent se pojavi vprašanje kako kombinirati maksimalne vrednosti komponent. Zaradi neodvisnega in relativno širokega spektra frekvenc nihanja se lahko izkaže, da po pravilu »koren vsote kvadratov« dobimo vrednosti na nevarni strani približka, zato maksimalne vrednosti komponent enostavno seštejemo. Identično dobimo rezultanto prevrtnitvenega momenta tik nad dnom rezervoarja  $M$ , kjer upoštevamo obe nihajni obliki valovanja tekočine in deformabilnost po enačbi (2.39).

$$M = m_i \cdot h_i \cdot a_g + m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) + m_f \cdot h_f \cdot S_e(T_f) \quad (2.39)$$

### 2.8.1.2 Postopek po Veletsos-Yang

Ta poenostavitev za del valovanja tekočine uporabi vrednosti dobljene pri predpostavki, da je rezervoar tog. Za del nihanja rezervoarja skupaj s tlemi uporabi enake deleže mase  $m_i$  in višine  $h_i$ , kot pri togem rezervoarju, le da projektni pospešek tal  $a_g$  zamenja s pospeškom iz elastičnega spektra  $S_e(T_f)$  v odvisnosti od osnovnega nihajnega časa sistema rezervoarja in tekočine  $T_f$ . Z osnovnim nihajnim časom sistema  $T_f$  zajame vpliv deformabilnosti sten rezervoarja glede na osnovno obliko. Tako dobimo velikost strižne sile  $Q$  pri dnu rezervoarja po enačbi (2.40).

$$Q = m_i \cdot S_e(T_f) + m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) \quad (2.40)$$

Avtor je ocenil, da je kombinirana vrednost strižne sile  $Q$  po enačbi (2.40) primerna le za razmerja  $\gamma \leq 1,0$ . Za večja razmerja naj bi bila kombinacija po enačbi (2.40) preveč konzervativna, zato predlaga za večja razmerja določitev strižne sile  $Q$  po enačbi (2.41).

$$Q = \varepsilon_0 \cdot m_{tot} \cdot S_e(T_f) \quad (2.41)$$

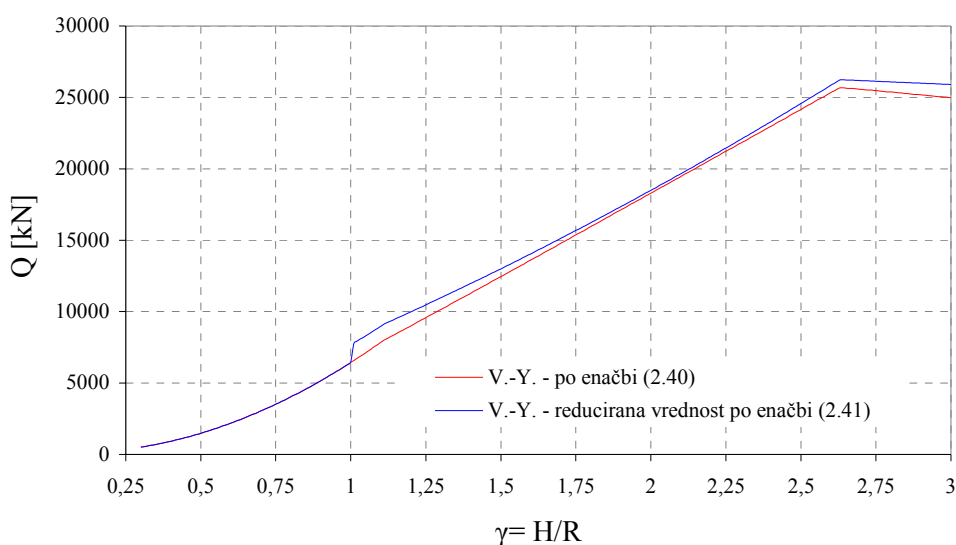
$\varepsilon_0$  ... redukcijski faktor

$m_{tot}$  ... celotna masa vsebine rezervoarja v  $kg$

$S_e(T_f)$  ... vrednost pospeška iz elastičnega spektra pospeškov za osnovni nihajni čas  $T_f$  v  $s$

S primerjavo velikosti strižne sile  $Q$  z ostalimi kombinacijami na sliki 2.14 pridemo do zaključka, da nam daje redukcija strižne sile  $Q$  po (2.41) še večje rezultate kot enačba (2.40), zato v nadaljevanju uporabljamo kombinacijo strižne sile  $Q$  po enačbi (2.40).





**Slika 2.14: Prikaz neustrezne redukcije strižne sile  $Q$**

Koeficient  $\varepsilon_0$  določimo iz tabele 2.4 v odvisnosti razmerja višine  $H$  in radija  $R$ , vmesne vrednosti linearno interpoliramo.

**Tabela 2.4: Redukcijski koeficient  $\varepsilon_0$**

$\gamma = H / R$	1,0	3,0
$\varepsilon_0$	0,7	0,9

Prevrnitveni moment tik nad dnom rezervoarja  $M$ , katerega uporabimo za dimenzioniranje sten rezervoarja in sidranja v temelj, je določen enako kot pri togem rezervoarju le da nadomesti projektni pospešek tal  $a_g$  z vrednostjo pospeška iz elastičnega spektra  $S_e(T_f)$  za nihajni čas  $T_f$ . Za razliko od strižne sile  $Q$ , za katero je predlagana redukcija, je prevrnitveni moment tik nad dnom rezervoarja  $M$  po enačbi (2.42) dovolj dober približek za vsa razmerja.

$$M = m_i \cdot h_i \cdot S_e(T_f) + m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) \quad (2.42)$$

Podobno dobimo tudi vrednosti za prevrnitveni moment tik pod dnom rezervoarja  $M'$  po enačbi (2.43), ki velja za vsa razmerja, tudi za vitke visoke rezervoarje, to je za večja razmerja višine proti radiju rezervoarja.

$$M' = m_i \cdot h'_i \cdot S_e(T_f) + m_{c1} \cdot h'_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h'_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) \quad (2.43)$$

### 2.8.1.3 Postopek po Haroun-Hausner

Ta postopek upošteva valovanje tekočine in togo nihanje iz vertikalno togih rezervoarjev, upošteva pa tudi del zaradi skupnega nihanja sten in tekočine v spodnjem delu rezervoarja. Pri tem postopku avtor predlaga za kombinacijo vplivov uporabo pravila »koren vsote kvadratov«, po katerem določimo največjo strižno silo pri dnu rezervoarja  $Q$  kot kombinacijo posameznih vplivov po enačbi (2.44).

$$Q = \sqrt{(m_f \cdot S_e(T_f))^2 + \left(\sum_{j=1}^2 m_{c_j} \cdot S_e(T_{c_j})\right)^2 + ((m_i - m_f) \cdot a_g)^2} \quad (2.44)$$

Podobno kot strižno silo na dnu rezervoarja določimo tudi upogibni moment tik nad dnom rezervoarja  $M$ , ki ga uporabimo za dimenzioniranje stene rezervoarja in sidranja v temelj. Kombinacijo komponent določimo po pravilu »koren vsote kvadratov«, ki smo jo uporabili pri kombinacij strižne sile  $Q$ . Prevrnitveni moment tik nad dnom rezervoarja  $M$  določimo po enačbi (2.45).

$$M = \sqrt{(m_f \cdot h_f \cdot S_e(T_f))^2 + \left(\sum_{n=1}^2 m_{cn} \cdot h_{cn} \cdot S_e(T_{cn})\right)^2 + ((m_i \cdot h_i - m_f \cdot h_f) \cdot a_g)^2} \quad (2.45)$$

### 2.8.1.4 Postopek po Scharf [14]

Postopek po Scharf uporabi enake vrednosti komponent kot kombinacija po osnovnem postopku, le da za kombinacijo maksimalnih vrednosti uporabimo pravilo »koren vsote kvadratov«. Največje vrednosti kombiniranih vrednosti prečne sile  $Q$  in prevrnitvenega momenta tik nad dnom rezervoarja  $M$  določimo po enačbah (2.46) in (2.47).

$$Q = \sqrt{(m_i \cdot a_g)^2 + (m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}))^2 + (m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}))^2 + (m_f \cdot S_e(T_f))^2} \quad (2.46)$$

$$M = \sqrt{(m_i \cdot h_i \cdot a_g)^2 + (m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}))^2 + (m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}))^2 + (m_f \cdot h_f \cdot S_e(T_f))^2} \quad (2.47)$$

### 2.8.1.5 Poenostavljen postopek za cilindrične rezervoarje [8]

#### Model

Hidrodinamični efekt v rezervoarju je določen z vsoto dveh komponent: (1) Todega nihanja vsebine rezervoarja v spodnjem delu skupaj z deformabilnimi stenami rezervoarja; (2)

komponente valovanja tekočine ob površju. V tej analizi sistema rezervoarja in tekočine sta kot modela uporabljena dva sistema z eno prostostno stopnjo, ena za komponento togega nihanja in ena za komponento valovanja tekočine. Komponenti togega nihanja in valovanja tekočine sta kombinirani kot vsota posameznih komponent, ker je lahko pravilo koren vsote kvadratov na nevarni strani.

### Nihajni časi

Nihajne čase komponente togega nihanja  $T_{imp}$  in valovanja tekočine  $T_{con}$  določimo po enačbah (2.48) in (2.49) v sekundah.

$$T_{imp} = C_i \cdot \frac{\sqrt{\rho_{fluid} \cdot H}}{\sqrt{s/R} \cdot \sqrt{E}} \quad (2.48)$$

$$T_{con} = C_c \cdot \sqrt{R} \quad (2.49)$$

$C_i$  ... brezdimenzijski koeficient iz tabele 2.4 za razmerje  $\gamma$

$C_c$  ... koeficient iz tabele 2.4 v odvisnosti od razmerja  $\gamma$  v  $s/\sqrt{m}$

$H$  ... projektna višina polnjena v  $m$

$R$  ... radij rezervoarja v  $m$

$s_{nad}$  ... povprečna debelina plašča rezervoarja (v kolikor se po višini spreminja) določena na podlagi ekvivalentnih momentov plašča glede na površje tekočine v  $m$

$\rho_{fluid}$  ... prostorninska masa vsebine rezervoarja v  $kg/m^3$

$E$  ... elastični modul materiala sten rezervoarja v  $N/m^2$

### Deleži za togo nihanje in valovanje

Koeficienta  $C_i$  in  $C_c$ , deleže mas  $m_i$ ,  $m_c$  glede na celotno maso vsebine  $m_{tot}$  ter višine  $h_i$ ,  $h_c$ , kot deleže višine  $H$ , kateri so odvisni od razmerja  $\gamma = H/R$ , določimo iz tabele 2.5, vmesne vrednosti pa linearno interpoliramo.

Koeficienti  $m_i$ ,  $m_c$ ,  $h_i$ ,  $h_c$ ,  $h'_i$  in  $h'_c$  za razmerja  $\gamma = H/R$  v tabeli 2.5 so enaki, kot smo jih določili analitično v poglavju togega nihanja 2.6.1.1 in valovanja tekočine v 2.6.1.2.

**Tabela 2.5: Koeficienti za poenostavljeno metodo**

$H/R$	$C_i$	$C_c [s/\sqrt{m}]$	$m_i/m$	$m_c/m$	$h_i/H$	$h_c/H$	$h'_i/H$	$h'_c/H$
0,3	9,28	2,09	0,176	0,824	0,400	0,521	2,640	3,414
0,5	7,74	1,74	0,300	0,700	0,400	0,543	1,460	1,517
0,7	6,97	1,60	0,414	0,586	0,401	0,571	1,009	1,011
1,0	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,785
1,5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,690	0,555	0,734
2,0	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,500	0,764
2,5	6,56	1,48	0,810	0,190	0,452	0,794	0,480	0,796
3,0	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

### Potresna obtežba

Strig pri temeljih rezervoarja  $Q$  (»base shear«) določimo po enačbi (2.50),

$$Q = (m_i + m_w + m_r) \cdot S_e(T_{imp}) + m_c \cdot S_e(T_{con}) \quad (2.50)$$

$m_w$  ... masa sten rezervoarja v  $kg$

$m_r$  ... masa strehe rezervoarja v  $kg$

$S_e(T_{imp})$  ... vrednost iz elastičnega spektra pospeškov za nihajni čas  $T_{imp}$  in  $\xi = 5\%$  v  $m/s^2$

$S_e(T_{con})$  ... vrednost iz elastičnega spektra pospeškov za nihajni čas  $T_{con}$  in  $\xi = 0,5\%$  v  $m/s^2$

Prevrnitveni moment tik nad dnom rezervoarja  $M$  v kombinaciji s teorijo nosilcev nam da osne napetosti ob temelju v steni rezervoarja, določimo ga po enačbi (2.51).

$$M = (m_i \cdot h_i + m_w \cdot h_w + m_r \cdot h_r) \cdot S_e(T_{imp}) + m_c \cdot h_c \cdot S_e(T_{con}) \quad (2.51)$$

Prevrnitveni moment tik pod dnom rezervoarja  $M'$ , kjer so vrednosti koeficientov iz tabele 2.5, določimo po enačbi (2.52).

$$M' = (m_i \cdot h'_i + m_w \cdot h_w + m_r \cdot h_r) \cdot S_e(T_{imp}) + m_c \cdot h'_c \cdot S_e(T_{con}) \quad (2.52)$$

Vrednosti pospeškov  $S_e(T_{imp})$  in  $S_e(T_{con})$  v odvisnosti od nihajnih časov  $T_{imp}$  in  $T_{con}$  določimo iz elastičnega spektra pospeškov za ustrezno dušenje v t.č. 2.3.1.

Za rezervoarje, podprte na krožnih temeljih, uporabimo moment tik nad dnom rezervoarja  $M$  za dimenzioniranje sten rezervoarja, sicer v temelje. Moment tik pod dnom rezervoarja  $M'$  uporabimo za dimenzioniranje temeljev.

Višino vala  $d_{\max}$  določimo enako kot pri vertikalnih togih rezervoarjih po enačbi (2.27), kjer nihajni čas  $T_{con}$  uporabimo za določitev pospeška  $S_e(T_{con})$  iz elastičnega spektra.

### 2.8.2 Kombinacija vpliva vertikalne potresne obtežbe

Za določitev kombinacije povečanega hidrostaticnega pritiska  $p_{v,\max}$  vpliva vertikalne komponente togega rezervoarja  $p_{vr}$  po enačbi (2.31) in vertikalne komponente defomabilnega rezervoarja  $p_{vf}$  po enačbi (2.36) uporabimo pravilo »koren vsote kvadratov«.

$$p_{v,\max} = \sqrt{(p_{vr})^2 + (p_{vf})^2} \quad (2.53)$$

V drugi obliki lahko povečanje hidrostaticnih pritiskov predstavimo kot povečano višino tekočine v rezervoarju  $\Delta H_{nad}$ , ki jo določimo po enačbi (2.54).

$$\Delta H_{nad} = \frac{p_{v,\max}}{g \cdot \rho_{fluid}} \quad (2.54)$$

### 2.8.3 Kombinacija vplivov horizontalne in vertikalne potresne obtežbe

Kadar določamo vplive potresne obtežbe za horizontalno in vertikalno smer ločeno, moramo za določitev najneugodnejše obtežne kombinacije pravilo iz EN 1998-1:2004, 4.2.2.5.2(4) po katerem kombiniramo za določitev najneugodnejšega vpliva.

Merodajna je najneugodnejša izmed kombinacij v enačbi (2.55), na podlagi katere preverjamo vse nadaljnje kontrole nosilnosti in stabilnosti, kot rezultat imamo najneugodnejšo razporeditev napetosti v plašču rezervoarja. Ker je rezervoar osno simetričen, kombiniramo samo eno horizontalno in vertikalno komponento.

$$\begin{aligned} a) & E_{Ed,x} + 0,3 \cdot E_{Ed,z} \\ b) & 0,3 \cdot E_{Ed,x} + E_{Ed,z} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Kombinacijo z ostalimi vplivi določimo v skladu s EN 1998-1:2004.

Za vsako mejno stanje imamo torej po dve obtežni kombinaciji. V eni je prevladujoča horizontalna (a), v drugi pa vertikalna komponenta potresa (b).

## 2.9 NAPETOSTI V PLAŠČU PRI POTRESNI OBTEŽBI

### 2.9.1 Horizontalna potresna obtežba

#### 2.9.1.1 Strižne napetosti (Q)

Strižna sila pri temeljnih tleh  $Q$ , ki je posledica horizontalnega pospešenega gibanja tal, povzroča v plašču rezervoarja strižne napetosti. Največjo strižno napetost  $\tau_{\max Q}$  za kontrolo prereza določimo po enačbi (2.56).

$$\tau_{\max Q} = \pm \frac{Q}{\pi \cdot R \cdot s} \quad (2.56)$$

$s$  ... debelina spodnjega ovoja plašča v  $m$

#### 2.9.1.2 Normalne napetosti (M)

Prevrnitveni moment tik nad dnom rezervoarja  $M$ , ki ga uporabimo za dimenzioniranje plašča, povzroča v prerezu vertikalne normalne napetosti  $\sigma_{xM}$ , ki so odvisne od debeline plašča  $s$ , radija rezervoarja  $R$  in velikosti prevrnitvenega momenta  $M$ . Maksimalno vrednost normalne napetosti  $\sigma_{xM}$  v plašču zaradi prevrnitvenega momenta določimo po enačbi (2.57).

$$\sigma_{xM} = \pm \frac{M}{\pi \cdot R^2 \cdot s} \quad (2.57)$$

### 2.9.2 Vertikalna potresna obtežba

#### 2.9.2.1 Lastna teža lupine in strehe (G)

Teža lupine in teža strehe  $G$  povzroča v plašču tik ob podnici normalne tlačne napetosti  $\sigma_{xG}$ , ki neugodno vplivajo na elastično in plastično izbočenje. Velikost normalnih napetosti tik nad podnico  $\sigma_{xG}$  določimo po enačbi (2.58).

$$\sigma_{xG} = \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot s} \quad (2.58)$$

$G$  ... teža plašča in strehe v  $kN$

### 2.9.2.2 Povečana teža lupine in strehe zaradi vertikalnih pospeškov tal

Zaradi vertikalnih pospeškov tal  $a_{vg}$  pride do povečanja napetosti v steni pri podnici rezervoarja  $\Delta\sigma_{xG}$ . Napetost določimo tako, da enačbo (2.58) pomnožimo z deležem vertikalnega pospeška  $a_{vg}$  glede na težnostni pospešek  $g$  po enačbi (2.59).

$$\Delta\sigma_{xG} = \sigma_{xG} \cdot \frac{a_{vg}}{g} \quad (2.59)$$

### 2.9.2.3 Sneg na strehi (S)

Sneg na strehi  $S$  povzroča v plašču, tako kot lastna teža strehe, membranske tlačne napetosti  $\sigma_{xS}$ . Iz podatkov o teži snega za posamezno območje  $S_{sneg}$ , radija  $R$  in debeline stene  $s$  določimo tlačne napetosti v prerezu  $\sigma_{xS}$  po enačbi (2.60).

$$\sigma_{xS} = \frac{R \cdot S_{sneg}}{2 \cdot s} \quad (2.60)$$

$S_{sneg}$  karakteristična teža snega za določeno območje v  $kN/m^2$

Zaradi vertikalnih pospeškov  $a_{vg}$  se teža snega  $S_{sneg}$  poveča enako kot lastna teža in teža strehe  $G$ , tako dobimo povečane tlačne napetosti  $\Delta\sigma_{xS}$  zaradi povečane teže snega po enačbi (2.61).

$$\Delta\sigma_{xS} = \frac{a_{vg}}{g} \cdot \sigma_{xS} \quad (2.61)$$

### 2.9.2.4 Hidrostaticni pritisk (L)

Hidrostaticni pritisk povzroča v plašču rezervoarja upogibne momente  $m_x$  in  $m_\theta$  ter strižno silo  $q_x$ . Obročne natezne napetosti v plašču tik ob podnici so enake 0. Vrednosti momentov in strižne sile pri hidrostaticni obtežbi določimo po enačbah iz [8].

$$m_x = 2 \cdot R^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{fluid} \cdot H \cdot \frac{K}{E \cdot s} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda \cdot H}\right) \quad (2.62)$$

$$m_\theta = \nu \cdot m_x \quad (2.63)$$

$$q_x = -2 \cdot \frac{K}{E \cdot s} \cdot R^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{fluid} \cdot (2 \cdot \lambda \cdot H - 1) \quad (2.64)$$

$\gamma_{fluid}$  ... prostorninska teža tekočine v  $N/m^2$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{R \cdot s}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$$K = \frac{E \cdot s^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

Z določenimi notranjimi silami določimo napetosti po formulah (2.65), (2.66) in (2.67) iz ENV 1993-1-6, z izločitvijo členov iz enačb, ki so enaki 0.

$$\sigma_{xL} = \pm \frac{4 \cdot m_x}{t^2} \quad (2.65)$$

$$\sigma_{\theta L} = \pm \frac{4 \cdot m_{\theta}}{t^2} \quad (2.66)$$

$$\tau_{xL} = \frac{q_x}{t} \quad (2.67)$$

#### 2.9.2.5 Povečani hidrostatični pritiski zaradi vertikalnih pospeškov

Kot posledica vertikalnih pospeškov nastanejo v tekočini povečani hidrostatični pritiski, ki imajo za posledico večje napetosti. Vpliv upoštevamo z nadomestno višino  $H_{nad}$  iz (2.54), ki jo upoštevamo v enačbah (2.62), (2.63) in (2.64) namesto višine  $H$ , nato po enačbah (2.68), (2.69) in (2.70) določimo povečane napetosti.

$$\Delta \sigma_{xL} = \pm \frac{4 \cdot \Delta m_x}{t^2} \quad (2.68)$$

$$\Delta \sigma_{\theta L} = \pm \frac{4 \cdot \Delta m_{\theta}}{t^2} \quad (2.69)$$

$$\Delta \tau_{xL} = \frac{\Delta q_x}{t} \quad (2.70)$$

## 2.10 **PROJEKTNE VREDNOSTI NAPETOSTI**

### 2.10.1 **Nosilnosti prereza (trajno projektno stanje)**

Pri kombinaciji vplivov jih moramo kombinirati v skladu z ENV 1991-1. Normalna obtežna kombinacija lastne teže  $G$ , koristne obtežbe  $L$  in spremenljive obtežbe snega  $S$  za kontrolo nosilnosti prereza. Kontrolo nosilnosti prereza po 1.OK lahko preverjamo na dva načina in



sicer po membranski teoriji prostega cilindra na hidrostatični pritisk ali po upogibni teoriji na podlagi poenostavljenih konzervativnih ekvivalentnih napetosti.

$$\begin{aligned}
 1.OK : \quad \sigma_{xd} &= 1,35 \cdot \sigma_{xG} + 1,2 \cdot \sigma_{xL} + 1,5 \cdot \sigma_{xS} \\
 \sigma_{\theta d} &= 1,2 \cdot \sigma_{\theta L} \\
 \tau_{xd} &= 1,2 \cdot \tau_{xL}
 \end{aligned}
 \tag{2.71}$$

### 2.10.2 Stabilnosti plašča (potresno projektno stanje)

Pri kontroli izbočenja pri potresni obtežni kombinaciji moramo kombinirati vplive, ki v prerezu povzročajo membranske tlačne napetosti, ki povzročajo izbočne sile. Vertikalne tlačne napetosti povzročajo lastna teža strehe in plašča  $G$ , prevrtni moment zaradi horizontalne komponente potresa  $M$ , povečane napetosti lastne teže strehe in plašča zaradi vertikalne komponente potresa. Pri kontroli izbočenja moramo v enačbah za ugoden in neugoden vpliv upoštevati povečane  $p_{\max}$  in zmanjšane notranje pritiske  $p_{\min}$  pri ustrezni obtežni kombinaciji. Projektne vrednosti membranskih tlačnih napetosti določimo po obtežnih kombinacijah (2.72) in (2.73),

$$\begin{aligned}
 1.OK : \quad \sigma_{xd} &= \sigma_{xG} + 0,2 \cdot \sigma_{xS} + \sigma_{xM} + 0,3 \cdot (\Delta\sigma_{xG} + 0,2 \cdot \Delta\sigma_{xS}) \\
 \tau_{xd} &= \tau_{xL} + \tau_{\max Q} + 0,3 \cdot \Delta\tau_{xL} \\
 p_{\min} &= \rho_{fluid} \cdot g \cdot (H - 0,3 \cdot \Delta H_{nad}) \\
 p_{\max} &= \rho_{fluid} \cdot g \cdot (H + 0,3 \cdot \Delta H_{nad})
 \end{aligned}
 \tag{2.72}$$

$$\begin{aligned}
 2.OK : \quad \sigma_{xd} &= \sigma_{xG} + 0,2 \cdot \sigma_{xS} + 0,3 \cdot \sigma_{xM} + \Delta\sigma_{xG} + 0,2 \cdot \Delta\sigma_{xS} \\
 \tau_{xd} &= \tau_{xL} + 0,3 \cdot \tau_{\max Q} + \Delta\tau_{xL} \\
 p_{\min} &= \rho_{fluid} \cdot g \cdot (H - \Delta H_{nad}) \\
 p_{\max} &= \rho_{fluid} \cdot g \cdot (H + \Delta H_{nad})
 \end{aligned}
 \tag{2.73}$$

kjer je  $\Delta H_{nad}$  določen v 2.8.2, ki ga upoštevamo neugodno za zmanjšanje notranjih pritiskov  $p_{\min}$  pri kontroli elastičnega izbočenja in povečanje notranjih pritiskov  $p_{\max}$  pri kontroli plastičnega izbočenja (»slonova noga«).

## 2.11 KONTROLE ZA JEKLENE REZERVOARJE

Območje stika dna rezervoarja s steno sidranih kot tudi prostoležečih rezervoarjev je kritično mesto za poškodbe in možno puščanje. Kontrole morajo biti narejene za potresno obtežno kombinacijo z ostalimi vplivi.

Pri potresnem projektne stanju imamo dve kontroli, ki morata biti izpolnjeni. To sta elastično izbočenje in plastično izbočenje (»slonova noga«). Pri trajnem projektne stanju pa kontroliramo plastično nosilnost prereza.

### 2.11.1 Plastična nosilnost prereza (trajno projektne stanje)

Posamezni vplivi določeni v poglavju 2.10.1 povzročajo napetosti v določenih smereh, na podlagi katerih določimo poenostavljeno konzervativno ekvivalentno napetost  $\sigma_{eq,Ed}$ . Napetosti kontroliramo za obtežni primer (2.71) po enačbi (2.74). Primerjalna napetost določimo po enačbi kot Misesovo primerjalno napetost, vendar je v tem primeru to Iljušinov plastični kriterij, ker smo določili napetosti v prerezu po plastični metodi.

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d} \cdot \sigma_{\theta,d} + 3 \cdot (\tau_{xn,d}^2)} \quad (2.74)$$

Nosilnost materiala (2.75) določimo po ENV 1993-1-1.

$$f_{eq,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.75)$$

V nadaljevanju je za materialni varnostni faktor uporabljena vrednost  $\gamma_{M0} = 1,1$ , lahko pa bo v ta vrednost spremenjena na  $\gamma_{M0} = 1,0$ .

$f_y$  ... napetost tečenja materiala v  $kN / cm^2$

$\gamma_{M0}$  ... materialni varnostni faktor

Kontrola nosilnosti prereza mora izpolnjevati pogoj v enačbi (2.76).

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (2.76)$$

### 2.11.2 Elastična izbočitev (potresno projektne stanje)

Elastično izbočitev je potrebno kontrolirati na mestih največjih tlačnih normalnih napetosti, to je tik ob dnu rezervoarja. Ker notranji pritisk ugodno deluje na stabilnost proti elastičnemu izbočenju, upoštevamo za notranji pritisk najmanjši možni notranji pritisk pri potresni obtežni kombinaciji. Največja dovoljena nosilnost plašča (da ne pride do izbočenja) po enačbi (2.77) je odvisna od elastične kritične napetosti izbočenja cilindričnih osno obremenjenih rezervoarjev, notranjega pritiska, zagotavljanje geometrije. Za zagotovitev stabilnosti plašča mora biti izpolnjen pogoj (2.78).

$$\sigma_{Rd,el} = \sigma_{c1} \cdot \left( 0,19 + 0,81 \cdot \frac{\sigma_p}{\sigma_{c1}} \right) \quad (2.77)$$

$$\sigma_{xd} \leq \sigma_{Rd,el} \quad (2.78)$$

Računsko vertikalno tlačno napetost v plašču  $\sigma_{xd}$  določimo za vplive, ki povzročajo tlačne napetosti v prerezu po obtežnih kombinacijah v enačbah (2.72) in (2.73).

Idealno kritično izbočitveno napetost  $\sigma_{c1}$  za cilindrične osno obremenjene rezervoarje določimo po enačbi (2.79),

$$\sigma_{c1} = 0,6 \cdot E \cdot \frac{s}{R} \quad (2.79)$$

$s$  ... debelina spodnjega ovoja plašča v  $m$

$E$  ... elastični modul materiala sten rezervoarja v  $N/m^2$

Napetost  $\sigma_p$ , s katero zajamemo vpliv notranjega pritiska in kvalitete izvedbe določimo po enačbi (2.80).

$$\sigma_p = \sigma_{c1} \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\bar{p}}{5}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{c1}}\right)^2} \leq \sigma_{c1} \quad (2.80)$$

$\bar{p}$  ... brezdimenzijski koeficient, s katerim zajamemo ugoden vpliv notranjega pritiska  $p_{\min}$

$\sigma_0$  ... oblika karakteristične izbočitvene napetosti v  $kN/cm^2$

$\sigma_{c1}$  ... idealna kritična izbočitvena napetost plašča v  $kN/cm^2$

$p_{\min}$  ... minimalni notranji pritisk pri potresnem projektnejem stanju

$$\bar{p}^* = \frac{p_{\min} \cdot R}{s \cdot \sigma_{c1}} \quad (2.81)$$

$$\bar{p} = \begin{cases} \bar{p}^* ; & \bar{p}^* \leq 5 \\ 5 ; & \bar{p}^* > 5 \end{cases}$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} f_y \cdot \left(1 - \frac{\lambda^2}{4}\right); & \lambda^2 \leq 2 \\ \bar{\sigma} \cdot \sigma_{c1}; & \lambda^2 > 2 \end{cases} \quad (2.82)$$

$\lambda^2$  ... parameter relativne vitkosti

$\bar{\sigma}$  ... parameter s katerim zajamemo vpliv kvalitete izvedbe

$$\lambda^2 = \frac{f_y}{\sigma \cdot \sigma_{c1}} \quad (2.83)$$

$$\bar{\sigma} = 1 - 1,24 \cdot \left(\frac{\delta}{s}\right) \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{1,24 \cdot \left(\frac{\delta}{s}\right)}} - 1 \right) \quad (2.84)$$

$$\left(\frac{\delta}{s}\right) = \frac{0,06}{a} \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} \quad (2.85)$$

Koeficient  $a$  je odvisen od nepopolnosti debeline sten, kjer je:

$a = 1,0$  ... za normalne konstrukcije

$a = 1,5$  ... za kvalitetne konstrukcije

$a = 2,5$  ... za konstrukcije visoke kvalitete

Razredi kvalitete izvedbe se ujemajo z razredi v EN 1993-1-6.

### 2.11.3 Plastična izbočitev – »Slonova noga« (potresno projektno stanje)

Ta oblika porušitve se nanaša na obliko porušitve, ki ji pravimo »slonova noga«. Značilna je predvsem za rezervoarje z majhnim razmerjem višine  $H$  proti radiu  $R$ . Ta oblika izbočenja se pojavi zaradi velikih tlačnih vertikalnih napetosti ter prekoračenih nateznih napetosti preko meje elastičnosti v tangencialni smeri. Za kontrolo te oblike izbočitve določimo največjo dovoljeno napetost  $\sigma_{Rd,pl}$  po empirični enačbi (2.86),

$$\sigma_{Rd,pl} = \sigma_{c1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{p_{\max} \cdot R}{s \cdot f_y} \right)^2 \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{1,12 + r^{1,5}} \right) \cdot \left( \frac{r + f_y / 250}{r + 1} \right) \quad (2.86)$$

$f_y$  ... napetost tečenja materiala v  $MPa$  (ker je enačba empirično določena)

$p_{\max}$  ... največji notranji pritisk pri potresnem projektne stanju v  $N/m^2$

$r = \frac{R}{s} \cdot \frac{1}{400}$  ... faktor oblike rezervoarja

Kontrolo plastičnega izbočenja preverjamo po enačbi (2.87).

$$\sigma_{xd} \leq \sigma_{Rd,pl} \quad (2.87)$$

### **3 NESIDRANI REZERVOARJI**

#### **3.1 SPLOŠNO**

Rezervoarji so pogosto grajeni tako, da stene rezervoarja niso sidrane v temelj iz razlogov ekonomičnosti. V primeru potresa se lahko dno rezervoarja oziroma stena dvigne, če je prevrnitveni moment kot posledica hidrodinamičnih sil večji kot stabilizacijska komponenta. Dvigovanje povzroča plastične deformacije, še posebej na dno rezervoarja. Z ustreznim projektiranjem detajlov je potrebno preprečiti razpoke in puščanje rezervoarja.

Običajno vpliv dvigovanja rezervoarja in gibanja temeljnih tal na notranje pritiske in razporeditev zanemarimo.

Glavni vpliv je povečanje tlačnih vertikalnih napetosti v plašču, ki so kritične za izbočenje, kar predstavlja glavni problem porušitve pri rezervoarjih. Na steni, ki je nasprotna strani dvignjene, nastanejo največje vertikalne tlačne napetosti v plašču in posledično tudi obročne tlačne napetosti zaradi membranskega obnašanja plošče na dnu rezervoarja. Na dvignjeni strani rezervoarja nastanejo v podnici velike membranske natezne napetosti, ki lahko porušijo stik med steno in podnico, ali pa so napetosti v sami podnici prevelike. Zato moramo na podlagi višine dvigovanja, dimenzij rezervoarja in debeline podnice preverjati dejanske napetosti v podnici, ki morajo biti manjše od dovoljenih.

#### **3.2 TLAČNE VERTIKALNE MEMBRANSKE SILE IN NAPETOSTI V STENI ZARADI DVIGOVANJA**

V standardu prEN 1998-4 so nesidrani rezervoarji obdelani na podlagi numeričnih analiz, ki so v obliki grafov podane za določitev napetosti v plašču, višine dvigovanja, in dolžine dvignjenega dela, medtem ko napetosti v podnici in rotacijo plastičnega členka preverjamo po analitičnih enačbah. Na osnovi numeričnih analiz za različne oblike rezervoarjev je na sliki 3.1 podano v obliki razmerja  $\gamma$  in brezdimenzionalnega momenta  $M^*$  povečanje membranskih tlačnih napetosti nesidranih rezervoarjev  $N_{nesidrano}$  glede na sidrane  $N_{sidrano}$ , ki so obdelani v prejšnjem poglavju.

Tako določimo povečane membranske napetosti (ali sile)  $N_{nesidrano}$  na podlagi brezdimenzionalnega momenta  $M^*$  in razmerja  $\gamma = H / R$ .

$$N_{nesidrano} = k \cdot N_{sidrano} \quad (3.1)$$

$N_{nesidrano}$  ... membranske tlačne napetosti (ali sile) nesidranega rezervoarja v  $kN/cm^2$

$N_{sidrano}$  ... membranske tlačne napetosti (ali sile) sidranega rezervoarja v  $kN/cm^2$

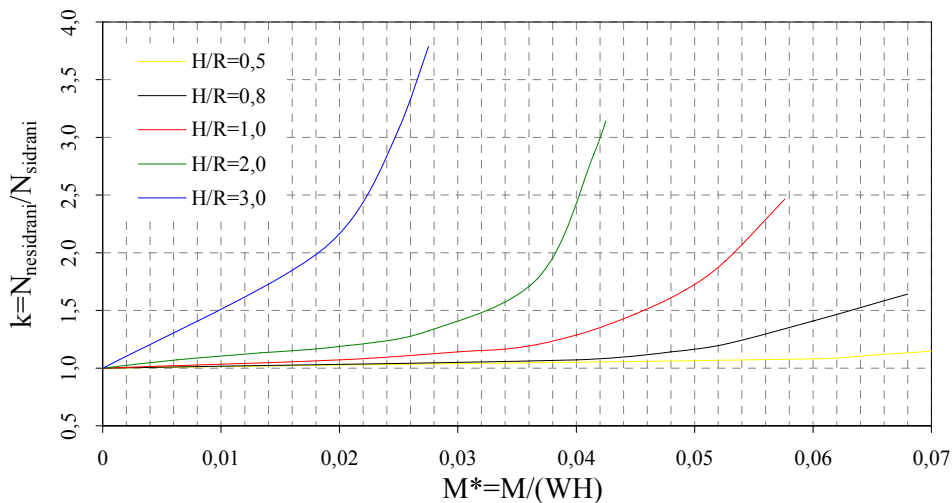
$k$  ... faktor povečanja membranskih napetosti (ali sil) določimo v odvisnosti od brezdimenzionalnega prevrtnitvenega momenta  $M^*$  in razmerja  $\gamma$  iz slike 3.1 v dodatku A standarda prEN 1998-4.

$M^* = \frac{M}{W \cdot H}$  ... brezdimenzionalni prevrtnitveni moment

$M$  ... prevrtnitveni moment sidranega rezervoarja v  $kNm$

$W$  ... celotna teža vsebine rezervoarja v  $kN$

$H$  ... višina polnjenja rezervoarja v  $m$



**Slika 3.1:** Razmerje  $k$  tlačnih napetosti  $N_{nesidrano} / N_{sidrano}$

Iz slike 3.1 vidimo, da je za visoke nesidrane rezervoarje povečanje membranskih napetosti veliko, medtem ko je za široke ta relativno majhen.

### 3.3 DVIGOVANJE PLAŠČA IN DVIGNJENA DOLŽINA DNA REZERVOARJA

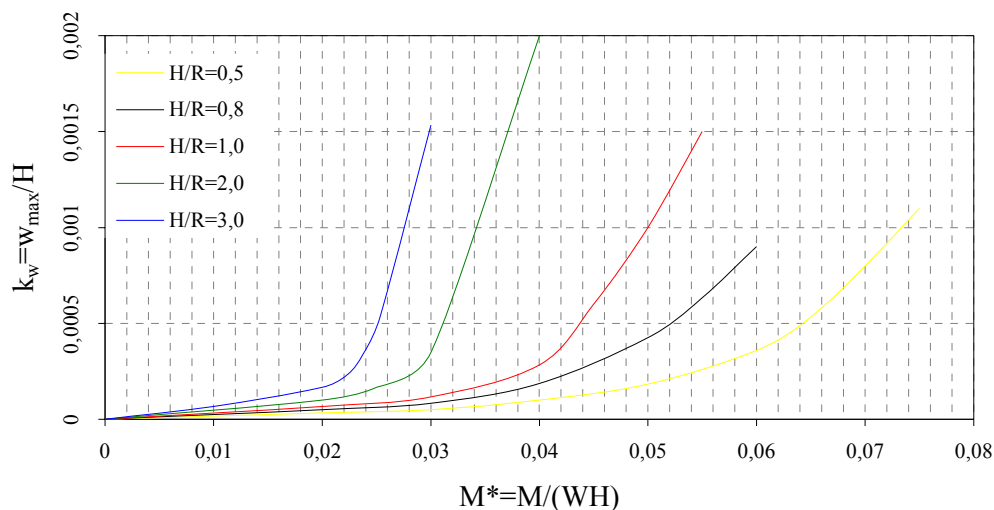
Dvigovanje plašča  $w_{max}$  in dolžina dvignjenega dela  $L$  imata glavni vpliv na velikost napetosti v podnici in rotacijo plastičnega členka na stiku s plaščem, zato je potrebno določiti najprej ta dva parametra za kasnejšo kontrolo napetosti v podnici in rotacijo plastičnega členka.

Vertikalno dvigovanje na robu temelja  $w_{max}$  je dobljeno na podlagi parametrične študije z metodo končnih elementov modeliranih nesidranih cilindričnih rezervoarjev na temeljnih tleh. Na podlagi študij so bili izdelani diagrami odvisnosti največje višine dvigovanja  $w_{max}$  v odvisnosti od brezdimenzionalnega prevrnitvenega momenta  $M^*$ , razmerja višine  $H$  in radija  $R$  rezervoarja. Največjo višino dvigovanja  $w_{max}$  določimo grafično iz slike 3.2 kot delež višine polnjenja rezervoarja  $H$  v odvisnosti od brezdimenzionalnega prevrnitvenega momenta  $M^*$ .

$$w_{max} = k_w \cdot H \quad (3.2)$$

$k_w$  ... koeficient za določitev višine dvigovanja  $w_{max}$  določen grafično iz slike 3.2 v dodatku A standarda prEN 1998-4

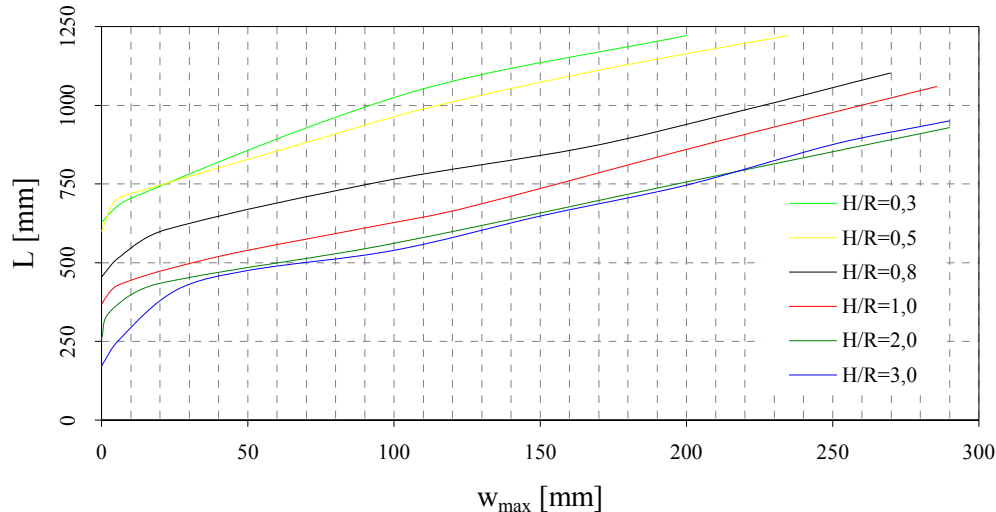
$H$  ... višina polnjenja rezervoarja v  $m$



Slika 3.2: Največje dvigovanje roba rezervoarja  $w_{max}$

Za oceno radialnih membranskih napetosti  $\sigma_{rb}$  v podnici rezervoarja je potrebno določiti dolžino dvignjenega dela rezervoarja  $L$ . Grafično jo določimo iz slike 3.3 v odvisnosti od

razmerja  $\gamma = H/R$  in največje višine dvigovanja rezervoarja  $w_{\max}$ , ki sta skoraj linearno odvisna.



**Slika 3.3:** Dolžina dvignjenega dela  $L$  v odvisnosti od dviga na robu  $w_{\max}$

Iz slike 3.3 se vidi tudi vpliv višine rezervoarja  $H$ , višji kot je rezervoar, manjša je višina dvignjenega dela  $L$ , ker je stabilizacijska sila teže tekočine večja, kot pri širokih rezervoarjih.

### 3.4 RADIALNE MEMBRANSKE NAPETOSTI

Posledica dvigovanja robu rezervoarja  $w_{\max}$  je nastanek velikih membranskih  $\sigma_{rb}$  in upogibnih napetosti v podnici rezervoarja, ki so predvsem koncentrirane v bližini dvignjenega dela. Zato je potrebno zagotoviti potrebno debelino podnice  $s_b$ , ki bo sposobna prenesti obremenitve zaradi dvigovanja rezervoarja.

Velikost membranskih napetosti v podnici rezervoarja  $\sigma_{rb}$  zaradi dvigovanja določimo po enačbi (3.3), ki mora biti manjša od napetosti tečenja materiala podnice.

$$\sigma_{rb} = \frac{1}{s_b} \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot s_b \cdot p^2 \cdot R^2 \cdot (1-\mu)^2 \right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.3)$$

$f_y$  ... napetost tečenja materiala v  $N/m^2$

$s_b$  ... debelina podnice rezervoarja v  $m$

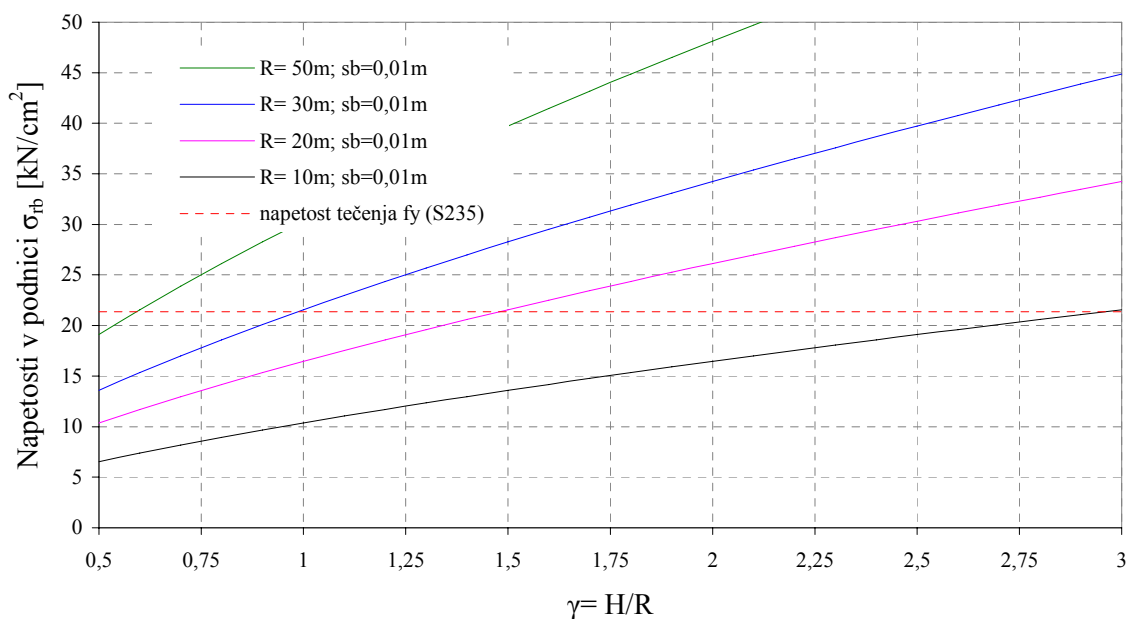
$p$  ... hidrostatični pritisk na podnico rezervoarja  $N/m^2$

$L$  ... dvignjeni del rezervoarja, določen iz slike 3.3 v  $m$



$$\mu = 1 - \frac{L}{2 \cdot R}$$

Kontrola membranskih napetosti  $\sigma_{rb}$  v podnici rezervoarja je primerna za visoke rezervoarje z manjšim radijem, kajti pri širokih rezervoarjih z velikim radijem je bolj kot membransko napetostno stanje v podnici prisotno upogibno napetostno stanje, ki ga je potrebno analizirati numerično z metodo končnih elementov.



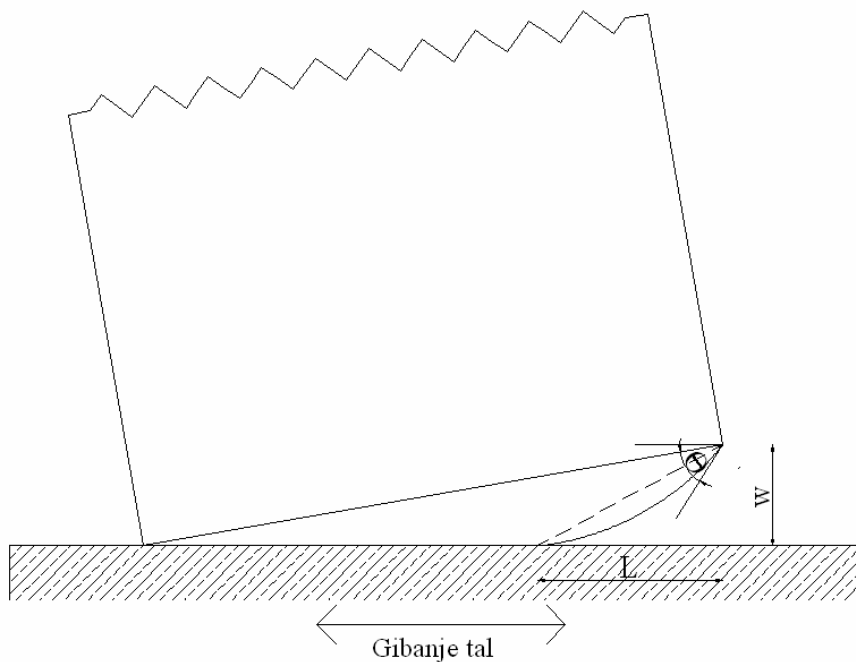
Slika 3.4: Membranske napetosti v podnici  $\sigma_{rb}$

Na sliki 3.4 je prikazana velikost membranskih napetosti v podnici rezervoarja v odvisnosti od radija  $R$  in razmerja  $\gamma = H/R$ . V kolikor so membranske napetosti v podnici  $\sigma_{rb}$  prevelike, lahko povečamo debelino  $s_b$ , uporabimo material z boljšimi karakteristikami, zmanjšamo višino rezervoarja in povečamo radij. Iz slike se tudi vidi, da za normalne oblike rezervoarjev membranske napetosti v podnici niso prekoračene, kjer so diagrami pod napetostjo tečenja ( $\sigma_{rb} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$ ). Tako lahko povzamemo, da napetosti v podnici rezervoarja ne predstavljajo posebnih pogojev debeline podnice, zagotoviti pa je potrebno ustrezen stik med podnico in ovojem plašča.

### 3.5 PLASTIČNA ROTACIJA DNA REZERVOARJA

Dvigovanje rezervoarja ima za posledico deformiranje podnice ter nastanek plastičnega členka na stiku podnice s plaščem. Pri projektiranju moramo s konstrukcijsko zasnovo zagotoviti, da v primeru dvigovanja rezervoarja plastični členek nastane na vnaprej predvidenem mestu. Na podlagi tega mora biti debelina podnice  $s_b$  manjša od debeline stene prvega ovoja  $s$ , da zagotovimo nastanek plastičnega členka v podnici tik ob stiku s plaščem. Od višine dvigovanja  $w_{\max}$  in dvignjenega dela  $L$  je odvisna rotacija plastičnega členka v podnici, ki mora biti v mejah rotacijske kapacitete materiala, da ne pride do porušitve podnice na mestu plastičnega členka in eventualnega puščanja. Plastična rotacija členka  $\theta$  ne sme preseči  $0,20 \text{ rad}$  in jo preverjamo po enačbi (3.4).

$$\theta = \left( \frac{2 \cdot w_{\max}}{L} - \frac{w_{\max}}{2 \cdot R} \right) \leq 0,20 \text{ rad} \quad (3.4)$$



Slika 3.5: Skica določitve rotacije plastičnega členka  $\theta$

## 4 POTRESNA OBTEŽBA PO API 650

### 4.1 SPLOŠNO

Standard obravnava dve oblike odziva rezervoarja in njegove vsebine na potresno obtežbo. Prva je gibanje sten in strehe rezervoarja z relativno veliko frekvenco nihanja skupaj z delom vsebine rezervoarja, drugi del pa je del valovanja tekočine na površini z relativno majhno frekvenco. Pogoji vključujejo zagotavljanje stabilnosti proti prevrnitvi rezervoarja in izbočenju sten kot posledica vzdolžnih tlačnih napetosti v steni.

### 4.2 PREVRNITVENI MOMENT

Prevrnitveni moment  $M$  je odvisen od projektnega pospeška tal  $G_1$ , teže lupine  $T_L$  in strehe rezervoarja  $T_r$ , dimenzij rezervoarja in tekočine. Velikost prevrnitvenega momenta  $M$  določimo po enačbi (4.1), kjer predhodno določimo potrebne koeficiente v ustreznih enotah, da dobimo rezultat prevrnitvenega momenta v  $[kNm]$ ,

$$M = \frac{G_1 \cdot (T_L \cdot X_s + T_r \cdot H_L + T_1 \cdot X_1) + G_2 \cdot T_2 \cdot X_2}{102} \quad (4.1)$$

kjer je

$G_1$  ... delež projektnega pospeška tal glede na težnostni pospešek,

$G_2$  ... koeficient za določitev prispevka valovanja k prevrnitvenemu momentu, odvisnega od nihajnega časa valovanja  $T_s$  in ga določimo po enačbi (4.2),

$T_L$  ... masa sten rezervoarja v  $kg$ ,

$X_s$  ... oddaljenost težišča sten rezervoarja od temelja v  $m$ ,

$T_r$  ... masa strehe rezervoarja v  $kg$ ,

$H_L$  ... višina rezervoarja v  $m$ ,

$T_1$  ... masa tekočine ki se giba skupaj s stenami rezervoarja, določimo jo grafično v  $[1]$  v  $kg$ ,

$T_2$  ... masa tekočine ki valovi na površju, določimo jo grafično v  $[1]$  v  $kg$ ,

$X_1$  ... višina od temelja do rezultante prečne sile zaradi nihanja rezervoarja, določimo jo grafično v  $[1]$  v  $m$ ,

$X_2$  ... višina od temelja do rezultante prečne sile zaradi valovanja tekočine, določimo jo v [1]

v  $m$ ,

$D$  ... premer rezervoarja v  $m$ ,

$$G_2 = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1,25 \cdot G_1 \cdot J}{T_s} & T_s \leq 4,5s \\ \frac{5,625 \cdot G_1 \cdot J}{T_s^2} & T_s > 4,5s \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

kjer je

$J$  ... koeficient odvisen od vrste tal  $J = 1$  za tla tipa  $A$ ,

$T_s = 1,8 \cdot K_s \cdot \sqrt{D}$  ... nihajni čas valovanja tekočine na površju odvisen od faktorja  $K_s$ , katerega določimo grafično v [1],  $D$  pa je premer rezervoarja.

### 4.3 ODPORNOST PROTI PREVRNITVI

Odpornost proti prevrnitvi glede na dno rezervoarja je zagotovljena s težo lupine, s sidranjem lupine v temelj v primeru sidranega rezervoarja, v primeru nesidranega rezervoarja pa s težo lupine in deležem vsebine rezervoarja, ki deluje stabilizacijsko. Za nesidrane rezervoarje je delež vsebine, ki sodeluje pri odpornosti na prevrnitev odvisen od debeline podnice rezervoarja, kvalitete materiala, prostorninske mase tekočine in višine rezervoarja, določen po enačbi (4.3), kot sila na tekoči meter stene rezervoarja ( $kN/m$ ),

$$w_L = 0,1 \cdot t_{ba} \cdot \sqrt{f_{yb} \cdot w_s \cdot H_T} \quad (4.3)$$

vendar mora izpolnjevati omejitev po enačbi (4.4),

$$w_L \leq 0,2 \cdot w_s \cdot H_T \cdot D \quad (4.4)$$

kjer je

$H_T$  ... projektna višina polnjenja v  $m$

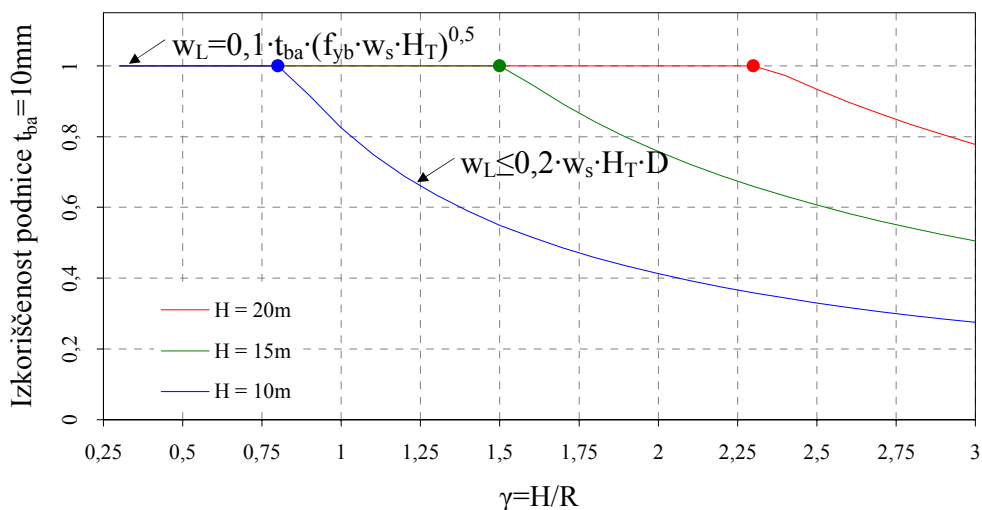
$t_{ba}$  ... debelina podnice v  $mm$ ,

$f_{yb}$  ... meja tečenja materiala podnice v  $N/mm^2$ ,

$w_s$  ... masa tekočine, ki ne sme biti manj kot 1,0 v  $g/ml$ .

Prispevek tekočine k odpornosti na prevrnitev je odvisen od razmerja višine  $H_T$ , radija rezervoarja  $R = D/2$ , od debeline podnice  $t_{ba}$  in kvalitete  $f_{yb}$ . Slika 4.1 prikazuje

izkoriščenost podnice rezervoarja v odvisnosti od radija  $R$ . Za višje in vitke rezervoarje z debelo podnico ne pripomoremo k boljši stabilnosti rezervoarja, ker mora prispevek k odpornosti na prevrnitev izpolnjevati pogoj po enačbi (4.4), kar na sliki 4.1 predstavlja del parabole, kjer nosilnost podnice ni v celoti izkoriščena.



**Slika 4.1: Izkoriščenost podnice rezervoarja v odvisnosti od radija rezervoarja**

Odebeljene točke na sliki 4.1 predstavljajo idealno razmerje za debelino podnice  $t_{ba} = 10 \text{ mm}$  za različne višine  $H$ , kjer je podnica v celoti izkoriščena ter upoštevan največji dovoljeni stabilizacijski del tekočine.

Ob upoštevanju omejitve po enačbi (4.4) v enačbi (4.3) lahko določimo idealno debelino podnice v odvisnosti od razmerja dimenzij, višine rezervoarja in kvalitete materiala po enačbi (4.5).

$$t_{ba} = \frac{4}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{w_s}{f_{yb}}} \cdot \sqrt{H_T^3} \quad (4.5)$$

Pri določitvi debeline podnice  $t_{ba}$  moramo tudi upoštevati omejitve, da debelina ne sme presežati debeline prvega segmenta plašča po obodu in ne sme biti tanjša od  $t_{ba,\min} = 6 \text{ mm}$ . Enačba za določitev idealne debeline podnice velja le za manjše višine, ker pri večjih višinah dobimo večje debeline, ki pa so omejene z konstruktivnimi pogoji, da debelina podnice ne sme presežati debeline plašča pri dnu.

## 4.4 VERTIKALNE TLAČNE NAPETOSTI V PLAŠČU

### 4.4.1 Nesidrani rezervoarji

#### 4.4.1.1 Sile v plašču

Zaradi prevrtnitvenega momenta  $M$  nastopijo v steni rezervoarja dodatne vertikalne tlačne napetosti. Pri nesidranih rezervoarjih zaradi dvigovanja sten na nasprotni strani nastanejo povečane tlačne napetosti zaradi katerih lahko pride do izbočenja in zaradi tega celo do porušitve rezervoarja. Zato je za omejitev napetosti določimo silo na tekoči meter rezervoarja  $b$ , na podlagi katere potem kontroliramo dovoljene napetosti.

$\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)}$  ... brezdimenzionalni koeficient, ki pogojuje izbiro enačbe za določitev sile  $b$

in sidranje rezervoarja

Če je  $\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)} \leq 0,785$ , določimo  $b$  po enačbi (4.6),

$$b = w_t + \frac{1,273 \cdot M}{D^2} \quad (4.6)$$

kjer je

$b$  ... največja vertikalna tlačna sila v  $kN/m$ ,

$s$  ... debelina stene rezervoarja pri dnu v  $mm$

$w_t$  ... največja vertikalna tlačna sila zaradi lastne teže strehe in plašča rezervoarja v  $kN/m$ .

Če je  $0,785 \leq \frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)} \leq 1,5$ , določimo  $b$  po enačbi (4.7),

$$b = (w_t + w_L) \cdot f(.) - w_L \quad (4.7)$$

kjer je koeficient  $f\left(\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)}\right)$  grafično določen v [1].

Če je  $1,5 \leq \frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)} \leq 1,57$ , določimo  $b$  po enačbi (4.8),

$$b = \frac{1,490 \cdot (w_t + w_L)}{\sqrt{1 - \frac{0,637 \cdot M}{D^2 \cdot (w_t + w_L)}}} - w_L \quad (4.8)$$

Če je  $\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)} \geq 1,57$  ali če je  $\frac{b}{s} \geq F_a$ , je rezervoar nestabilen in je potrebno izvesti

enega ali več izmed naslednjih ukrepov:

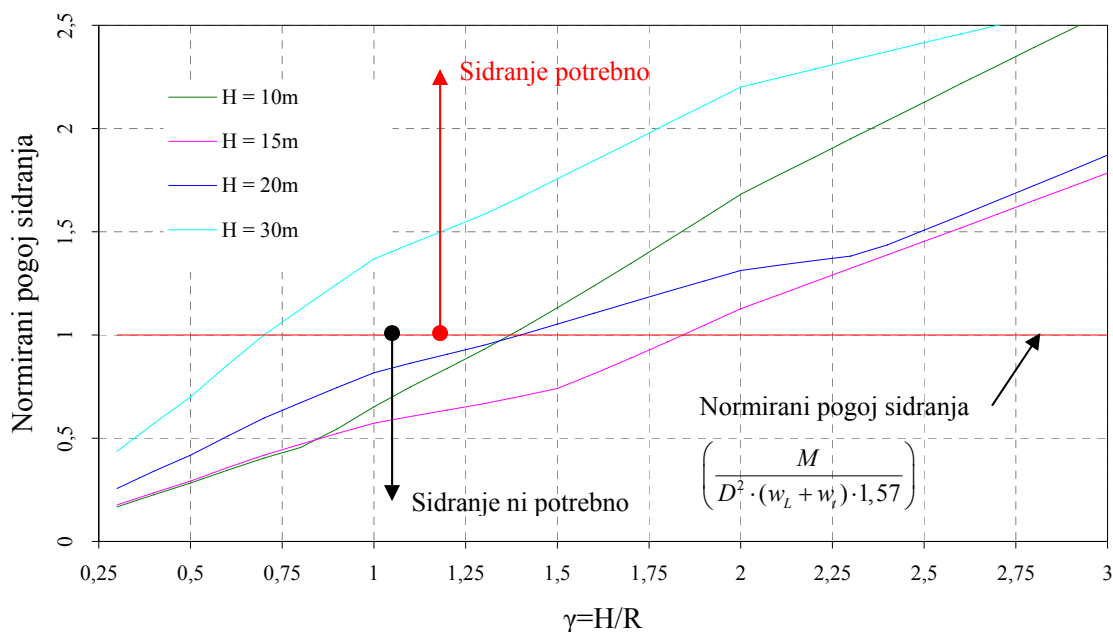
- sidrati rezervoar,
- povečati debelino podnice,
- povečati debelino stene,
- zmanjšati višino in povečati radij.

Na sliki 4.2 je prikazan koeficient  $\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)}$ , ki pogojuje sidranje rezervoarja v

odvisnosti od višine  $H$  in radija  $R$ , ter meja sidranja po pogoju  $\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)} \leq 1,57$ . Vse

vrednosti so normirane na pogoj sidranja  $\left(\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)}\right) / 1,57$ . Iz slike 4.2 vidimo, da je

potrebno vitkejšje oziroma višje rezervoarje z višjim razmerjem  $H/R$  sidrati, saj z lastno težo in težo tekočine ne zagotavlja zadostne varnostni proti prevrnitvi. Nasproti vitkim in visokim rezervoarjem praviloma široke in nižje rezervoarje ni potrebno sidrati.



Slika 4.2: Normirani pogoj sidranja rezervoarjev  $\left(\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)} \cdot 1,57\right)$

#### 4.4.1.2 Dejanska napetost

Na podlagi določene sile v plašču pri dnu rezervoarja, določimo dejansko napetost v plašču po enačbi (4.9). Pri tem se moramo posamezne vrednosti vstavljati v predpisanih enotah, da dobimo rezultat v navedenih enotah.

$$\sigma_{dejansko} = \frac{b}{s \cdot 10} \left[ \frac{kN}{cm^2} \right] \quad (4.9)$$

#### 4.4.2 Sidrani rezervoarji

Pri sidranih rezervoarjih določimo največjo vertikalno tlačno silo  $b$  enako kot pri nesidranih rezervoarjih po enačbi (4.6). Za obravnavanje rezervoarja kot sidranega moramo zagotoviti sidranje z ustreznimi detajli in nosilnostmi.

#### 4.4.3 Največja dovoljena tlačna napetost

V steni rezervoarja ne sme biti prekoračena največja dovoljena tlačna napetost  $F_a$ . S tem pogojem omejujemo napetosti z razlogom, da v plašču ne pride do izbočenja zaradi prevelikih tlačnih napetosti. Pri tem ugoden vpliv notranjega pritiska zajamemo s koeficientom

$$\frac{w_s \cdot H_T \cdot D^2}{s^2}.$$

Če je  $\frac{w_s \cdot H_T \cdot D^2}{s^2} \geq 44$ , potem določimo  $F_a$  po enačbi (4.10) v  $N/mm^2$ ,

$$F_a = 83 \cdot \frac{s}{D} \quad (4.10)$$

če je  $\frac{w_s \cdot H_T \cdot D^2}{s^2} < 44$ , potem določimo  $F_a$  po enačbi (4.11),

$$F_a = 33 \cdot \frac{s}{D} + 7,5 \cdot \sqrt{w_s \cdot H_T} \quad (4.11)$$

v vsakem primeru pa mora biti izpolnjen pogoj v enačbi .

$$F_a \leq 0,5 \cdot f_{ys} \quad (4.12)$$

Pri dovoljenih napetostih je upoštevan ugoden vpliv delovanja notranjega pritiska na izbočenje, ki je odvisno od višine, radija, debeline stene in gostote tekočine. Na sliki 4.3 so prikazane dovoljene in dejanske napetosti za različne višine. Vidimo lahko, da pogoj omejitve

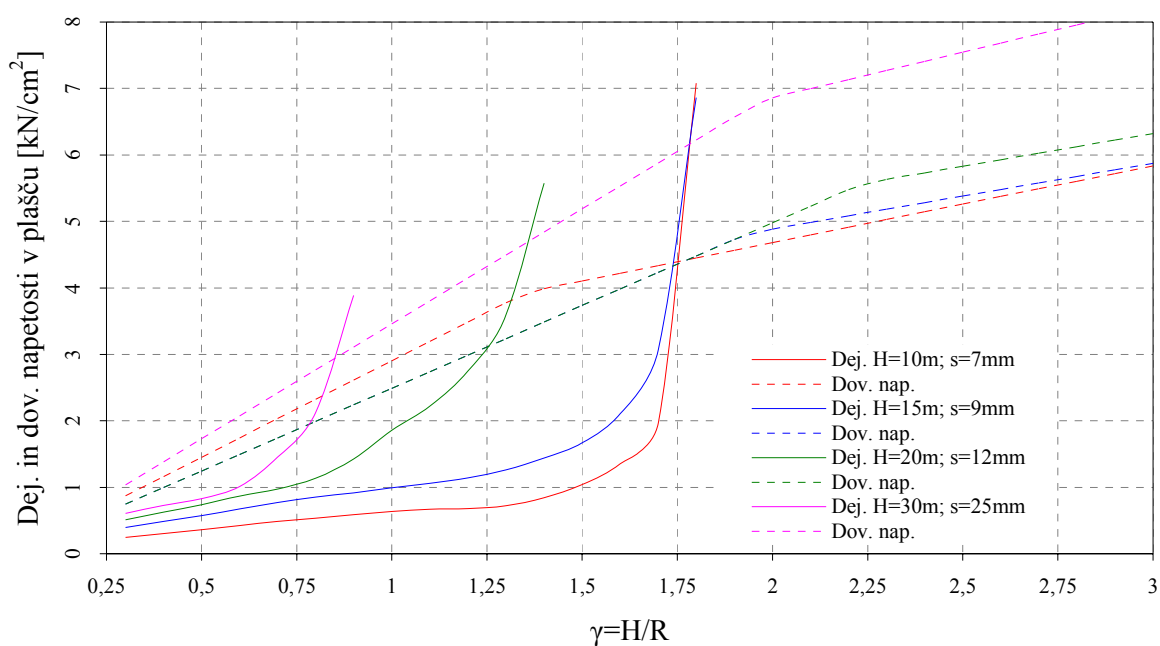


napetosti pri nesidranih nižjih rezervoarjih dopušča vitkejše, višji rezervoarji pa morajo biti široki, da jih ni potrebno sidrati.

#### 4.4.3.1 Kontrola

Za zagotavljanje stabilnosti rezervoarja morajo biti dejanske napetosti v plašču manjše od dovoljenih, kar preverjamo po enačbi (4.13).

$$\sigma_{dejansko} \leq F_a \quad (4.13)$$



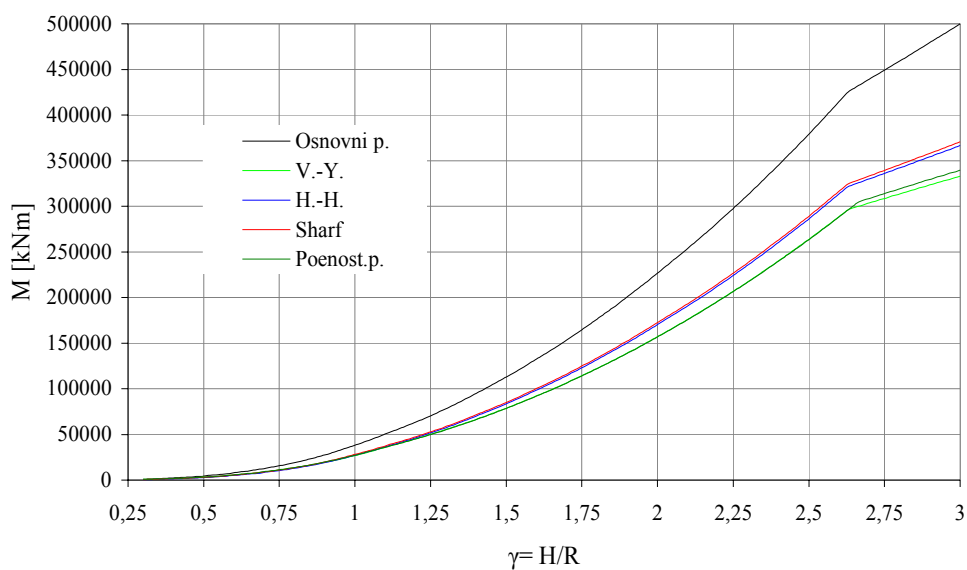
Slika 4.3: Dejanske in dovoljene tlačne napetosti v plašču

## 5 PRIMERJAVE

### 5.1 KOMBINACIJE MOMENTOV IN PREČNIH SIL

#### 5.1.1 Horizontalna komponenta

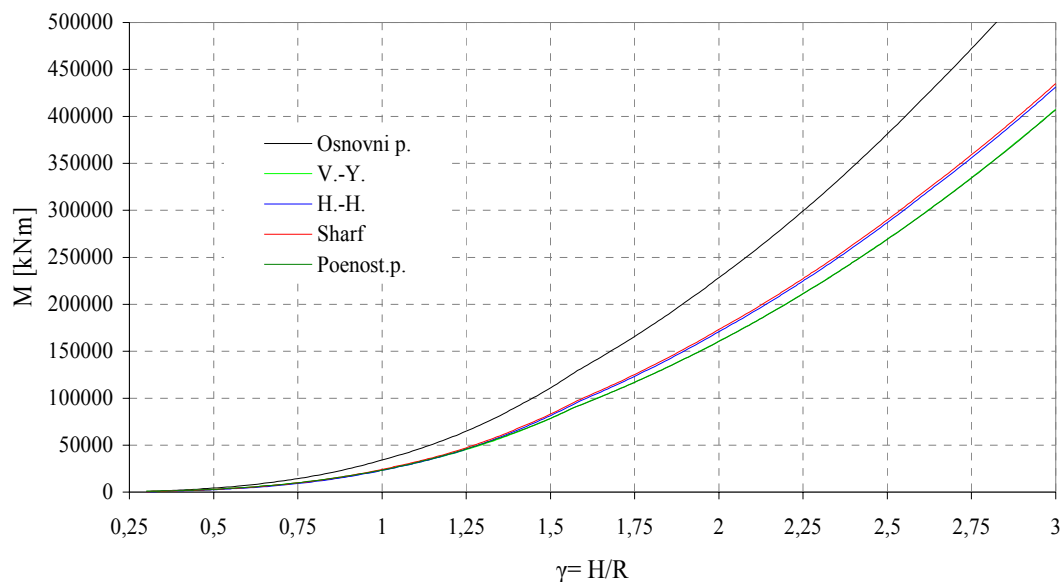
Posamezne vplive togega nihanja rezervoarja in tekočine, valovanja tekočine in elastičnega nihanja stene rezervoarja in tekočine lahko kombiniramo na več načinov predstavljenih v 2.8.1. Kombinacije komponent za določitev maksimalnega vpliva so bolj ali manj konzervativne. Na slikah 5.1 in 5.2 je prikazana odvisnost velikosti prevrtnenega momenta  $M$  za različne postopke kombiniranja komponent ter debelini  $s = 0,01 m$  in  $s = 0,02 m$ . S primerjavo slike 5.1 in 5.2 vidimo vpliv debeline na nihajni čas konstrukcije  $T_f$ , s tem pa tudi na velikost potresnih sil, ki za debelino  $s = 0,01 m$  pri razmerju  $\gamma \approx 2,60$  ne naraščajo več tako strmo. To je vpliv nihajnega časa  $T_f$  s katerim pridemo v spektru pospeškov na del parabole, kjer velikost pospeškov za večje nihajne čase hitro pada.



Slika 5.1: Kombinirane vrednosti za  $R = 10 m$  in  $s = 0,01 m$

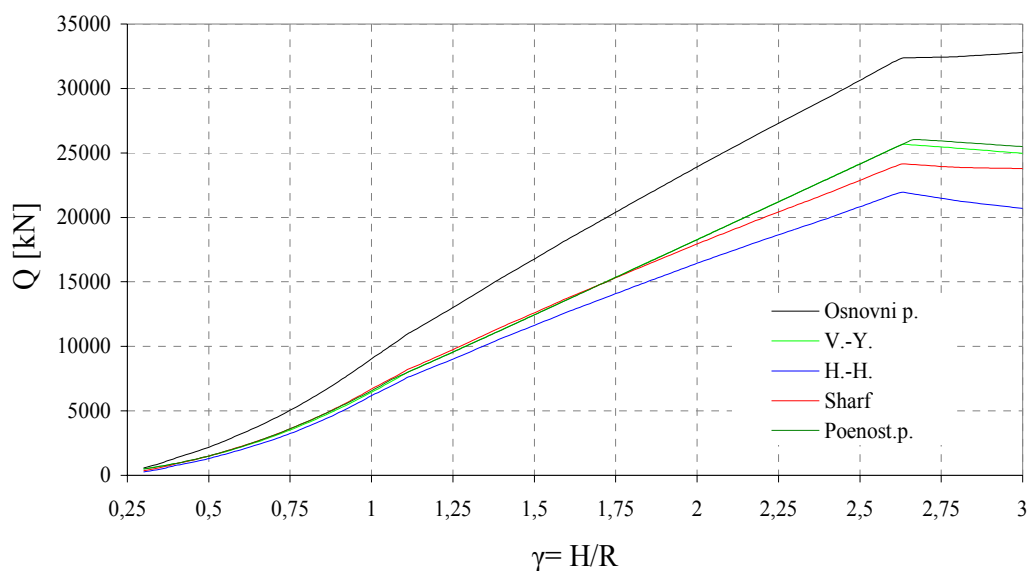
Večja debelina stene na sliki 5.2 ima za posledico manjše nihajne čase  $T_f$  s tem pa tudi večje potresne sile za večja razmerja. Ta vpliv se vidi na sliki 5.2 kjer z vrednostmi nihajnih časov  $T_f$  ne pridemo preko platoja največjih pospeškov v elastičnem spektru pospeškov. Zato tu

vrednosti potresnih sil prikazanih na sliki 5.2 naraščajo v enakem trendu tudi za večja razmerja.

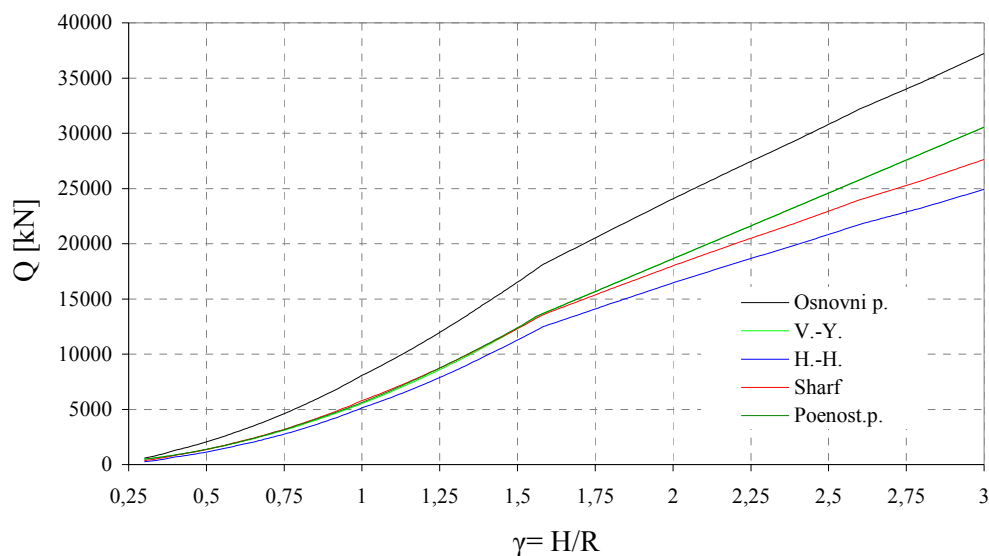


Slika 5.2: Kombinirane vrednosti  $R = 10 \text{ m}$  in  $s = 0,02 \text{ m}$

Podobno kot na velikost prevrtnenega momenta  $M$  velja tudi za strižno silo  $Q$ . Podobno se vidi vpliv nihajnega časa  $T_f$ , saj pri debelini  $s = 0,01 \text{ m}$  za razmerje  $\gamma \approx 2,60$  strižne sile  $Q$  pričnejo padati, medtem ko tega pri debelini  $s = 0,02 \text{ m}$  ni zaradi manjših nihajnih časov  $T_f$ .



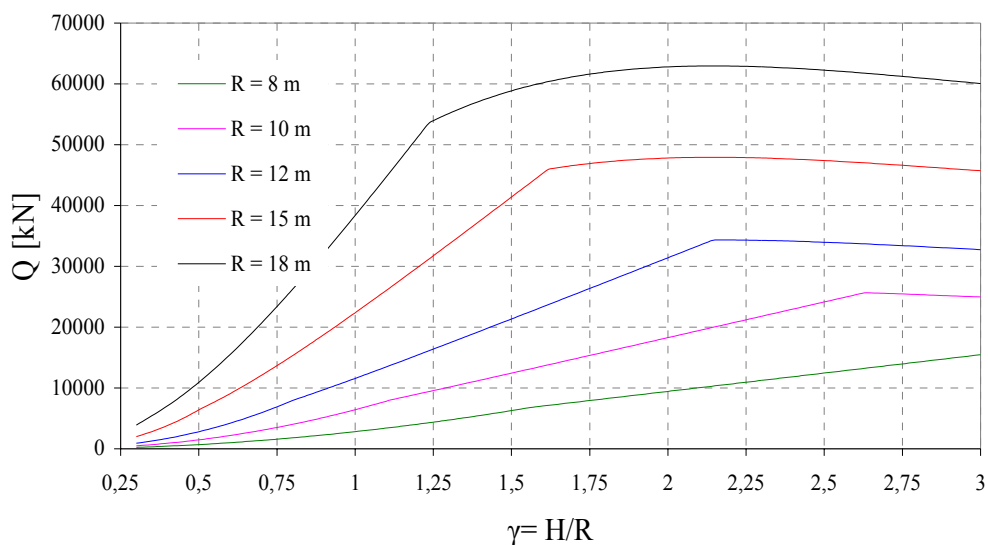
Slika 5.3: Kombinirane vrednosti za  $R = 10 \text{ m}$  in  $s = 0,01 \text{ m}$



**Slika 5.4: Kombinirane vrednosti za  $R = 10\text{ m}$  in  $s = 0,02\text{ m}$**

Z analizo grafičnega prikaza vpliva razmerja rezervoarja na posamezne kombinacije ugotovimo, da najbolj odstopa osnovni postopek kombinacije, kjer maksimalne vrednosti posameznih komponent enostavno seštejemo. Ostale tri kombinacije so si dosti podobne, saj le strižna sila po Haroun-Housner odstopa pod vrednostmi ostalih. Na slikah 5.1 in 5.3 je lepo viden vpliv osnovnega nihajnega časa  $T_f$ , kjer pri razmerju  $\gamma \approx 2,60$  preidemo z nihajnim časom preko platoja ( $T_f > T_C$ ) v elastičnem spektru pospeškov, kjer vrednosti pospeškov za večje nihajne čase hitro padajo, s tem pa tudi velikosti potresnih sil, medtem ko so pri večji debelini nihajni časi  $T_f$  toliko manjši, da ostanemo v območju platoja največjih pospeškov.

Vpliv nihajnega časa  $T_f$  je odvisen tudi od radija  $R$ , kar je prikazano na naslednji sliki 5.5. Vidimo da se vpliv velikosti potresnih sil z večanjem radija pri določenem razmerju prične zmanjševati ravno zaradi večjih nihajnih časov, vendar z normalnimi oblikami rezervoarjev običajno ne pridemo v območje, ker potresne sile pričnejo padati.

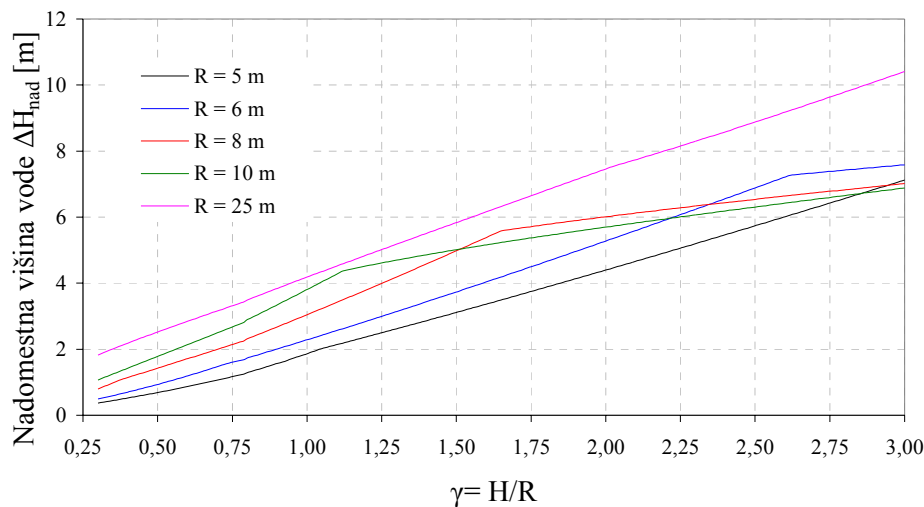


**Slika 5.5: Velikost strižne sile  $Q$  za različne radije  $R$**

Na sliki 5.5 je prav tako viden vpliv nihajnega časa  $T_f$  na velikost potresnih sil kombiniranih po postopku Veletsos-Yang, saj pri visokih rezervoarjih potresne sile ne naraščajo strmo v trendu širokih rezervoarjev kot bi lahko sklepali. Glavni vpliv na velikost potresnih sil ima nihajni čas rezervoarja  $T_f$ , na podlagi katerega določimo vrednosti pospeškov  $S_e(T_f)$  iz elastičnega spektra pospeškov, ki so osnova za določitev potresnih sil.

### 5.1.2 Vertikalna komponenta

Vertikalna komponenta je kombinacija povečanih ali zmanjšanih hidrostatičnih pritiskov zaradi dela togega in elastičnega vertikalnega nihanja. Pri vertikalni obtežbi poglavitno vlogo predstavlja vertikalni pospešek tal  $a_{vg}$ , kot tudi vertikalni nihajni čas  $T_{vf}$ , na podlagi katerega določimo vrednost pospeška iz elastičnega spektra v vertikalni smeri. Vrh spektra oziroma največje vrednosti so od  $0,05 \text{ s}$  do  $0,15 \text{ s}$ , zato so tudi pospeški v območju teh nihajnih časov rezervoarja največji. Vpliv nihajnega časa na hidrostatične pritiske je viden na sliki 5.6 kjer vrednosti za  $R = 8 \text{ m}$  presežejo vrednosti za  $R = 10 \text{ m}$ , ker so nihajni časi za rezervoar ravno v območju največjih pospeškov, medtem ko so večji ali manjši radiji toliko izven območja, da je vpliv manjši.



**Slika 5.6: Vpliv razmerja  $\gamma$  na hidrostatično obtežbo**

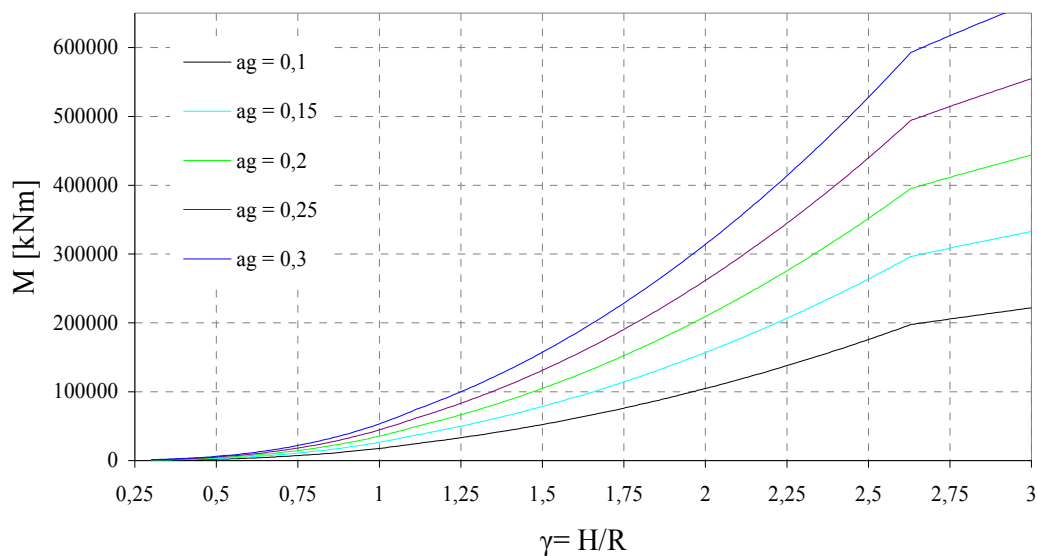
Na sliki 5.6 so prikazane nadomestne višine tekočine  $\Delta H_{nad}$  zaradi povečanja ali zmanjšanja hidrostatičnih pritiskov zaradi boljše predstave kot pa jo predstavlja vrednost pritiska.

Nadomestna višina  $\Delta H_{nad}$  predstavlja povečano ali zmanjšano velikost hidrostatičnega pritiska. Pri kontroli elastičnega izbočenja hidrostatično pritisk deluje ugodno, zato  $\Delta H_{nad}$  predstavlja vrednost zmanjšanja hidrostatičnih pritiskov, pri plastičnem izbočenju pa notranji pritiski delujejo neugodno, zato  $\Delta H_{nad}$  predstavlja povečanje pritiskov z ustrezno kombinacijo ostalih komponent.

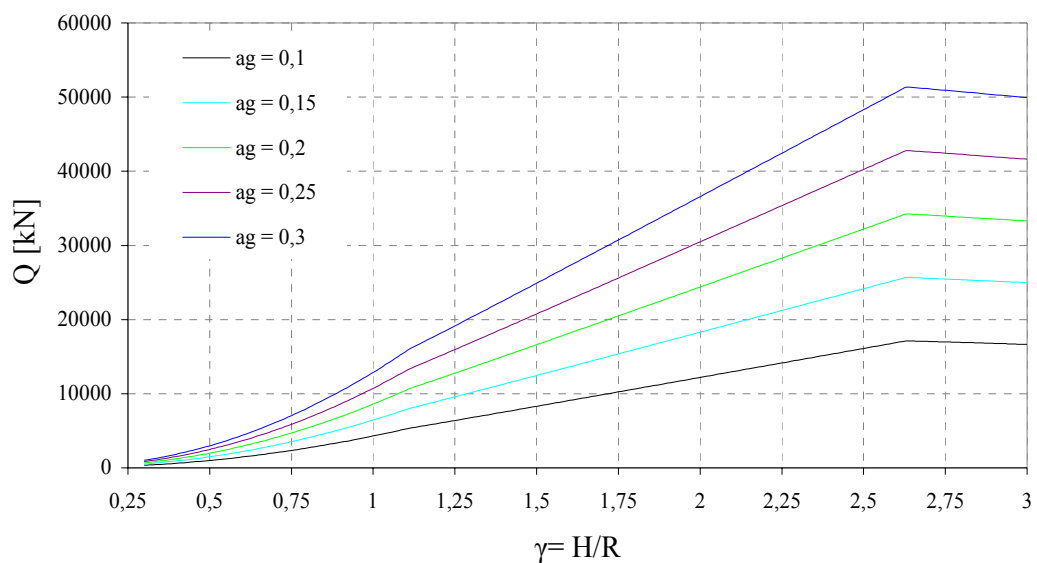
## **5.2 VPLIV POSPEŠKA TAL NA VELIKOST POTRESNIH SIL**

### **5.2.1 Vpliv horizontalnega pospeška tal na velikost potresnih sil**

Projektni pospešek tal  $a_g$  je odvisen od območja na katerem bo stal projektirani objekt, velikost projektne pospeška tal pa je določena kot delež težnostnega pospeška v nacionalnih dodatkih standarda. Za Slovenijo se gibljejo vrednosti od  $0,15 \cdot g$  do  $0,25 \cdot g$ , odvisno od lokacije. Brez primerjav težko sklepamo kakšen je vpliv pospeška na velikost potresnih sil. S primerjavo prevrtnih momentov  $M$  na sliki 5.7 vidimo, da je povečanje pospeška tal  $a_g$  premo sorazmerno s povečanjem prevrtnih momentov  $M$ , podobno kot velja tudi za strižno silo  $Q$  na sliki 5.8. Primerjave potresnih sil so narejene za kombinacijo komponent po Veletsos-Yang.



Slika 5.7: Prevrnitveni moment  $M$  odvisen od pospeška tal  $a_g$  za  $R = 10\text{ m}$  in  $s = 0,01\text{ m}$

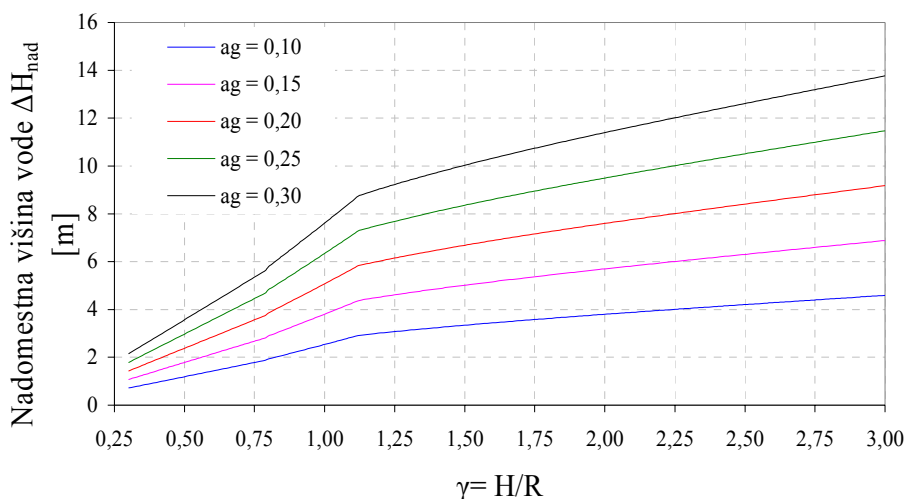


Slika 5.8: Strižna sila  $Q$  odvisna od pospeška tal  $a_g$  za  $R = 10\text{ m}$  in  $s = 0,01\text{ m}$

### 5.2.2 Vpliv pospeška tal $a_{vg}$ na spremembo velikosti hidrostatičnega pritiska

Prav tako kot pri primerjavi velikosti potresnih sil za različne pospeške tal  $a_g$ , primerjamo povečanje oziroma zmanjšanje pritiskov v obliki nadomestne višine  $\Delta H_{nad}$  zaradi vertikalnih pospeškov tal  $a_{vg}$ . Podobno kot pri potresnih silah (prevrnitveni moment  $M$  in strižna sila

$Q$ ) imata velikost hidrostatičnega pritiska  $p_{v,max}$  (nadomestna višina  $\Delta H_{nad}$ ) in pospešek tal  $a_{vg}$  linearen odnos, kar je predstavljeno na sliki 5.9 za radij  $R=10\text{ m}$  in debelino stene  $s=0,01\text{ m}$ .



Slika 5.9: Vpliv pospeška  $a_{vg}$  na velikost hidrostatičnih pritiskov  $p_{v,max}$  ( $\Delta H_{nad}$ )

### 5.3 PPRISPEVKI VIŠJIH NIHAJNIH OBLIK NIHANJA

#### 5.3.1 Vpliv druge nihajne oblike valovanja na strižno silo in upogibni moment

Valovanje tekočine je sestavljeno iz več nihajnih oblik. Na prečno silo  $Q$  na stene rezervoarja imata bistven vpliv prva in druga nihajna oblika. Različni avtorji dovoljujejo zanemarjanje druge nihajne oblike. Na sliki 5.10 je prikazan vpliv deleža druge nihajne oblike valovanja na prevrtni moment  $M_c$  in prečno silo  $Q_c$ , ki je za široke rezervoarje 20-25 %, za visoke rezervoarje pa od 7-8 % vpliva valovanja. Zanemarljiv pa je vpliv druge nihajne oblike valovanja na celotno prečno silo  $Q$  in prevrtni moment  $M$ , ki je prikazan na sliki 5.10. Delež je za zelo široke rezervoarja do 5 % za visoke pa pod 1 %.

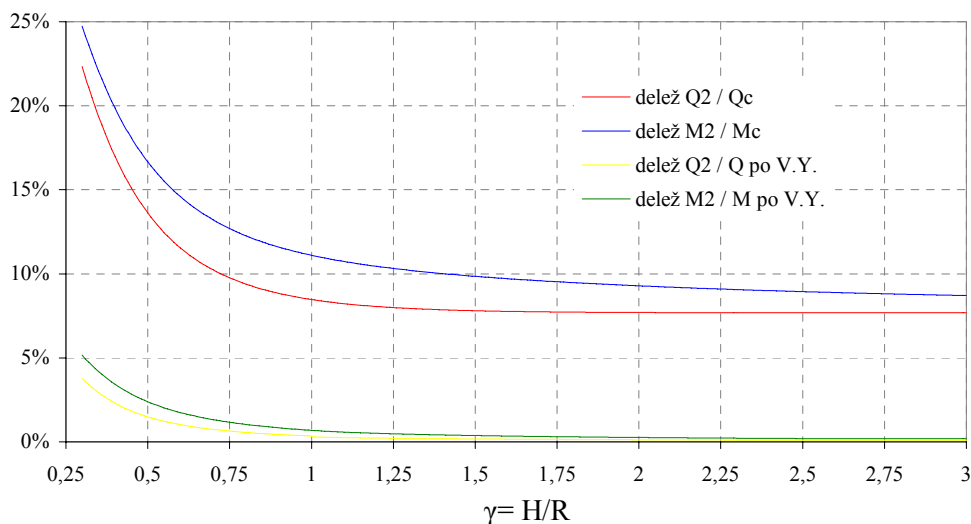
$\frac{Q_{c2}}{Q_c}$  ... delež druge oblike valovanja  $Q_{c2}$  na prečno silo zaradi valovanja  $Q_c$

$\frac{M_{c2}}{M_c}$  ... delež druge oblike valovanja  $M_{c2}$  na prevrtni moment zaradi valovanja  $M_c$



$\frac{Q_{c2}}{Q}$  ... delež druge oblike valovanja  $Q_{c2}$  na kombinirano prečno silo  $Q$  po Veletsos-Yang

$\frac{M_{c2}}{M}$  ... delež druge oblike valovanja  $M_{c2}$  na kombinirani prevrtni moment  $M$  po V.-Y.



**Slika 5.10: Vpliv druge nihajne oblike valovanja**

Tako lahko povzamemo, da brez večje napake lahko zanemarimo drugo nihajno obliko valovanja pri računu prečne sile  $Q_c$  in prevrtnitvenega momenta  $M_c$ , saj je vpliv zanemarljiv.

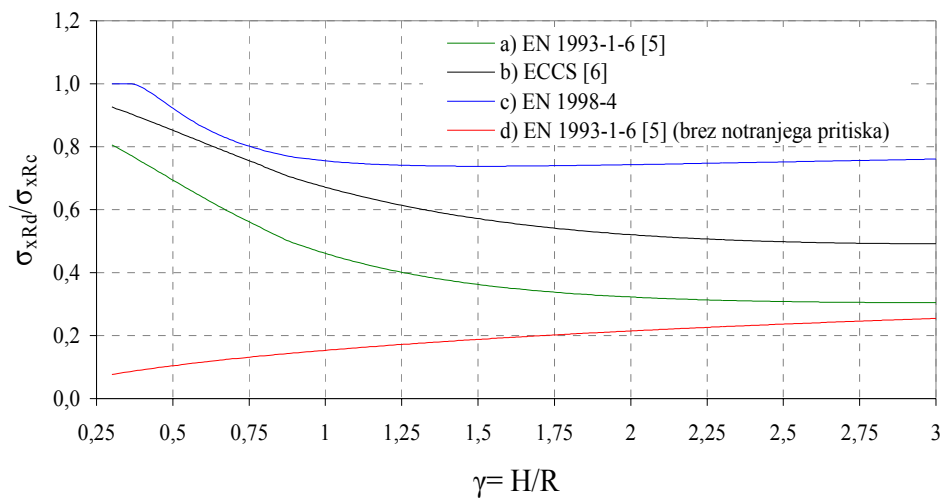
## 5.4 PRIMERJAVE KONTROL

### 5.4.1 Kontrola elastične izbočitve po prEN 1998-4 in EN 1993-1-6

Standard prEN 1998-4 dopušča kontrolo izbočitve tudi po EN 1993-1-6 [5]. V nadaljevanju smo primerjali kontrole elastične izbočitve na štiri načine.

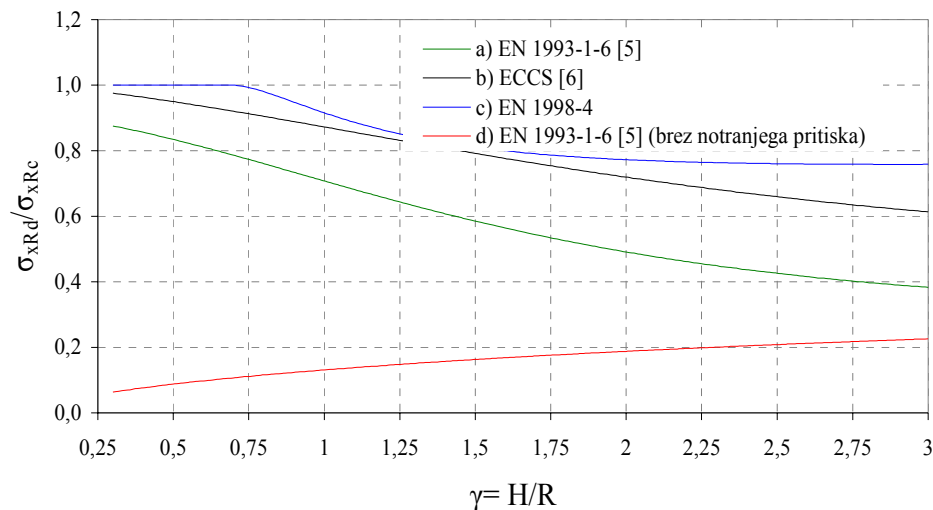
- ... elastično izbočenje po EN 1993-1-6 [5] z upoštevanjem ugodnega vpliva notranjega pritiska
- ... elastično izbočenje po ECCS [6] z upoštevanjem ugodnega vpliva notranjega pritiska
- ... elastično izbočenje po EN 1998-4 z upoštevanjem ugodnega vpliva notranjega pritiska
- ... elastično izbočenje po EN 1993-1-6 [5] brez upoštevanja ugodnega vpliva notranjega pritiska

S primerjavo kontrol na sliki 5.11 za višino rezervoarja  $H = 10\text{ m}$  in debelino  $s = 0,01\text{ m}$  vidimo, da so po prEN 1998-4 dovoljene najvišje vrednosti nosilnosti  $c)$ , medtem ko so po EN 1993-1-6 z upoštevanjem ugodnega vpliva vrednosti za več kot polovico manjše  $a)$ . Prikazan je ugoden vpliv notranjega pritiska v primerjavi  $a)$  z neupoštevanjem notranjega pritiska  $d)$ , ki ima velik vpliv pri širokih rezervoarjih, pri visokih pa se zmanjšuje. Na sliki 5.11 so prikazane normirane nosilnosti  $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$  za višino rezervoarja  $H = 10\text{ m}$ .



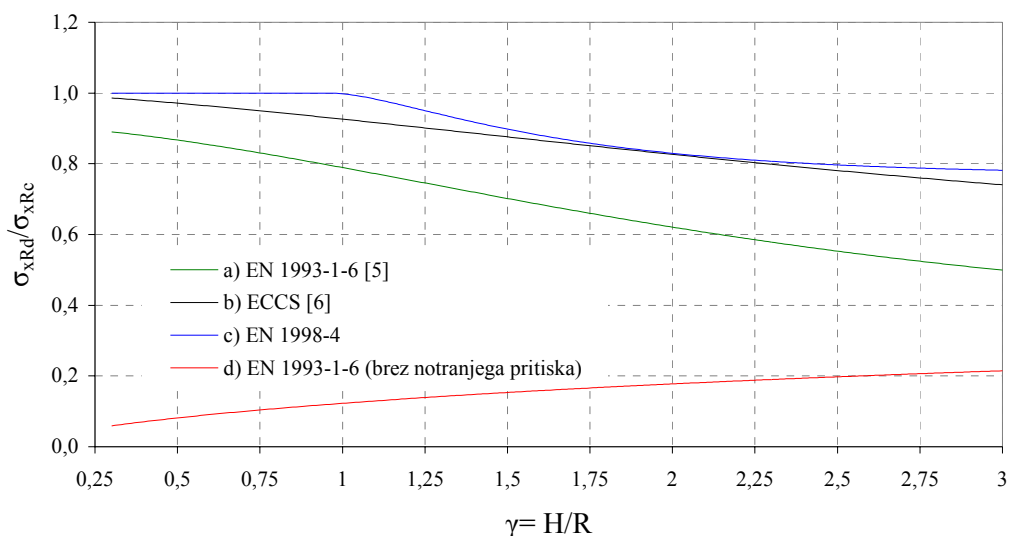
**Slika 5.11: Elastično izbočenje - nosilnost  $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$  za  $H = 10\text{ m}$  in  $s = 0,01\text{ m}$**

Podobno so normirane nosilnosti za  $H = 20\text{ m}$  (slika 5.12) in  $H = 30\text{ m}$  (slika 5.13).



**Slika 5.12: Elastično izbočenje - nosilnost  $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$  za  $H = 20\text{ m}$  in  $s = 0,015\text{ m}$**

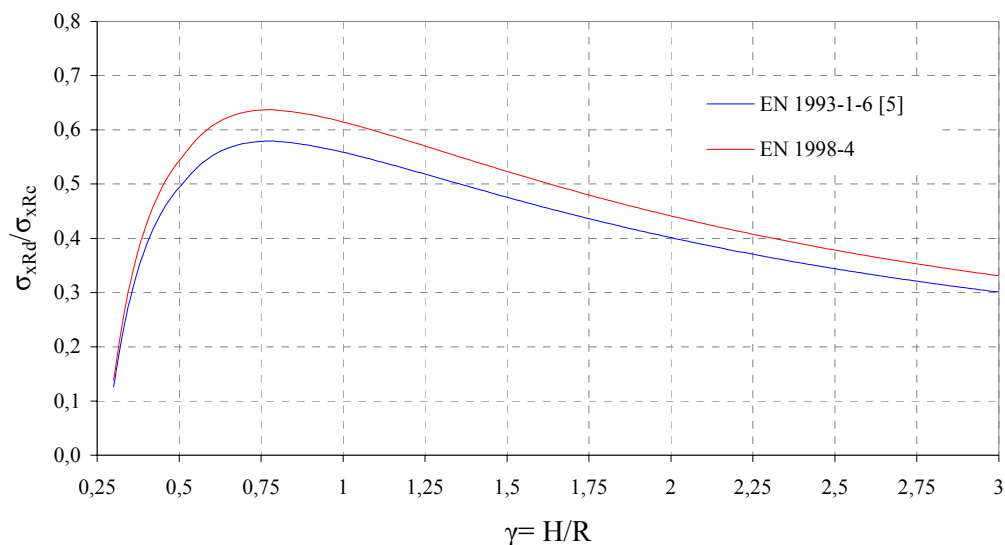
Iz primerjav za večje višine vidimo, da se vrednosti nosilnosti po ECCS [6] in EN 1993-1-6 [5] približujejo vrednostim po prEN 1998-4. Iz tega lahko sklepamo, da notranji pritisk ugodno vpliva na stabilnost elastičnega izbočenja stene rezervoarja. Nosilnost brez upoštevanja ugodnega vpliva notranjega pritiska tudi več kot sedemkrat manjša v primeru upoštevanja ugodnega delovanja le tega.



Slika 5.13: Elastično izbočenje - nosilnost  $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$  za  $H = 30 m$  in  $s = 0,015 m$

#### 5.4.2 Kontrole plastičnega izbočenja

Druga od kontrol stabilnosti pri potresni obtežbi je plastično izbočenje pri temelju, ki ga imenujemo »slonova noga«. Pri tej kontroli notranji pritisk deluje neugodno, saj pri kombinaciji vertikalnih tlačnih napetosti in notranjega pritiska pride do izbočenja v spodnjem delu rezervoarja. S primerjavo enačb za kontrolo plastičnega izbočenja po prEN 1998-4 in po EN 1993-1-6 vidimo, da je kontrola praktično identična, vrednosti v EN 1993-1-6 so manjše le za faktor 1,1.

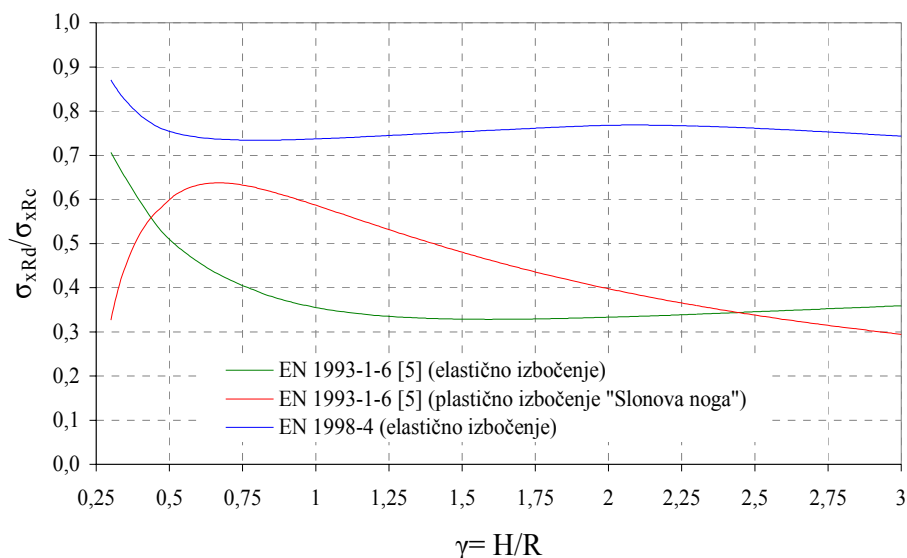


**Slika 5.14: Plastično izbočenje – nosilnost  $\sigma_{xRd} / \sigma_{xRc}$  za  $H = 10\text{ m}$  in  $s = 0,012\text{ m}$**

Tako lahko preverjamo kontrolo plastičnega izbočenja po obeh postopkih, le da je enačba po prEN 1998-4 empirična in enostavna za določitev mejne vertikalne dovoljene napetosti, ki zagotavlja, da ne pride do plastičnega izbočenja.

### 5.4.3 Primerjava nosilnosti elastične in plastične izbočitve

S primerjavo elastične in plastične izbočitve lahko sklepamo, da je vedno merodajna kontrola plastičnega izbočenja, ki je po dovoljenih napetostih glede na elastično kritično napetost vedno manjša od dovoljenih napetosti iz pogoja elastičnega izbočenja. V primeru pa da elastično izbočenje preverjamo po postopku določenem v EN 1993-1-6 [5] je za široke rezervoarje merodajno plastično izbočenje, medtem ko je za visoke merodajno elastično izbočenje, kar se vidi iz slike 5.15.



Slika 5.15: Primerjava elastičnega in plastičnega izbočenja za  $H = 10\text{ m}$  in  $s = 0,015\text{ m}$

#### 5.4.4 Primerjava potrebnih debelin za izpolnitev pogojev

V prEN 1998-4 so dovoljene kontrole stabilnosti za potresno projektno stanje po dveh standardih. Kontrola elastične izbočitve je dovoljena po prEN 1998-4 ali po EN 1993-1-6 [5]. S primerjavo teh kontrol v t.č. 5.4.1 smo videli, da dopušča kontrola po prEN 1998-4 bistveno večje napetosti kot EN 1993-1-6. V nadaljevanju bomo uporabljali kontrolo po prEN 1998-4, na podlagi katere bomo primerjali potrebne debeline sten za različne oblike rezervoarjev in kvalitete materialov. Kontrola plastičnega izbočenja je prav tako dovoljena po prEN 1998-4 in po EN 1993-1-6 [5]. Obe kontroli dajeta enake rezultate, v EN 1993-1-6 [5] so manjše za varnostni faktor  $\gamma = 1,1$ . V nadaljevanju za določitev potrebne debeline stene uporabljali kontrolo plastičnega izbočenja po prEN 1998-4.

S primerjavo potrebnih debelin za izpolnitev posameznih pogojev jih lahko najbolj enostavno primerjamo med seboj, ter grafično vidimo kateri pogojuje največjo potrebno debelino, tisti je potem tudi merodajen. Na sliki 5.16 so prikazane potrebne debeline za pet pogojev.

Krivulji *a*) in *b*) predstavljata debeline za trajno projektno stanje.

*a*) ... potrebna debelina plašča po membranski teoriji (cilinder na dnu je prost) za trajno projektno stanje po obtežni kombinaciji  $1,35 \cdot G + 1,2 \cdot L + 1,5 \cdot S$

b) ... potrebna debelina plašča s predpostavko togo vpetega cilindra v temelj, sile in napetosti pa določene po upogibni teoriji za trajno projektno stanje  $1,35 \cdot G + 1,2 \cdot L + 1,5 \cdot S$

Krivulje c), d) in e) predstavljajo potrebno debelino plašča za potresno projektno stanje.

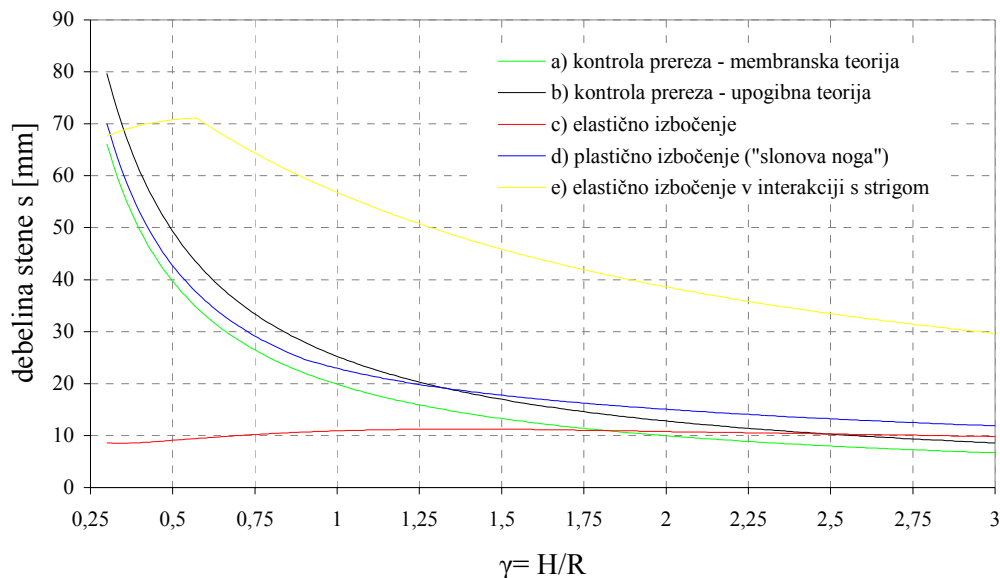
c) ... potrebna debelina plašča za kontrolo elastičnega izbočenja po prEN 1998-4 z upoštevanjem ugodnega vpliva notranjega pritiska

d) ... potrebna debelina plašča za kontrolo plastičnega izbočenja po prEN 1998-4 (»slonova noga«)

e) ... potrebna debelina plašča za kontrolo elastičnega izbočenja po prEN 1998-4 v interakciji s strižnim izbočenjem (EN 1993-1-6 [5]) brez upoštevanja ugodnega vpliva notranjega pritiska

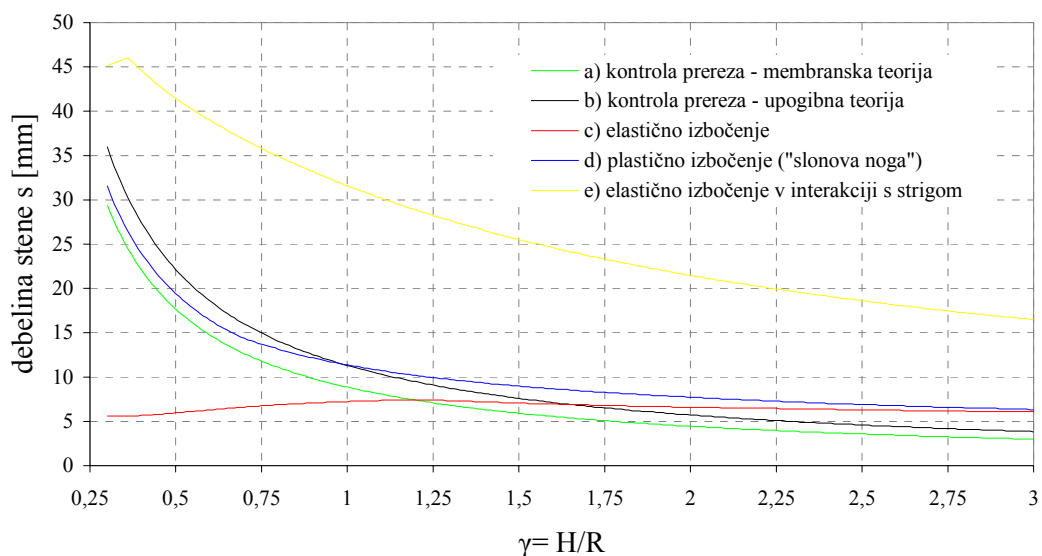
V nadaljevanju so prikazane potrebne debeline plašča za dve višini, v prilogi pa so sistematično v obliki tabel zbrane potrebne debeline plašča za različne pospeške in kvalitete materiala.

Na sliki 5.16 so prikazane potrebne debeline stene  $s$  za višino rezervoarja  $H = 30\text{ m}$  in kvaliteto materiala  $f_y = 49\text{ kN/cm}^2$ , kjer vidimo da je za široke rezervoarje merodajna kontrola nosilnosti prereza za visoke pa kontrola plastičnega izbočenja.



**Slika 5.16: Potrebna debelina stene  $s$  za  $H = 30\text{ m}$  in  $f_y = 49\text{ kN/cm}^2$**

Podobno dobimo s primerjavo debelin za manjše višine rezervoarja. Iz grafa se vidi, da v primeru neupoštevanja strižnih sil pri izbočenju še vedno ostaja merodajna kontrola elastoplastične porušitve, le da se meja pomika še bolj proti širokim rezervoarjem.



**Slika 5.17: Potrebna debelina stene  $s$  za  $H = 20 m$  in  $f_y = 49 kN/cm^2$**

Na sliki 5.17 so prikazane potrebne debeline stene  $s$  za rezervoar višine  $H = 20 m$ , ki so za približno polovico manjše kot pri zgornjem rezervoarju. Še vedno pa ostajajo razmerje in merodajne kontrole v podobnem razmerju. Iz slik tudi vidimo, da se posamezne kontrole za določeno razmerje  $H/R$  zelo približajo. To razmerje je pri višini  $H = 30 m$  približno  $H/R = 1,3$  za nižjega  $H = 20 m$  pa je to pri razmerju  $H/R = 1,0$ .

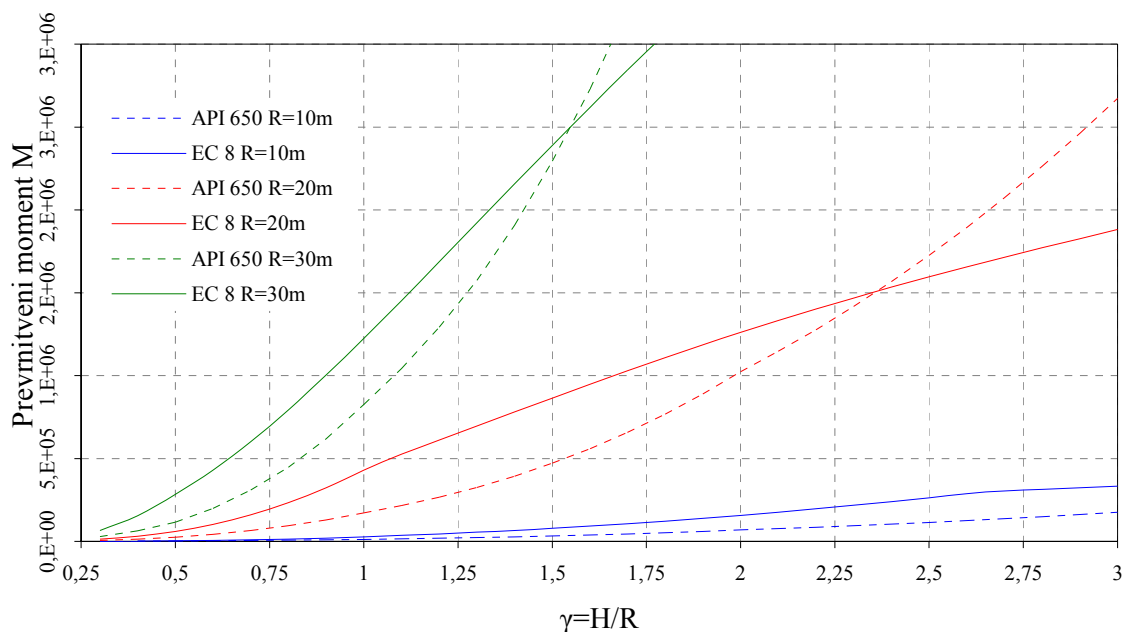
Na slikah 5.16 in 5.17 vidimo, da je merodajna kontrola plastičnega izbočenja za visoke rezervoarje pri potresnem projektnejem stanju, za široke pa je merodajna kontrola prereza za trajno projektno stanje.

Z upoštevanjem interakcije strižnega in normalnega izbočenja pa dobimo potrebne debeline tudi dvakrat večje, vendar pri strižnem izbočenju ne moremo upoštevati ugodnega vpliva notranjega pritiska. V objavljenih raziskavah ni bil omenjen problem strižnega izbočenja, zato ta kontrola ni ustrezna, ker ne upošteva notranjega pritiska. Dobro pa bi bilo raziskati vpliv notranjega pritiska na strižno izbočenje.

## 5.5 PRIMERJAVE KOLIČIN MED API 650 IN prEN 1998-4

### 5.5.1 Prevrnitveni moment

S primerjavo prevrnitvenih momentov  $M$  med API 650 in prEN 1998-4 vidimo, da dobimo po API 650 približno za polovico manjše kot po prEN 1998-4. Vendar pa to velja le za široke rezervoarje, kajti pri visokih rezervoarjih dobimo večje momente po API 650. Prevrnitveni momenti  $M$  za različne radije in razmerja so prikazani na sliki 5.18.

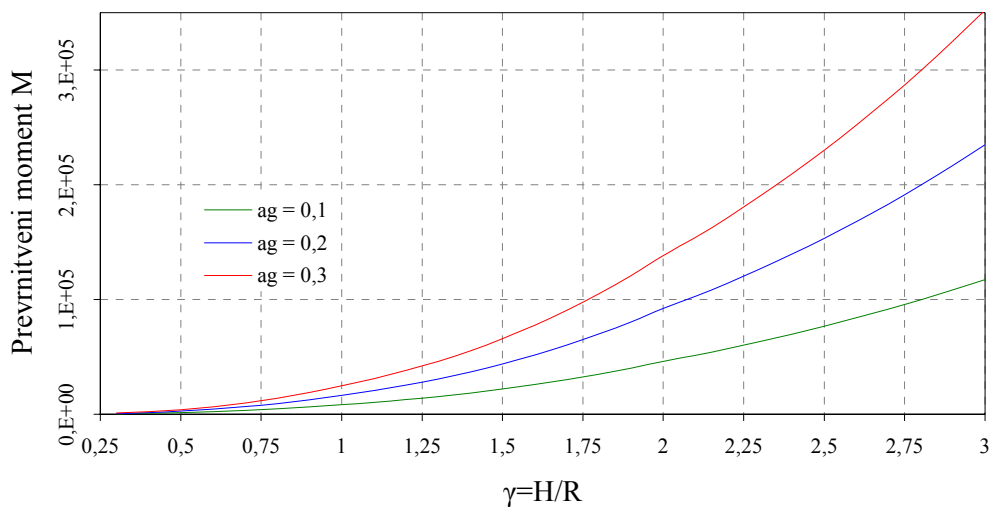


Slika 5.18: Primerjava prevrnitvenih momentov med API 650 in prEN 1998-4

### 5.5.2 Vpliv pospeška tal na velikost prevrnitvenega momenta

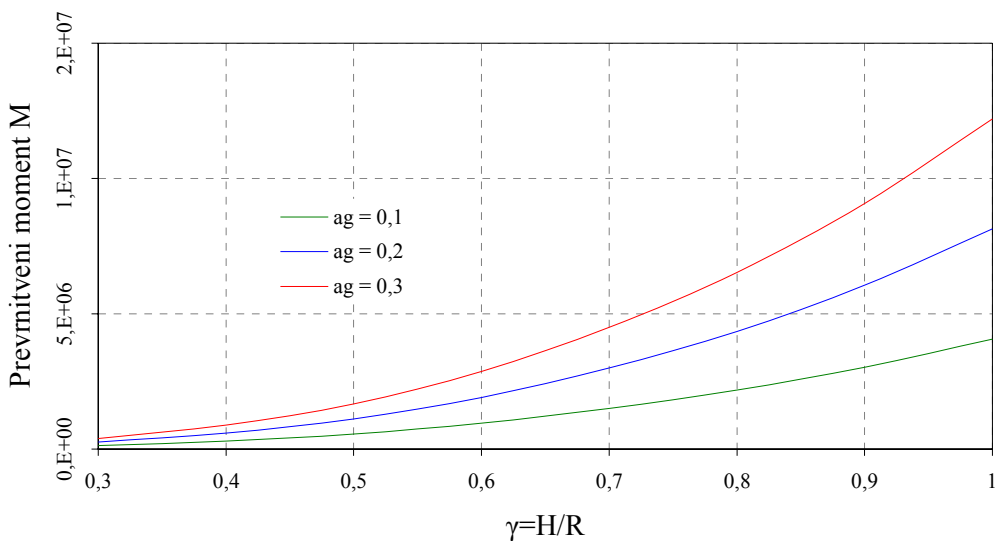
Pospešek tal  $a_g$  ima glavni vpliv na obremenitve rezervoarja in s tem na velikost prevrnitvenega momenta  $M$ . S primerjanjem velikosti prevrnitvenega momenta ugotovimo, da se velikost premo sorazmerno povečuje s povečanjem pospeška tal  $a_g$ . Grafično je vpliv prikazan na sliki 5.19 in 5.20 za dva različna radija rezervoarja.





Slika 5.19: Prevrnitveni moment za  $R = 10\text{ m}$  in različne pospeške tal  $a_g$

Pri primerjavah za radij  $R = 50\text{ m}$  so primerjave narejene samo do višine enake radiju, ker večje višine niso smiselne.



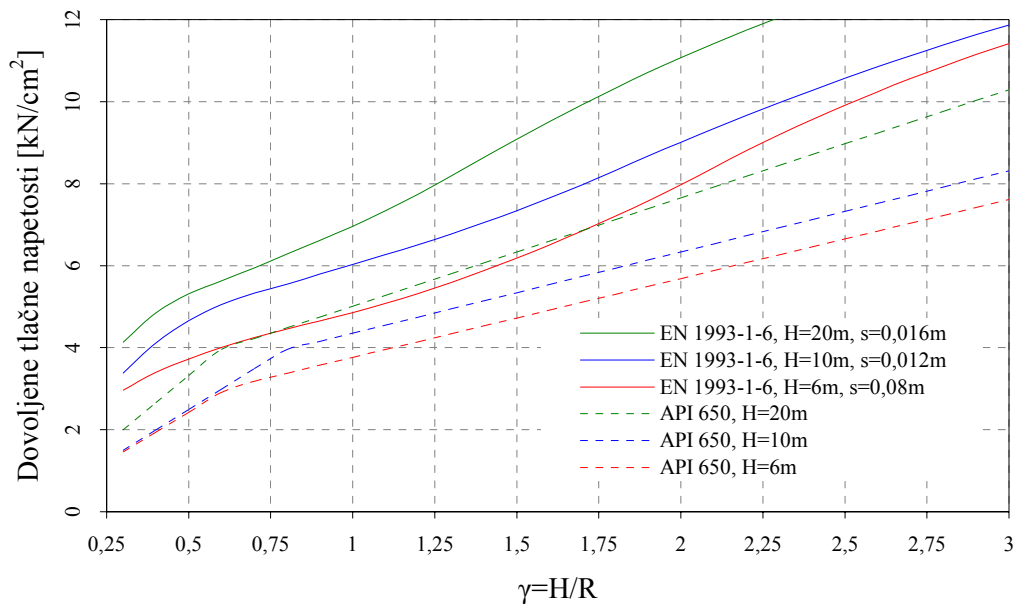
Slika 5.20: Prevrnitveni moment za  $R = 50\text{ m}$  in različne pospeške tal  $a_g$

Iz slik 5.19 in 5.20 vidimo, da je prav tako kot prEN 1998-4 tudi po API 650 velikost potresnih sil prenosorazmerna z velikostjo pospeška tal  $a_g$ .

### 5.5.3 Največje dovoljene napetosti

Primerljive vrednosti, katere lahko primerjamo med tema dvema standardoma so največje dovoljene tlačne napetosti, katere omejujejo, da ne bi zaradi tlačnih napetosti prišlo do izbočenja stene rezervoarja, kar ima lahko v posebnih primerih usodne posledice za porušitev.

Na sliki 5.21 so prikazane največje dovoljene napetosti.



**Slika 5.21: Največje dovoljene napetosti**

Dovoljene napetosti v plašču po API 650 so za približno 30 % manjše od vrednosti dobljenih po EN 1993-1-6 [5] za kontrolo izbočenja ob upoštevanju ugodnega vpliva notranjega pritiska.

## 6 RAČUNSKI PRIMER PO prEN 1998-4

Obravnavani rezervoar je bil zgrajen za potrebe skladiščenja naftnih derivatov v Serminu pri Kopru v letu 2003. V računskem primeru je preverjena potrebna debelina spodnjega ovoja plašča glede na zahteve projektiranja na potresno obtežbo.

### 6.1 TEHNIČNI PODATKI PRIMERA REZERVOARJA

Višina polnjenja rezervoarja:	$H = 21,4 \text{ m}$
Premer rezervoarja:	$D = 2 \cdot R = 61 \text{ m}$
Specifična teža (masa) medija (nafta):	$\gamma_{fluid} = 8,44 \text{ kN} / \text{m}^3$ ( $\rho_{fluid} = 860 \text{ kg} / \text{m}^3$ )
Meja plastičnosti za material:	$f_{y,k} = 49 \text{ kN} / \text{cm}^2$
Debelina spodnjega dela plašča:	$s = 18 \text{ mm}$
Pospešek tal:	$a_g = 0,2 \cdot g$
Težnostni pospešek	$g = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2$
Masa vsebine rezervoarja	$m_{tot} = 53\,785\,075 \text{ kg}$

### 6.2 DOLOČITEV POTRESNE OBTEŽBE

#### 6.2.1 Togi vertikalni krožni rezervoarji, sidrani v temelj

##### 6.2.1.1 Vodoravno potresno vzbujanje

##### Togo nihanje

Najprej določimo razmerje višine in radija, na podlagi katerih grafično iz slik 2.3 - 2.5 določimo razmerja za določitev obremenitev. Težo sten rezervoarja prištejemo k teži togega nihanja  $m_i$ . Masa sten je  $m_w = 575\,785 \text{ kg}$  in ročica glede na temelj  $h_w = 10,7 \text{ m}$

$$\frac{H}{R} = 0,7 \quad (6.1)$$

$$\frac{m_i}{m_{tot}} = 0,415; \quad \frac{h_i}{H} = 0,400; \quad \frac{h'_i}{H} = 1,007; \quad (6.2)$$

Te podatke uporabimo za določitev potresne obtežbe tega nihanja rezervoarja (strižno silo  $Q_i$ , prevrtni moment  $M_i$ ),

$$Q_i = (m_i + m_w) \cdot a_g = \underline{44892 \text{ kN}} \quad (6.3)$$

$$M_i = Q_i \cdot h_i = (m_i \cdot h_i + m_w \cdot h_w) \cdot a_g = \underline{387100 \text{ kNm}} \quad (6.4)$$

$$M'_i = Q_i \cdot h'_i = (m_i \cdot h'_i + m_w \cdot h_w) \cdot a_g = \underline{954739 \text{ kNm}} \quad (6.5)$$

### Valovanje tekočine

Obtežba zaradi valovanja tekočine je odvisna od nihajnega časa valovanja, ki ga določimo za prvo in drugo nihajno obliko po enačbah (6.6) in (6.7).

$$T_{c1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{\lambda_1}{R} \cdot \tanh(\lambda_1 \cdot \gamma)} = \underline{8,908 \text{ s}} \quad (6.6)$$

$$T_{c2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{\lambda_2}{R} \cdot \tanh(\lambda_2 \cdot \gamma)} = \underline{4,801 \text{ s}} \quad (6.7)$$

Nihajne čase za prvo in drugo nihajno obliko uporabimo za določitev vrednosti pospeška iz elastičnega spektra iz t.č. 2.3.1 za vrednost dušenja  $\xi = 0,5\%$ .

$$S_e(T_{c1}) = \underline{0,067 \text{ m/s}^2} \quad (6.8)$$

$$S_e(T_{c2}) = \underline{0,230 \text{ m/s}^2} \quad (6.9)$$

Za določitev velikosti potresne sile zaradi valovanja tekočine moramo iz slik 2.7 – 2.9 določiti koeficiente deležev mas prve in druge nihajne oblike ter njihove ročice v odvisnosti od razmerja višine in radija.

$$\frac{m_{c1}}{m_{ot}} = 0,589; \frac{m_{c2}}{m_{ot}} = 0,019; \frac{h_{c1}}{H} = 0,558; \frac{h_{c2}}{H} = 0,745; \frac{h'_{c1}}{H} = 1,037; \frac{h'_{c2}}{H} = 0,758; \quad (6.10)$$

S temi podatki določimo potresne sile zaradi valovanja.

$$Q_C = m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) = \underline{2354 \text{ kN}} \quad (6.11)$$

$$M_C = m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) = \underline{29072 \text{ kNm}} \quad (6.12)$$

$$M'_C = m_{c1} \cdot h'_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h'_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) = \underline{50820 \text{ kNm}} \quad (6.13)$$

### 6.2.1.2 Vertikalna komponenta potresnega vzburjanja

Zaradi potresnega vzburjanja v vertikalni smeri nastanejo v rezervoarju povečani hidrostatični pritiski, ki jih določimo v odvisnosti od velikosti vertikalnega pospeška tal  $a_v$ .

$$p_{vr} = \rho_{fluid} \cdot H \cdot (1 - \zeta) \cdot a_{vg} = \underline{32\,498\text{ N/m}^2} \quad (6.14)$$

## 6.2.2 **Deformabilni vertikalni krožni rezervoarji, sidrani v temelj**

### 6.2.2.1 Horizontalna komponenta potresnega vzburjanja

#### Elastično nihanje

Velikost potresnih sil zaradi elastičnega nihanja rezervoarja je odvisna od osnovnega nihajnega časa nihanja sten rezervoarja skupaj s tekočino.

$$T_f = \frac{2 \cdot R}{(0,01675 \cdot \gamma^2 - 0,15 \cdot \gamma + 0,46)} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{fluid} \cdot H}{E \cdot s}} = \underline{0,380\text{ s}} \quad (6.15)$$

V odvisnosti od nihajnega časa sistema določimo vrednost pospeška iz elastičnega spektra za vrednost dušenja  $\xi = 5\%$ .

$$S_e(T_f) = \underline{4,905\text{ m/s}^2} \quad (6.16)$$

Koeficienta  $m_f$  in  $h_f$  sta odvisna od razmerja  $H/R$  katera določimo grafično iz [2],

$$\frac{m_f}{m_{tot}} = 0,423; \quad \frac{h_f}{H} = 0,400; \quad (6.17)$$

nato določimo potresne sile zaradi elastičnega nihanja rezervoarja.

$$Q_f = m_f \cdot S_e(T_f) = \underline{111\,594\text{ kN}} \quad (6.18)$$

$$M_f = m_f \cdot h_f \cdot S_e(T_f) = \underline{955\,842\text{ kNm}} \quad (6.19)$$

### 6.2.2.2 Vertikalna komponenta potresne obtežbe

Zaradi vertikalnih pospeškov tal ravno tako nastopijo povečani hidrostatični pritiski, v odvisnosti od osnovnega vertikalnega nihajnega časa konstrukcije.

$$T_{vf} = \frac{2 \cdot R}{\sqrt{\frac{E \cdot s \cdot I_1(\gamma_1)}{2 \cdot H \cdot \pi \cdot \rho_{fluid} \cdot (I_0(\gamma_1) - \nu^2 \cdot I_1(\gamma_1))}}} = \underline{0,385\text{ s}} \quad (6.20)$$

Vrednost pospeška v odvisnosti od vertikalnega nihajnega časa sistema določimo za koeficient dušenja  $\xi = 5\%$ .

$$S_e(T_{vf}) = \underline{2,063 \text{ m/s}^2} \quad (6.21)$$

Povečani hidrostatični pritiski zaradi vertikalnega nihanja rezervoarja:

$$p_{vf} = 0,815 \cdot f(\gamma) \cdot \rho_{fluid} \cdot H \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \zeta\right) \cdot S_e(T_{vf}) = \underline{30\,948 \text{ N/m}^2} \quad (6.22)$$

### 6.2.3 Določitev potresne obtežbe po poenostavljenem postopku [8]

Iz tabele 2.5 odčitamo vrednosti koeficientov v odvisnosti od razmerja  $\gamma = H/R$

$\gamma = H/R$	$C_i$	$C_c [s/\sqrt{m}]$	$m_i/m_{tot}$	$m_c/m_{tot}$	$h_i/H$	$h_c/H$	$h'_i/H$	$h'_c/H$
0,70	6,970	1,600	0,415	0,589	0,400	0,558	1,007	1,037

#### Račun

Nihajni časi togega nihanja  $T_{imp}$  in valovanja tekočine  $T_{con}$ .

$$T_{imp} = C_i \cdot \frac{H \cdot \sqrt{\rho_{fluid}}}{\sqrt{s/R} \cdot \sqrt{E}} = \underline{0,403 \text{ s}} \quad (6.23)$$

$$T_{con} = C_c \cdot \sqrt{R} = \underline{8,836 \text{ s}} \quad (6.24)$$

Masa togega nihanja  $m_i$  in valovanja tekočine  $m_c$ .

$$m_i = 0,415 \cdot m_{tot} = \underline{22\,304\,751 \text{ kg}} \quad (6.25)$$

$$m_c = 0,589 \cdot m_{tot} = \underline{31\,699\,920 \text{ kg}} \quad (6.26)$$

Vrednosti pospeškov iz elastičnega spektra iz slike 2.1 v odvisnosti od nihajnega časa  $T_{imp}$  za dušenje  $\xi = 5\%$  ter nihajnega časa  $T_{con}$  za dušenje  $\xi = 0,5\%$ .

$$S_e(T_{imp}) = \underline{4,873 \text{ m/s}^2} \quad (6.27)$$

$$S_e(T_{con}) = \underline{0,068 \text{ m/s}^2} \quad (6.28)$$

Strižna sila  $Q$  nad dnom rezervoarja, prevrtni moment  $M$  tik nad dnom rezervoarja in  $M'$  tik pod dnom rezervoarja.

$$Q = (m_i + m_w) \cdot S_e(T_{imp}) + m_c \cdot S_e(T_{con}) = \underline{113\,647 \text{ kN}} \quad (6.29)$$

$$M = (m_i \cdot h_i + m_w \cdot h_w) \cdot S_e(T_{imp}) + m_c \cdot h_c \cdot S_e(T_{con}) = \underline{987\,103\,kNm} \quad (6.30)$$

$$M' = (m_i \cdot h_i' + m_w \cdot h_w) \cdot S_e(T_{imp}) + m_c \cdot h_c' \cdot S_e(T_{con}) = \underline{2\,419\,007\,kNm} \quad (6.31)$$

## 6.3 KOMBINACIJE VPLIVOV

### 6.3.1 Horizontalne komponente potresne obtežbe

Kombiniranje horizontalnih komponent obtežbe po različnih postopkih, predstavljenih v t.č. 2.8.1.

#### 6.3.1.1 Osnovni postopek

$$Q = m_i \cdot a_g + m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) + m_f \cdot S_e(T_f) = \underline{158\,840\,kN} \quad (6.32)$$

$$M = m_i \cdot h_i \cdot a_g + m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) + m_f \cdot h_f \cdot S_e(T_f) = \underline{1\,372\,014\,kNm} \quad (6.33)$$

#### 6.3.1.2 Postopek po Veletsos-Yang

$$Q = m_i \cdot S_e(T_f) + m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) = \underline{114\,583\,kN} \quad (6.34)$$

$$M = m_i \cdot h_i \cdot S_e(T_f) + m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}) + m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}) = \underline{996\,821\,kNm} \quad (6.35)$$

#### 6.3.1.3 Postopek po Haroun-Hausner

$$Q = \sqrt{(m_f \cdot S_e(T_f))^2 + \left(\sum_{n=1}^2 m_{cn} \cdot S_e(T_{cn})\right)^2} + ((m_i - m_f) \cdot a_g)^2 = \underline{111\,619\,kN} \quad (6.36)$$

$$M = \sqrt{(m_f \cdot h_f \cdot S_e(T_f))^2 + \left(\sum_{n=1}^2 m_{cn} \cdot h_{cn} \cdot S_e(T_{cn})\right)^2} + ((m_i \cdot h_i - m_f \cdot h_f) \cdot a_g)^2 = \underline{1\,015\,756\,kNm} \quad (6.37)$$

#### 6.3.1.4 Postopek po Scharf [10]

$$Q = \sqrt{(m_i \cdot a_g)^2 + (m_{c1} \cdot S_e(T_{c1}))^2 + (m_{c2} \cdot S_e(T_{c2}))^2 + (m_f \cdot S_e(T_f))^2} = \underline{120\,308\,kN} \quad (6.38)$$

$$M = \sqrt{(m_i \cdot h_i \cdot a_g)^2 + (m_{c1} \cdot h_{c1} \cdot S_e(T_{c1}))^2 + (m_{c2} \cdot h_{c2} \cdot S_e(T_{c2}))^2 + (m_f \cdot h_f \cdot S_e(T_f))^2} = \underline{1\,031\,662\,kNm} \quad (6.39)$$

#### 6.3.1.5 Poenostavljen postopek

Potresne obremenitve po poenostavljenem postopku so določene v t.č. 6.2.3.

$$Q = \underline{113\,647\,kN} \quad (6.40)$$

$$M = \underline{987\,103\,kNm} \quad (6.41)$$

### 6.3.2 Kombinacija vpliva vertikalne obtežbe

Povečanje hidrostatičnih pritiskov vertikalne potresne obtežbe togega dela in dela elastičnega nihanja kombiniramo po pravilu koren vsote kvadratov.

$$p_{v,\max} = \sqrt{(p_{vr})^2 + (p_{vf})^2} = \underline{44\,876\,N/m^2} \quad (6.42)$$

## 6.4 NAPETOSTI V PLAŠČU PRI POTRESNI OBTEŽBI

V nadaljevanju pri določanju napetosti in kontrol uporabimo vrednosti potresnih obremenitev iz kombinacije po Veletsos-Yang (6.34) in (6.35).

### 6.4.1 Horizontalna potresna obtežba

#### 6.4.1.1 Strižne in normalne napetosti.

$$\tau_{\max Q} = \pm \frac{Q}{\pi \cdot R \cdot s} = \underline{\pm 6,644\,kN/cm^2} \quad (6.43)$$

$$\sigma_{xM} = \pm \frac{M}{\pi \cdot R^2 \cdot s} = \underline{\pm 1,895\,kN/cm^2} \quad (6.44)$$

### 6.4.2 Vertikalna potresna obtežba

#### 6.4.2.1 Lastna teža strehe in plašča

Pri določitvi teže plašča upoštevamo v primeru, kot bi bil plašč po celotni višini enako debel kot spodaj, vendar upoštevamo le polovico teže, težo strehe pa predpostavimo  $G_{strehe} = 400kN$ . Težo plašča in strehe seštejemo in uporabimo za določitev napetosti kot vrednost  $G$ .

$$\sigma_{xG} = \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot s} = \underline{0,094\,kN/cm^2} \quad (6.45)$$



#### 6.4.2.2 Povečana teža strehe in plašča zaradi vertikalnih pospeškov

$$\Delta\sigma_{xG} = \sigma_{xG} \cdot \frac{a_{vg}}{g} = \underline{0,017 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.46)$$

#### 6.4.2.3 Sneg na strehi

Karakteristična vrednost snega za območje Kopra je  $S_{sneg} = 0,25 \text{ kN/m}^2$ , v odvisnosti od katere določimo napetosti v plašču zaradi teže snega.

$$\sigma_{xS} = \frac{R \cdot S_{sneg}}{2 \cdot s} = \underline{0,021 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.47)$$

#### 6.4.2.4 Povečana teža snega zaradi vertikalnih pospeškov

$$\Delta\sigma_{xS} = \frac{a_{vg}}{g} \cdot \sigma_{xS} = \underline{0,004 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.48)$$

#### 6.4.2.5 Hidrostatični pritisk

Hidrostatični pritisk povzroča v plašču ob vpetem dnu upogibne momente in prečno silo, s katerimi nato določimo napetosti ob vpetem dnu plašča po upogibni teoriji.

$$m_x = 2 \cdot R^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{fluid} \cdot H \cdot \frac{K}{E \cdot s} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda \cdot H}\right) = \underline{29,187 \text{ kNm/m}} \quad (6.49)$$

$$m_\theta = v \cdot m_x = \underline{8,756 \text{ kNm/m}} \quad (6.50)$$

$$q_x = -2 \cdot \frac{K}{E \cdot s} \cdot R^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{fluid} \cdot (2 \cdot \lambda \cdot H - 1) = \underline{-102,669 \text{ kN/m}} \quad (6.51)$$

Napetosti določene iz upogibnih momentov in prečne sile.

$$\sigma_{xL} = \pm \frac{4 \cdot m_x}{t^2} = \underline{36,033 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.52)$$

$$\sigma_{\theta L} = \pm \frac{4 \cdot m_\theta}{t^2} = \underline{10,810 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.53)$$

$$\tau_{xL} = \frac{q_x}{t} = \underline{-0,750 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.54)$$

#### 6.4.2.6 Povečani hidrostatični pritiski zaradi vertikalnih pospeškov

$$\Delta m_x = 2 \cdot R^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{fluid} \cdot \Delta H_{nad} \cdot \frac{K}{E \cdot s} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda \cdot \Delta H_{nad}}\right) = \underline{6,648 \text{ kNm/m}} \quad (6.55)$$

$$\Delta m_{\theta} = \nu \cdot \Delta m_x = \underline{1,994 \text{ kNm} / \text{m}} \quad (6.56)$$

$$\Delta q_x = -2 \cdot \frac{K}{E \cdot s} \cdot R^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{fluid} \cdot (2 \cdot \lambda \cdot \Delta H_{nad} - 1) = \underline{-24,466 \text{ kN} / \text{m}} \quad (6.57)$$

Napetosti določene iz upogibnih momentov in prečne sile.

$$\Delta \sigma_{xL} = \pm \frac{4 \cdot \Delta m_x}{t^2} = \underline{8,207 \text{ kN} / \text{cm}^2} \quad (6.58)$$

$$\Delta \sigma_{\theta L} = \pm \frac{4 \cdot \Delta m_{\theta}}{t^2} = \underline{2,462 \text{ kN} / \text{cm}^2} \quad (6.59)$$

$$\Delta \tau_{xL} = \frac{\Delta q_x}{t} = \underline{-0,136 \text{ kN} / \text{cm}^2} \quad (6.60)$$

## 6.5 PROJEKTNE VREDNOSTI NAPETOSTI

### 6.5.1 Kontrola nosilnosti prereza (trajno projektno stanje)

Projektne vrednosti napetosti v plašču uporabimo za preverjanje plastične nosilnosti prereza pri dnu rezervoarja (na stiku podnice in plašča).

$$\begin{aligned} 1.OK : \quad \sigma_{xd} &= 1,35 \cdot \sigma_{xG} + 1,2 \cdot \sigma_{xL} + 1,5 \cdot \sigma_{xS} = \underline{43,398 \text{ kN} / \text{cm}^2} \\ \sigma_{\theta d} &= 1,2 \cdot \sigma_{\theta L} = \underline{12,972 \text{ kN} / \text{cm}^2} \\ \tau_{xd} &= 1,2 \cdot \tau_{xL} = \underline{-0,9 \text{ kN} / \text{cm}^2} \end{aligned} \quad (6.61)$$

Glavni vpliv za kontrolo nosilnosti prereza ima tekočina ( $\sigma_{xL}$ ) saj k napetosti  $\sigma_{xd}$  prispeva kar 99,6 % celotne napetosti.

### 6.5.2 Kontrola stabilnosti plašča (potresno projektno stanje)

Vrednosti membranskih napetosti v plašču potresnega projektne stanja uporabimo za preverjanje dejanskih napetosti z dopustnimi pri kontroli elastične izbočitve in pri kontroli plastičnega izbočenja (»slonova noga«).

$$\begin{aligned} 1.OK : \quad \sigma_{xd} &= \sigma_{xG} + 0,2 \cdot \sigma_{xS} + \sigma_{xM} + 0,3 \cdot (\Delta \sigma_{xG} + 0,2 \cdot \Delta \sigma_{xS}) = \underline{1,998 \text{ kN} / \text{cm}^2} \\ \tau_{xd} &= \tau_{xL} + \tau_{\max Q} + 0,3 \cdot \Delta \tau_{xL} = \underline{-6,644 \text{ kN} / \text{cm}^2} \\ p_{\min} &= \rho_{fluid} \cdot g \cdot (H - 0,3 \cdot \Delta H_{nad}) = \underline{167080 \text{ N} / \text{m}^2} \\ p_{\max} &= \rho_{fluid} \cdot g \cdot (H + 0,3 \cdot \Delta H_{nad}) = \underline{194006 \text{ N} / \text{m}^2} \end{aligned} \quad (6.62)$$

K membranski napetosti  $\sigma_{xd}$  za kontrolo stabilnosti plašča prispeva napetost zaradi prevrnitvenega momenta  $\sigma_{xM}$  kar 95 % celotne napetosti.

$$\begin{aligned}
 2.OK : \quad \sigma_{xd} &= \sigma_{xG} + 0,2 \cdot \sigma_{xS} + 0,3 \cdot \sigma_{xM} + \Delta\sigma_{xG} + 0,2 \cdot \Delta\sigma_{xS} = \underline{0,684 \text{ kN/cm}^2} \\
 \tau_{xd} &= \tau_{xL} + 0,3 \cdot \tau_{\max Q} + \Delta\tau_{xL} = \underline{-1,993 \text{ kN/cm}^2} \\
 p_{\min} &= \rho_{\text{fluid}} \cdot g \cdot (H - \Delta H_{\text{nad}}) = \underline{135667 \text{ N/m}^2} \\
 p_{\max} &= \rho_{\text{fluid}} \cdot g \cdot (H + \Delta H_{\text{nad}}) = \underline{225419 \text{ N/m}^2}
 \end{aligned}
 \tag{6.63}$$

2.OK ni merodajna za kontrolo stabilnosti, saj so napetosti v 1.OK več kot trikrat večje, zato v nadaljevanju preverjamo samo 1.OK .

## 6.6 KONTROLE ZA JEKLENE REZERVOARJE

Pri kontrolah je uporabljen materialni varnostni faktor  $\gamma_{M0} = 1,1$

### 6.6.1 Plastična nosilnost prereza (trajno projektno stanje)

Pri plastični nosilnosti prereza mora biti projektna vrednost primerjalnih konzervativnih napetosti pri obtežni kombinaciji 1.OK manjša od plastične nosilnosti materiala.

$$\begin{aligned}
 1.OK : \quad \sigma_{eq,Ed} &= \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d} \cdot \sigma_{\theta,d} + 3 \cdot (\tau_{xn,d}^2)} = \underline{38,615 \text{ kN/cm}^2} \\
 f_{eq,Rd} &= \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \underline{44,55 \text{ kN/cm}^2} \\
 \sigma_{eq,Ed} &= 38,615 \text{ kN/cm}^2 < f_{eq,Rd} = 44,55 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}
 \tag{6.64}$$

### 6.6.2 Elastična izbočitev (potresno projektno stanje)

Koeficienti za določitev nosilnosti cilindra.

$$\sigma_{c1} = 0,6 \cdot E \cdot \frac{s}{R} = \underline{7,082 \text{ kN/cm}^2}
 \tag{6.65}$$

$$\left(\frac{\delta}{s}\right) = \frac{0,06}{a} \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} = \underline{1,65}
 \tag{6.66}$$

$$\bar{\sigma} = 1 - 1,24 \cdot \left(\frac{\delta}{s}\right) \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{1,24 \cdot \left(\frac{\delta}{s}\right)}} - 1 \right) = \underline{0,16908}
 \tag{6.67}$$

$$\lambda^2 = \frac{f_y}{\sigma \cdot \sigma_{c1}} = \underline{40,921} \quad (6.68)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} f_y \cdot \left(1 - \frac{\lambda^2}{4}\right); & \lambda^2 \leq 2 \\ \bar{\sigma} \cdot \sigma_{c1}; & \lambda^2 > 2 \end{cases} = \underline{1,197 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.69)$$

#### Kontrola elastičnega izbočenja za obtežni primer 1.OK:

Nosilnost prereza pri kontroli elastičnega izbočenja je odvisna od velikosti notranjega pritiska. Pri obtežnih kombinacijah upoštevamo pripadajoči notranji pritisk pri določitvi nosilnosti.

Koeficienti odvisni od notranjega pritiska:

$$1.OK : \bar{p} = \frac{p_{\min} \cdot R}{s \cdot \sigma_{c1}} = \underline{3,9976} < 5 \quad (6.70)$$

$$1.OK : \sigma_p = \sigma_{c1} \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\bar{p}}{5}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{c1}}\right)^2} = \underline{6,983 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.71)$$

#### Kontrola elastičnega izbočenja:

$$1.OK : \sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d} \cdot \sigma_{\theta,d} + 3 \cdot (\tau_{xn,d}^2)} = \underline{1,998 \text{ kN/cm}^2}$$

$$\sigma_{Rd,el} = \sigma_{c1} \cdot \left(0,19 + 0,81 \cdot \frac{\sigma_p}{\sigma_{c1}}\right) = \underline{7,002 \text{ kN/cm}^2} \quad (6.72)$$

$$\underline{\underline{\sigma_{eq,Ed} = 1,998 \text{ kN/cm}^2 \leq \sigma_{Rd,el} = 7,002 \text{ kN/cm}^2}}$$

### **6.6.3 Plastična izbočitev (»slonova noga«) (potresno projektno stanje)**

Kontrola plastične porušitve prereza je odvisna od velikosti notranjega pritiska in vertikalnih tlačnih napetosti.

V enačbi (6.73) je  $f_y$  v MPa in  $r = \frac{R}{s} \cdot \frac{1}{400}$ .

$$1.OK : \sigma_{Rd,pl} = \sigma_{cl} \cdot \left( 1 - \left( \frac{p_{max} \cdot R}{s \cdot f_y} \right)^2 \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{1,12 + r^{1,5}} \right) \cdot \left( \frac{r + f_y / 250}{r + 1} \right) = \underline{4,140 \text{ kN} / \text{cm}^2}$$

$$\sigma_{Ed} = \underline{1,998 \text{ kN} / \text{cm}^2} \quad (6.73)$$

$$\underline{\underline{\sigma_{Ed} = 1,998 \text{ kN} / \text{cm}^2 \leq \sigma_{Rd,pl} = 4,140 \text{ kN} / \text{cm}^2}}$$

#### 6.6.4 Elastična izbočitev – vpliv striga na izbočenje (potresno projektno stanje)

Pri kontroli izbočitve z upoštevanjem striga za potresno projektno stanje so komponente normalnih napetosti določene enako kot v t.č. 6.6.2, v enačbi (6.72) za obtežno kombinacijo 1.OK. Dodatno naredimo še kontrolo strižne izbočitve po EN 1993-1-6 [5], ter interakcijo med strigom in normalnim izbočenjem.

##### Kontrola

Kontrola izbočitve zaradi membranskih napetosti v plašču iz t.č. 6.6.2.

$$1.OK : \sigma_{eq,Ed} = 1,998 \text{ kN} / \text{cm}^2 \leq \sigma_{Rd,el} = 7,002 \text{ kN} / \text{cm}^2 \quad (6.74)$$

Nosilnost izbočitve zaradi strižnih napetosti v plašču po EN 1993-1-6. Za nosilnost izbočenja na strižno obremenitev je potrebno določiti spodnje koeficiente:

$$\omega = \frac{H}{\sqrt{R \cdot s}} = \underline{28,9} \quad (6.75)$$

$$C_\tau = \left\{ \begin{array}{ll} \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}}; & \omega < 10 \\ 1,0; & \omega \geq 10 \end{array} \right\} = \underline{1,0} \quad (6.76)$$

$$\tau_{Rc} = \frac{0,75 \cdot E \cdot C_\tau \cdot s}{R \cdot \sqrt{\omega}} = \underline{1,647 \text{ kN} / \text{cm}^2} \quad (6.77)$$

Koeficienti odvisni od kvalitete izvedbe, določeni za srednjo kvaliteto izvedbe iz EN 1993-1-6 pri kontroli strižnega izbočenja..

$$\alpha_\tau = 0,65; \quad \bar{\lambda}_{\tau 0} = 0,4; \quad \beta = 0,6; \quad \eta = 1,0; \quad (6.78)$$

Koeficienti za določitev strižne nosilnosti:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_\tau}{1 - \beta}} = \underline{1,275} \quad (6.79)$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{Rc}}} = \underline{4,144} \quad (6.80)$$

$$\chi = \frac{\alpha_\tau}{\bar{\lambda}_\tau} = \underline{0,038} \quad (6.81)$$

Strižna izbočitvena nosilnost:

$$\tau_{Rd} = \frac{\chi \cdot f_{y,k}}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = \underline{0,973 \text{ kN} / \text{cm}^2} \quad (6.82)$$

Kontrola strižne izbočitve:

Pri kontroli strižne izbočitve kontroliramo strižne napetosti 1.OK kombinacije pri potresnem projektnem stanju. Potrebno je preveriti strižno nosilnost za kombinacijo, nato pa še interakcijo s kontrolo normalnih napetosti in izbočenja.

1.OK :

$$\underline{\underline{\tau_{eq,Ed} = 6,644 \text{ kN} / \text{cm}^2 \leq \tau_{Rd} = 0,937 \text{ kN} / \text{cm}^2 \quad \text{ne ustreza}}} \quad (6.83)$$

Vidimo, da kontrola strižnega izbočenja ni izpolnjena, saj so strižne napetosti večje od strižne nosilnosti. Standard prEN 1998-4 ne predvideva kontrole strižnega izbočenja v interakciji z normalnim izbočenjem. Primerno bi bilo preveriti strižno nosilnost z upoštevanjem ugodnega vpliva notranjega pritiska, vendar verjetno kontrole ne bi bile merodajne, saj v numeričnih simulacijah nobeden od avtorjev ni predstavil oziroma omenil porušitve zaradi strižnega izbočenja.

Naprej tudi interakcija normalnih in strižnih napetosti ni izpolnjena, saj je nosilnost na strižno izbočenje premajhna.

1.OK :

$$\left( \frac{\sigma_{eq,Ed}}{\sigma_{Rd,el}} \right)^{1,25} + \left( \frac{\tau_{eq,Ed}}{\tau_{Rd}} \right)^2 \leq 1,0 \quad (6.84)$$

$$\underline{\underline{\left( \frac{1,998 \text{ kN} / \text{cm}^2}{7,002 \text{ kN} / \text{cm}^2} \right)^{1,25} + \left( \frac{6,644 \text{ kN} / \text{cm}^2}{0,973 \text{ kN} / \text{cm}^2} \right)^2 = 46,795 \leq 1,0 \quad \text{ne ustreza}}}$$

## 7 RAČUNSKI PRIMER PO API 650

Pri tem računskem primeru gre za enak rezervoar kot v poglavju 6, le da ga v tem poglavju obravnavamo po standardu API 650.

### 7.1 TEHNIČNI PODATKI O REZERVOARJU

Višina polnjenja rezervoarja:	$H_T = 21,4 \text{ m}$
Višina plašča rezervoarja	$H_L = H_T$
Premer rezervoarja:	$D = 61 \text{ m}$
Specifična teža (masa) medija (nafta):	$\gamma_{fluid} = 8,44 \text{ kN/m}^3$ ( $\rho_{fluid} = 860 \text{ kg/m}^3$ )
Meja plastičnosti za material:	$f_{y,k} = 49 \text{ kN/cm}^2$
Debelina spodnjega dela plašča:	$s = 18 \text{ mm}$
Pospešek tal:	$a_g = 0,2 \cdot g$
Težnostni pospešek	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Masa vsebine rezervoarja	$T_T = 53\,785\,075 \text{ kg}$

V vseh enačbah je potrebno količine vstavljati v navedenih količinah, da dobimo vrednosti v navedenih enotah.

### 7.2 PREVRNITVENI MOMENT

#### 7.2.1 Koeficienti za določitev momenta odvisni od karakteristik rezervoarja

Koeficienta  $G_1$  in  $G_2$  sta odvisna od vrste tal in projektnega pospeška tal.

$$G_1 = 0,2 \quad (7.1)$$

Za določite faktorja  $G_2$  je potrebno grafično iz [1] (Figure E-4) določiti vrednost koeficienta  $K_s$  v odvisnosti od razmerja premera in višine. Za razmerje  $D/H = 2,85$  je faktor  $K_s = 0,628$ . Po enačbi (7.2) določimo nihajni čas.

$$T_s = 1,8 \cdot K_s \cdot \sqrt{D} = \underline{8,834 \text{ s}} \quad (7.2)$$

Na osnovi nihajnega časa določimo faktor  $G_2$  po enačbi (7.3), v kateri je  $J = 1$  koeficient, ki zajame vrsto temeljnih tal.

$$G_2 = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1,25 \cdot G_1 \cdot J}{T_s} & T_s \leq 4,5s \\ \frac{5,625 \cdot G_1 \cdot J}{T_s^2} & T_s > 4,5s \end{array} \right\} = \underline{0,0144} \quad (7.3)$$

### 7.2.2 Deleži mas

Delež mase, ki se giba skupaj s stenami in delež, ki valovi na površju je potrebno grafično določiti iz [1], (Figure E-2). Odvisno je od razmerja premera in višine rezervoarja. Za razmerje  $D/H = 2,85$  so vrednosti za  $T_1/T_T$  in  $T_2/T_T$ , kjer je  $T_T$  celotna masa tekočine rezervoarja, določene v (7.4) in (7.5).

$$T_1 = T_T \cdot 0,402 = \underline{21\,600\,333\,kg} \quad (7.4)$$

$$T_2 = T_T \cdot 0,561 = \underline{30\,150\,850\,kg} \quad (7.5)$$

### 7.2.3 Ročice resultant sil

Ročice rezultante sil prav tako določimo v odvisnosti od razmerja premera in višine grafično iz [1], (Figure E-3). Tako določimo vrednosti  $X_1$  in  $X_2$  za določitev prevrnitvenega momenta.

$$X_1 = H_T \cdot 0,359 = \underline{7,68\,m} \quad (7.6)$$

$$X_2 = H_T \cdot 0,543 = \underline{11,61\,m} \quad (7.7)$$

V našem primeru prav tako upoštevamo vpliv teže sten rezervoarja, zato določimo maso sten  $T_L$  (7.8) in njeno težišče  $X_s$  (7.9) glede na temelj rezervoarja.

$$T_L = \underline{575\,785\,kg} \quad (7.8)$$

$$X_s = \underline{10,70\,m} \quad (7.9)$$

### 7.2.4 Prevrnitveni moment

S temi podatki določimo velikost prevrnitvenega momenta, ki deluje na rezervoar pri potresni obtežbi.

$T_r$  ... teža strehe v  $kN$ .



$$M = \frac{G_1 \cdot (T_L \cdot X_s + T_r \cdot H_L + T_1 \cdot X_1) + G_2 \cdot T_2 \cdot X_2}{102} = \underline{386\,738\text{ kNm}} \quad (7.10)$$

### 7.2.5 Odpornost proti prevrnitvi

Odpornost proti prevrnitvi zagotavlja teža lupine in del mase, ki deluje stabilizacijsko. Odvisna je od kvalitete materiala, debeline podnice in višine rezervoarja (7.11), kjer je  $t_{ba} = 11\text{ mm}$  debelina podnice,  $w_s$  pa masa tekočine v  $g/ml$ .

$$w_L = 0,1 \cdot t_{ba} \cdot \sqrt{f_{y,k} \cdot w_s \cdot H_T} = \underline{104,459\text{ kN/m}} \quad (7.11)$$

Vendar mora vrednost  $w_L$  po enačbi (7.11) vedno izpolnjevati pogoj (7.12).

$$w_L \leq 0,2 \cdot w_s \cdot H_T \cdot D = \underline{224,529\text{ kN/m}} \quad (7.12)$$

### 7.2.6 Vertikalna tlačna sila zaradi lastne teže

V plašču zaradi lastne teže nastanejo vertikalne tlačne sile po obodu plašča, ki prispevajo k velikosti tlačnih napetosti v prerezu. Odvisne so od debeline stene, višine rezervoarja in teže materiala  $\rho_{jekla} = 7800\text{ kg/m}^3$ .

$$w_t = \frac{s \cdot H_L \cdot \rho_{jekla} \cdot 9,81}{10^6} = \underline{27,475\text{ kN/m}} \quad (7.13)$$

### 7.2.7 Vertikalne tlačne napetosti v plašču

Vertikalne tlačne napetosti v plašču zaradi prevrnitvenega momenta in lastne teže plašča rezervoarja določimo po (7.15) v primeru, da je izpolnjen pogoj (7.14).

$$\frac{M}{D^2 \cdot (w_L + w_t)} = \underline{0,776} \leq 0,785 \quad (7.14)$$

$$b = w_t + \frac{1,273 \cdot M}{D^2} = \underline{161,783\text{ kN/m}} \quad (7.15)$$

V primeru da pogoj (7.14) ni izpolnjen, je potrebno vertikalne tlačne napetosti določiti v skladu s t.č. 4.4.1.

### 7.2.8 Največja dovoljena tlačna napetost

Napetosti v plašču so omejene z največjo dovoljeno tlačno napetostjo v plašču  $F_a$ , v kateri je zajet vpliv ugodnega delovanja notranjega pritiska s koeficientom (7.16), kateri pogojuje

uporabo enačbe (7.17) za določitev dovoljene napetosti. V kolikor pogoj (7.16) ni izpolnjen je potrebno dovoljeno napetost določiti po t.č. 4.4.3.

$$\frac{w_s \cdot H_T \cdot D^2}{s^2} = \underline{211,36} \geq 44 \quad (7.16)$$

$$F_a = 83 \cdot \frac{s}{D} = \underline{2,449 \text{ kN/cm}^2} \quad (7.17)$$

Neodvisno od ostalih parametrov je omejena največja dovoljena napetost omejena z enačbo .

$$F_{a,\max} \leq 0,5 \cdot f_{ys} = \underline{24,5 \text{ kN/cm}^2} \quad (7.18)$$

### 7.2.9 Dejanske napetosti v plašču

Dejanske napetosti v plašču določimo iz vertikalnih tlačnih sil po enačbi (7.19).

$$\sigma_{dejansko} = \frac{b}{10 \cdot s} = \underline{0,899 \text{ kN/cm}^2} \quad (7.19)$$

### 7.2.10 Kontrola

Za izpolnitev pogojev kontrol morajo biti dejanske tlačne napetosti manjše od dopustnih.

$$\underline{\underline{\sigma_{dejansko} = 0,899 \text{ kN/cm}^2 \leq F_a = 2,449 \text{ kN/cm}^2}} \quad (7.20)$$

$$\underline{\underline{\sigma_{dejansko} = 0,899 \text{ kN/cm}^2 \leq F_{a,\max} = 24,5 \text{ kN/cm}^2}} \quad (7.21)$$

## 8 ZAKLJUČEK IN SKLEPNE UGOTOVITVE

Iz analize projektiranja jeklenih rezervoarjev po standardu prEN 1998-4 lahko povzamem, da je način in predstavitev problema projektiranja rezervoarjev dokaj nerazumljiva ob predhodnem nepoznavanju problema. Z vključitvijo dodatne literature, ki dopolnjuje posamezne dele problema bolj podrobno, lažje razumemo obnašanje rezervoarjev pri potresni obtežbi. Tako pridemo do praktičnih razlag in primerov, na podlagi katerih sestavimo celoten odziv rezervoarjev na potresno obtežbo.

Za posamezne komponente obremenitev na podlagi primerjav sklepamo o odzivu rezervoarjev na potresno obtežbo, o primernosti posameznih načinov kombiniranja komponent. Tako pridemo do ugotovitve, da predlagana poenostavitev oziroma redukcija kombiniranja strižne sile po Veletsos-Yang v t.č. 2.8.1.2 za večja razmerja ni primerna, saj ne daje ustreznih rezultatov, ampak dobimo še večje, še bolj konzervativne vrednosti strižne sile. Podobno na podlagi primerjav velikosti potresnih sil za različne pospeške tal ugotovimo, da je povezava med potresnimi obremenitvami (strižna sila in prevrtni moment) in velikostjo pospeška tal linearna. Več primerjav, tako velikost strižnih sil, momentov, povečanih hidrostatičnih pritiskov, nam jasno prikazuje vpliv nihajnega časa sistema rezervoarja in tekočine. Nihajni časi komponent v elastičnem spektru med  $T_B$  in  $T_C$  imajo za posledico največje projektne pospeške in s tem potresne obremenitve. Komponente, ki imajo nihajni čas večji od  $T_C$ , pa velikosti potresnih sil z večanjem časov hitro padajo. Ta vpliv je prikazan pri primerjavi velikosti strižne sile  $Q$  na sliki 5.5, kjer je na mestu lomljenja grafa preidemo preko platoja največjih pospeškov v elastičnem spektru. Običajno so nihajni časi za široke in nizke rezervoarje manjši od  $T_C$ , medtem ko imajo visoki nihajni čase tudi večje, s tem pa tudi manjše vrednosti projektne pospeškov.

S primerjavo kontrol elastičnega izbočenja po prEN1998-4, ECCS [6] in EN 1993-1-6 [5] smo primerjali dovoljene membranske napetosti. Standard prEN1998-4 dopušča izmed vseh največje dovoljene tlačne napetosti, vse tri pa upoštevajo ugoden vpliv notranjega pritiska.

V prEN 1998-4 pri kontroli elastičnega izbočenja ni upoštevan vpliv striga na strižno izbočenje in s tem na stabilnost plašča. S kontrolo strižnega izbočenja v interakciji z normalnim izbočenjem, kjer ne moremo upoštevati ugodnega vpliva notranjega pritiska na strižno izbočenje. Pogoji interakcije strižnega in normalnega izbočenja se izkaže za

merodajnega, ker zahteva tudi do dvakrat večjo debelino od ostalih. Vendar je potrebno vzeti v obzir, da ne moremo upoštevati ugodnega delovanja notranjega pritiska na strižno izbočenje. V literaturi ni bil izpostavljen problem strižnega izbočenja, zato tudi verjetno strig nima merodajnega oziroma prevladujočega vpliva na stabilnost plašča, vendar bi bilo dobro preučiti vpliv striga na izbočenje ter na stabilnost rezervoarja.

V zaključku lahko povzamemo, da je standard prEN 1998-4 primeren za projektiranje jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo ob uporabi dodatne literature za boljše razumevanje in pregled odziva rezervoarjev na dinamično potresno obtežbo.

Ob upoštevanju kontrol stabilnosti po prEN 1998-4 in nosilnosti rezervoarja, sidranega v temelj, so v prilogah iz vrednotene potrebne debeline spodnjega ovoja plašča za različne oblike rezervoarja, pospeške tal in kvalitete materiala. Kot vrsta tekočine v rezervoarju je upoštevana voda, za vsako obliko pa je določena debelina stene za trajno in potresno projektno stanje.

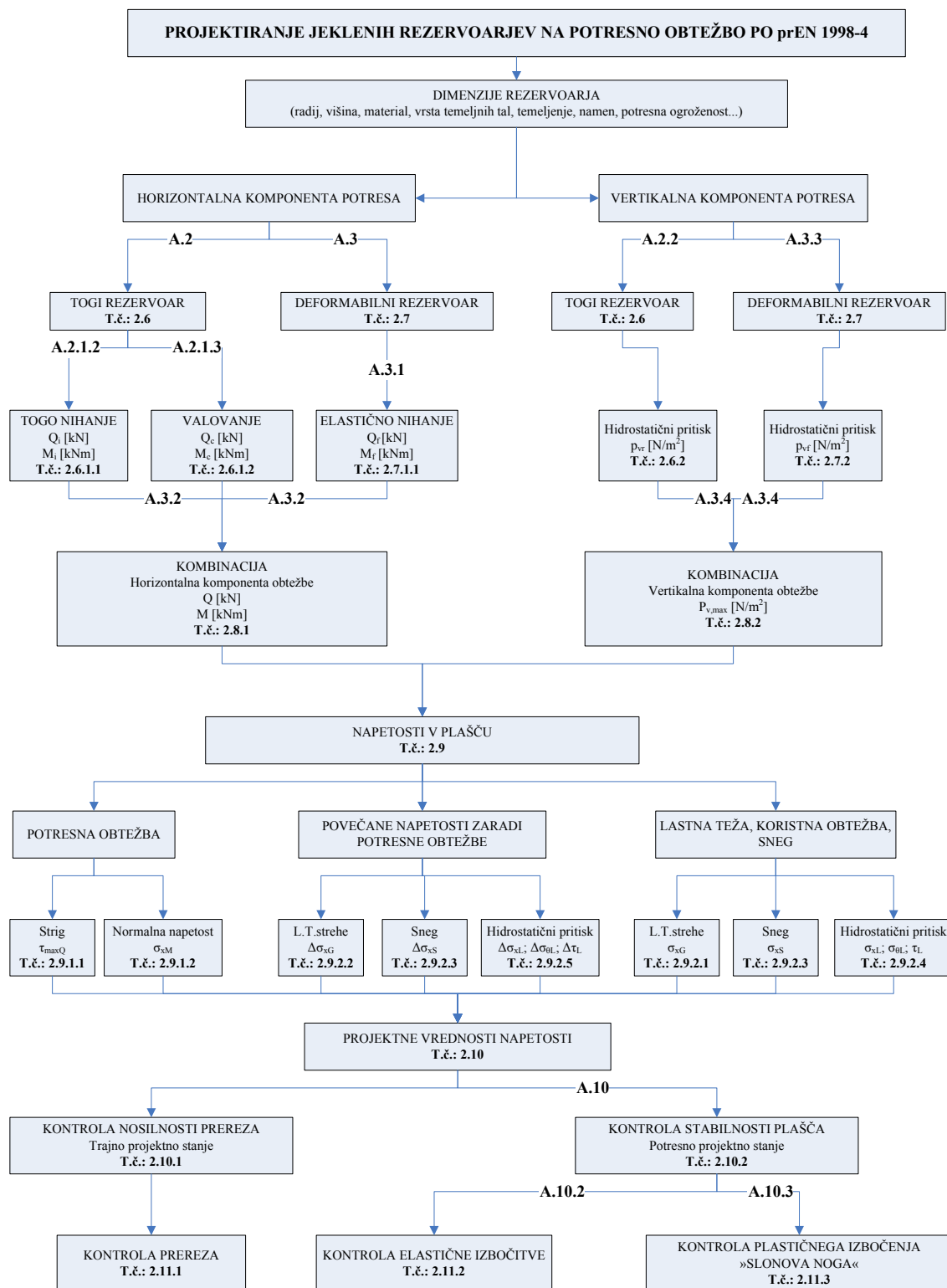
## SEZNAM LITERATURE

- [1] American Petroleum Institute, 1993, API 650, Appendix E, »Seismic design of storage tanks«, Washington D.C.
- [2] American Society of Civil Engineers, Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems, New York, 1981.; Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines.
- [3] Ergin A., Hydroelastic analysis of fluid storage tanks by using a boundary integral equation method, Journal of Sound and Vibration 275 (2004) 489 -513.
- [4] European Standard prEN 1998-4:200X (E): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks and pipelines, November 2004.
- [5] Eurocode 3, Slovenski predstandard SIST ENV 1993-1-6: Projektiranje jeklenih konstrukcij – Del 1-6: Splošna pravila – Dodatna pravila za lupinaste konstrukcije, julij 2001.
- [6] ECCS-CECM-EKS, European recommendations for steel construction: Buckling of shells, General secretariat, AV.Louise 326, BTE 52, Brussels, 1984.
- [7] Gorup I., 2005, Analiza sodobnih metod dimenzioniranja jeklenih rezervoarjev po standardih Evrokod. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG:186.
- [8] Malholtra P. K., Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks, Structural Engineering International 3/2000, Reports pp. 197-201.
- [9] Hamdan F. H., Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks, Journal of Constructional Steel Research 53 (2000) 307-333.
- [10] Haroun M. A., Axisymmetrical vibrations of Tanks-Numerical, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, No. 3, March 1985, pp. 329-345.
- [11] Jaiswal O. R., August 2005, Review of Code Provisions on Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks, Document No.: IITK-GSDMA-EQ04-V1.0, Department of Applied Mechanics, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur.
- [12] Koller M. G., 2004, Seismic evaluation of unanchored cylindrical tanks, Paper No. 2534, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6.

- [13] Nachtigall I., On the analysis of vertical circular cylindrical tanks under earthquake excitation at its base, *Engineering Structures* 25 (2003) 201-213.
- [14] Sharf K., Beiträge zur Erfassung des Verhaltens von erdbebenerregten, oberirdischen Tankbauwerken, *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 4. Bauingenieurwesen, Nr. 97*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [15] Wunderlich W., Nonlinear treatment of liquid – filled storage tanks under earthquake excitation by a quasistatic approach, *Computers and structures* 78 (2000) 385-395.

## PRILOGE

### Priloga A: Pregled projektiranja jeklenih rezervoarjev po prEN 1998-4



Na zgornjem preglednem diagramu je prikazan postopek projektiranja jeklenih rezervoarjev na potresno obtežbo po prEN 1998-4. Grafično je prikazan vrstni red določitve posameznih komponent vse do končnih kontrol, ki morajo biti izpolnjene za zagotovitev vseh potrebnih zahtev. Diagram služi predvsem za lažje razumevanje relacij posameznih komponent, ter preglednejše celotne slike razumevanja projektiranja jeklenih rezervoarjev, sidranih v temelj. V krepkem tekstu na povezavah med posameznimi polji so vpisane reference na poglavja v standardu prEN1998-4, na katera se posamezna komponenta nanaša.



### Priloga B: Debelina stene rezervoarja za različne pospeške tal in material

V spodnjih tabelah je zbrana potrebna debelina spodnjega ovoja plašča za trajno in potresno projektno stanje odvisna od oblike rezervoarjev, pospeška tal in kvalitete materiala.

V vrsticah je višina polnjenja rezervoarja  $H$  v  $m$ , v stolpcih je radij rezervoarja  $R$  v  $m$ , v polju tabele je potrebna debelina stene za določen material in pospešek tal  $a_g$  (upoštevana je bila vrsta tal tipa A) in sicer zgornja vrednost v polju predstavlja potrebno debelino stene pri trajnem projektne stanju, spodnja vrednost pa debelino pri potresnem projektne stanju v  $mm$ .

Vrednosti v tabelah so določene s predpostavko, da je v rezervoarju voda.

**Tabela 8.1: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,10$ , material S 235**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	2, 2,1	2,9 2,7	3,8 3,5	4,8 4,2	5,7 5	6,6 5,7	7,5 6,5	8,4 7,3	9,3 8	11,5 9,9	13,6 11,7	15,7 13,6	17,7 15,5	
9	2,2 2,4	3,3 3,1	4,3 3,9	5,3 4,8	6,4 5,6	7,4 6,4	8,4 7,3	9,4 8,1	10,4 9	12,9 11,1	15,3 13,2	17,7 15,3	19,3 17,4	24,5 21,5
10	2,4 2,7	3,6 3,5	4,8 4,4	5,9 5,3	7,1 6,2	8,2 7,1	9,4 8,1	10,5 9	11,6 10	14,4 12,3	17,1 14,6	19,7 16,9	22,3 19,3	27,4 23,9
11	2,7 3	4 3,9	5,3 4,8	6,5 5,8	7,8 6,8	9,1 7,8	10,3 8,9	11,5 9,9	12,8 10,9	15,8 13,5	18,8 16,1	21,7 18,6	24,6 21,2	30,2 26,2
12	2,9 3,3	4,3 4,3	5,7 5,2	7,1 6,4	8,5 7,5	9,9 8,6	11,2 9,7	12,6 10,8	14 11,9	17,3 14,7	20,5 17,5	23,8 20,3	26,9 23,1	33,1 28,6
13	3,1 3,6	4,7 4,6	6,2 5,7	7,7 6,9	9,2 8,1	10,7 9,3	12,2 10,5	13,7 11,7	15,1 12,9	18,7 15,9	22,3 18,9	25,8 22	29,2 25	35,9 31
14	3,4 3,9	5 5	6,7 6,2	8,3 7,4	9,9 8,7	11,5 10	13,1 11,3	14,7 12,6	16,3 13,9	20,2 17,1	24 20,4	27,8 23,6	31,5 26,9	38,8 33,3
15	3,6 4,2	5,4 5,4	7,2 6,7	8,9 7,9	10,6 9,3	12,4 10,7	14,1 12,1	15,8 13,5	17,5 14,9	21,7 18,4	25,8 21,8	29,8 25,3	33,8 28,8	41,6 35,7
16	3,9 4,5	5,7 5,8	7,6 7,2	9,5 8,5	11,3 10	13,2 11,5	15 12,9	16,8 14,4	18,7 15,9	23,1 19,6	27,5 23,3	31,9 27	36,2 30,7	44,5 38
17	4,1 4,9	6,1 6,3	8,1 7,6	10,1 9	12,1 10,6	14 12,2	16 13,7	17,9 15,3	19,8 16,9	24,6 20,8	29,3 24,7	33,9 28,7	38,5 32,6	47,4 40,4
18	4,3 5,2	6,5 6,7	8,6 8,1	10,7 9,6	12,8 11,2	14,8 12,9	16,9 14,6	19 16,2	21 17,9	26,1 22	31,1 26,2	36 30,3	40,8 34,5	50,3 42,8
19	4,6 5,5	6,8 7,1	9,1 8,7	11,3 10,2	13,5 11,9	15,7 13,6	17,9 15,4	20 17,1	22,2 18,9	27,5 23,2	32,8 27,6	38 32	43,1 36,4	53,2 45,2
20	4,8 5,9	7,2 7,5	9,5 9,2	11,9 10,8	14,2 12,5	16,5 14,3	18,8 16,2	21,1 18	23,4 19,9	29 24,4	34,6 29,1	40,1 33,7	45,5 38,3	56,1 47,5
21	5,1 6,2	7,5 8	10 9,7	12,5 11,4	14,9 13,1	17,3 15,1	19,8 17	22,2 19	24,6 20,9	30,5 25,7	36,3 30,5	42,1 35,4	47,8 40,2	59 49,9
22	5,3 6,6	7,9 8,4	10,5 10,2	13,1 12	15,6 13,8	18,2 15,8	20,7 17,8	23,2 19,9	25,7 21,9	32 26,9	38,1 31,9	44,2 37	50,1 42,1	61,9 52,3
23	5,5 7	8,3 8,9	11 10,7	13,7 12,6	16,3 14,5	19 16,5	21,7 18,6	24,3 20,8	26,9 22,9	33,4 28,2	39,9 33,4	46,2 38,7	52,5 44	64,8 54,6
24	5,8 7,4	8,6 9,3	11,4 11,3	14,3 13,2	17,1 15,2	19,8 17,2	22,6 19,5	25,4 21,7	28,1 23,9	34,9 29,4	41,6 34,9	48,3 40,4	54,8 45,9	67,7 57
25	6 7,8	9 9,8	11,9 11,8	14,9 13,8	17,8 15,9	20,7 18	23,6 20,3	26,4 22,6	29,3 24,9	36,4 30,6	43,4 36,3	50,3 42,1	57,2 47,8	70,6 59,4
30	7,2 9,3	10,8 12,2	14,3 14,6	17,8 17,1	21,4 19,5	24,9 22	28,3 24,4	31,8 27,2	35,3 30	43,8 36,9	52,3 43,7	60,7 50,6	68,9 57,4	85,2 71,2
35	8,4 10,4	12,6 14,9	16,7 17,6	20,8 20,2	25 23,3	29 26,1	33,1 29	37,2 31,9	41,2 35	51,3 43,1	61,2 51,1	71 59,2	80,7 67,1	99,9 83,1
40	9,6 11,7	14,4 17,8	19,1 20,9	23,9 23,3	28,6 26,6	33,3 30,1	37,9 33,6	42,6 37	47,2 40,3	58,7 49,4	70,1 58,6	81,4 67,8	92,6 76,9	100,1 95,1

**Tabela 8.2: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,15$ , material S 235**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	2 2,4	2,9 3,1	3,8 3,9	4,8 4,7	5,7 5,5	6,6 6,3	7,5 7,1	8,4 7,9	9,3 8,6	11,5 10,6	13,6 12,5	15,7 14,5	17,7 16,4	
9	2,2 2,7	3,3 3,5	4,3 4,4	5,3 5,3	6,4 6,1	7,4 7	8,4 7,9	9,4 8,8	10,4 9,7	12,9 11,9	15,3 14,1	17,7 16,3	20 18,5	24,5 22,8
10	2,4 3,1	3,6 3,9	4,8 4,9	5,9 5,9	7,1 6,8	8,2 7,8	9,4 8,8	10,5 9,8	11,6 10,7	14,4 13,2	17,1 15,6	19,7 18,1	22,3 20,5	27,4 25,3
11	2,7 3,4	4 4,3	5,3 5,4	6,5 6,4	7,8 7,5	9,1 8,5	10,3 9,6	11,5 10,7	12,8 11,8	15,8 14,5	18,8 17,2	21,7 19,8	24,6 22,5	30,2 27,8
12	2,9 3,8	4,3 4,8	5,7 5,8	7,1 7	8,5 8,2	9,9 9,3	11,2 10,5	12,6 11,7	14 12,9	17,3 15,8	20,5 18,7	23,8 21,6	26,9 24,5	33,1 30,3
13	3,1 4,2	4,7 5,2	6,2 6,3	7,7 7,6	9,2 8,9	10,7 10,1	12,2 11,4	13,7 12,6	15,1 13,9	18,7 17,1	22,3 20,3	25,8 23,4	29,2 26,5	35,9 32,8
14	3,4 4,5	5 5,7	6,7 6,8	8,3 8,2	9,9 9,6	11,5 10,9	13,1 12,3	14,7 13,6	16,3 15	20,2 18,4	24 21,8	27,8 25,2	31,5 28,6	38,8 35,3
15	3,6 4,9	5,4 6,2	7,2 7,4	8,9 8,8	10,6 10,3	12,4 11,7	14,1 13,2	15,8 14,6	17,5 16	21,7 19,7	25,8 23,3	29,8 27	33,8 30,6	41,6 37,8
16	3,9 5,3	5,7 6,6	7,6 7,9	9,5 9,4	11,3 11	13,2 12,5	15 14,1	16,8 15,6	18,7 17,1	23,1 21	27,5 24,9	31,9 28,8	36,2 32,6	44,5 40,3
17	4,1 5,7	6,1 7,1	8,1 8,5	10,1 10	12,1 11,6	14 13,3	16 14,9	17,9 16,6	19,8 18,2	24,6 22,3	29,3 26,4	33,9 30,5	38,5 34,6	47,4 42,8
18	4,3 6,2	6,5 7,6	8,6 9,1	10,7 10,6	12,8 12,3	14,8 14,1	16,9 15,8	19 17,6	21 19,3	26,1 23,6	31,1 28	36 32,3	40,8 36,7	50,3 45,3
19	4,6 6,6	6,8 8,1	9,1 9,7	11,3 11,2	13,5 13	15,7 14,9	17,9 16,7	20 18,6	22,2 20,4	27,5 24,9	32,8 29,5	38 34,1	43,1 38,7	53,2 47,8
20	4,8 7	7,2 8,7	9,5 10,3	11,9 11,9	14,2 13,7	16,5 15,7	18,8 17,6	21,1 19,6	23,4 21,5	29 26,2	34,6 31	40,1 35,9	45,5 40,7	56,1 50,4
21	5,1 7,5	7,5 9,2	10 10,9	12,5 12,6	14,9 14,4	17,3 16,5	19,8 18,5	22,2 20,5	24,6 22,6	30,5 27,6	36,3 32,6	42,1 37,7	47,8 42,8	59 52,9
22	5,3 8	7,9 9,7	10,5 11,5	13,1 13,3	15,6 15,1	18,2 17,3	20,7 19,4	23,2 21,5	25,7 23,7	32 28,9	38,1 34,1	44,2 39,5	50,1 44,8	61,9 55,4
23	5,5 8,4	8,3 10,3	11 12,1	13,7 14	16,3 15,8	19 18,1	21,7 20,3	24,3 22,5	26,9 24,7	33,4 30,2	39,9 35,7	46,2 41,2	52,5 46,8	64,8 57,9
24	5,8 8,9	8,6 10,9	11,4 12,8	14,3 14,7	17,1 16,6	19,8 18,9	22,6 21,2	25,4 23,5	28,1 25,8	34,9 31,6	41,6 37,3	48,3 43	54,8 48,8	67,7 60,4
25	6 9,5	9 11,4	11,9 13,4	14,9 15,4	17,8 17,5	20,7 19,6	23,6 22,1	26,4 24,5	29,3 26,9	36,4 32,9	43,4 38,9	50,3 44,8	57,2 50,9	70,6 62,9
30	7,2 11,1	10,8 14,5	14,3 16,9	17,8 19,3	21,4 21,6	24,9 24,1	28,3 26,6	31,8 29,5	35,3 32,4	43,8 39,6	52,3 46,8	60,7 53,9	68,9 61	85,2 75,5
35	8,4 12,5	12,6 18	16,7 20,7	20,8 23,4	25 26,1	29 28,9	33,1 31,7	37,2 34,5	41,2 37,9	51,3 46,4	61,2 54,8	71 63,1	80,7 71,4	99,9 88,1
40	9,6 14,1	14,4 21,9	19,1 24,8	23,9 27,3	28,6 30,4	33,3 34	37,9 37,2	42,6 40,4	47,2 43,7	58,7 53,2	70,1 62,8	81,4 72,4	92,6 81,9	100,1 100,1

**Tabela 8.3: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,20$ , material S 235**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	2 2,6	2,9 3,4	3,8 4,3	4,8 5,1	5,7 6	6,6 6,8	7,5 7,6	8,4 8,5	9,3 9,3	11,5 11,4	13,6 13,4	15,7 15,4	17,7 17,4	
9	2,2 3	3,3 3,9	4,3 4,9	5,3 5,8	6,4 6,7	7,4 7,6	8,4 8,6	9,4 9,5	10,4 10,4	12,9 12,7	15,3 15	17,7 17,3	20 19,6	24,5 24,1
10	2,4 3,4	3,6 4,3	4,8 5,4	5,9 6,4	7,1 7,4	8,2 8,4	9,4 9,5	10,5 10,5	11,6 11,6	14,4 14,1	17,1 16,7	19,7 19,2	22,3 21,7	27,4 26,8
11	2,7 3,8	4 4,8	5,3 5,9	6,5 7,1	7,8 8,2	9,1 9,3	10,3 10,4	11,5 11,6	12,8 12,7	15,8 15,5	18,8 18,3	21,7 21,1	24,6 23,9	30,2 29,4
12	2,9 4,3	4,3 5,3	5,7 6,5	7,1 7,7	8,5 9	9,9 10,2	11,2 11,3	12,6 12,6	14 13,8	17,3 16,9	20,5 20	23,8 23	26,9 26	33,1 32,1
13	3,1 4,7	4,7 5,8	6,2 7	7,7 8,4	9,2 9,7	10,7 11	12,2 12,3	13,7 13,6	15,1 15	18,7 18,3	22,3 21,6	25,8 24,9	29,2 28,2	35,9 34,7
14	3,4 5,2	5 6,3	6,7 7,5	8,3 9	9,9 10,5	11,5 11,9	13,1 13,3	14,7 14,6	16,3 16,1	20,2 19,7	24 23,2	27,8 26,8	31,5 30,3	38,8 37,4
15	3,6 5,6	5,4 6,9	7,2 8,1	8,9 9,7	10,6 11,2	12,4 12,7	14,1 14,3	15,8 15,7	17,5 17,2	21,7 21,1	25,8 24,9	29,8 28,7	33,8 32,5	41,6 40
16	3,9 6,1	5,7 7,4	7,6 8,7	9,5 10,3	11,3 12	13,2 13,6	15 15,2	16,8 16,8	18,7 18,4	23,1 22,5	27,5 26,5	31,9 30,6	36,2 34,6	44,5 42,7
17	4,1 6,6	6,1 8	8,1 9,4	10,1 11	12,1 12,7	14 14,5	16 16,2	17,9 17,9	19,8 19,6	24,6 23,8	29,3 28,2	33,9 32,5	38,5 36,8	47,4 45,3
18	4,3 7,1	6,5 8,6	8,6 10	10,7 11,6	12,8 13,5	14,8 15,3	16,9 17,2	19 19	21 20,8	26,1 25,2	31,1 29,8	36 34,4	40,8 38,9	50,3 48
19	4,6 7,6	6,8 9,2	9,1 10,7	11,3 12,3	13,5 14,2	15,7 16,2	17,9 18,1	20 20	22,2 21,9	27,5 26,6	32,8 31,5	38 36,3	43,1 41,1	53,2 50,6
20	4,8 8,2	7,2 9,8	9,5 11,4	11,9 13	14,2 15	16,5 17,1	18,8 19,1	21,1 21,1	23,4 23,1	29 28,1	34,6 33,1	40,1 38,2	45,5 43,2	56,1 53,3
21	5,1 8,7	7,5 10,4	10 12,1	12,5 13,8	14,9 15,8	17,3 17,9	19,8 20,1	22,2 22,2	24,6 24,3	30,5 29,5	36,3 34,7	42,1 40,1	47,8 45,4	59 55,9
22	5,3 9,3	7,9 11,1	10,5 12,8	13,1 14,6	15,6 16,5	18,2 18,8	20,7 21	23,2 23,3	25,7 25,5	32 30,9	38,1 36,4	44,2 42	50,1 47,5	61,9 58,6
23	5,5 9,9	8,3 11,7	11 13,5	13,7 15,4	16,3 17,3	19 19,7	21,7 22	24,3 24,4	26,9 26,7	33,4 32,4	39,9 38	46,2 43,8	52,5 49,7	64,8 61,2
24	5,8 10,5	8,6 12,4	11,4 14,3	14,3 16,2	17,1 18,1	19,8 20,5	22,6 23	25,4 25,4	28,1 27,8	34,9 33,8	41,6 39,7	48,3 45,7	54,8 51,8	67,7 63,9
25	6 11,2	9 13,1	11,9 15	14,9 17	17,8 19	20,7 21,4	23,6 24	26,4 26,5	29,3 29	36,4 35,3	43,4 41,4	50,3 47,6	57,2 54	70,6 66,5
30	7,2 12,9	10,8 16,9	14,3 19,1	17,8 21,4	21,4 23,8	24,9 26,2	28,3 28,9	31,8 31,9	35,3 35	43,8 42,5	52,3 50	60,7 57,4	68,9 64,7	85,2 79,8
35	8,4 14,6	12,6 21,2	16,7 23,7	20,8 26,3	25 29	29 31,7	33,1 34,4	37,2 37,4	41,2 41	51,3 49,8	61,2 58,5	71 67,2	80,7 75,8	99,9 93,1
40	9,6 16,5	14,4 26,1	19,1 28,8	23,9 31,7	28,6 34,6	33,3 37,7	37,9 40,7	42,6 43,9	47,2 47	58,7 57,1	70,1 67,2	81,4 77,1	92,6 87	100,1 100,1

**Tabela 8.4: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,25$ , material S 235**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	2,28	2,9	3,8	4,8	5,7	6,6	7,5	8,4	9,3	11,5	13,6	15,7	17,7	
9	3,3	3,3	4,3	5,3	6,4	7,4	8,4	9,4	10,4	12,9	15,3	17,7	20	24,5
10	3,8	3,6	4,8	5,9	7,1	8,2	9,4	10,5	11,6	14,4	17,1	19,7	22,3	27,4
11	4,2	4	5,3	6,5	7,8	9,1	10,3	11,5	12,8	15,8	18,8	21,7	24,6	30,2
12	4,7	4,3	5,7	7,1	8,5	9,9	11,2	12,6	14	17,3	20,5	23,8	26,9	33,1
13	5,2	4,7	6,2	7,7	9,2	10,7	12,2	13,7	15,1	18,7	22,3	25,8	29,2	35,9
14	5,7	5	6,7	8,3	9,9	11,5	13,1	14,7	16,3	20,2	23	26,4	29,9	36,7
15	6,3	5,4	7,2	8,9	10,6	12,4	14,1	15,8	17,5	21,7	25,8	29,8	33,8	41,6
16	6,8	5,7	7,6	9,5	11,3	13,2	15	16,8	18,7	23,1	27,5	31,9	36,2	44,5
17	7,4	6,1	8,1	10,1	12,1	14	16	17,9	19,8	24,6	29,3	33,9	38,5	47,4
18	8	6,5	8,6	10,7	12,8	14,8	16,9	19	21	26,1	31,1	36	40,8	50,3
19	8,6	6,8	9,1	11,3	13,5	15,7	17,9	20	22,2	27,5	32,8	38	43,1	53,2
20	9,3	7,2	9,5	11,9	14,2	16,5	18,8	21,1	23,4	29	34,6	40,1	45,5	56,1
21	10	7,5	10	12,5	14,9	17,3	19,8	22,2	24,6	30,5	36,3	42,1	47,8	59
22	10,7	7,9	10,5	13,1	15,6	18,2	20,7	23,2	25,7	32	38,1	44,2	50,1	61,9
23	11,4	8,3	11	13,7	16,3	19	21,7	24,3	26,9	33,4	39,9	46,2	52,5	64,8
24	12,1	8,6	11,4	14,3	17,1	19,8	22,6	25,4	28,1	34,9	41,6	48,3	54,8	67,7
25	12,7	9	11,9	14,9	17,8	20,7	23,6	26,4	29,3	36,4	43,4	50,3	57,2	70,6
30	14,6	10,8	14,3	17,8	21,4	24,9	28,3	31,8	35,3	43,8	52,3	60,7	68,9	85,2
35	16,6	12,6	16,7	20,8	25	29	33,1	37,2	41,2	51,3	61,2	71	80,7	99,9
40	18,9	14,4	19,1	23,9	28,6	33,3	37,9	42,6	47,2	58,7	70,1	81,4	92,6	110,1

**Tabela 8.5: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,10$ , material S 275**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,9	2,5	3,3	4,1	4,9	5,6	6,4	7,2	8	9,8	11,7	13,5	15,3	
9	2,2	2,8	3,7	4,6	5,5	6,4	7,2	8,1	9	11,1	13,2	15,2	17,2	21,1
10	2,5	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8	9	10	12,3	14,6	16,9	19,2	23,5
11	2,7	3,4	4,5	5,6	6,7	7,8	8,8	9,9	11	13,6	16,1	18,7	21,1	26
12	3	3,7	4,9	6,1	7,3	8,5	9,6	10,8	12	14,8	17,6	20,4	23,1	28,4
13	3,3	4,2	5,1	6	6,9	7,9	9	10	11	13,6	16,2	18,7	21,3	26,4
14	3,6	4,3	5,7	7,1	8,5	9,9	11,2	12,6	14	17,3	20,6	23,9	27,1	33,3
15	3,9	4,6	6,1	7,6	9,1	10,6	12,1	13,5	15	18,6	22,1	25,6	29	35,8
16	4,2	4,9	6,5	8,1	9,7	11,3	12,9	14,4	16	19,8	23,6	27,3	31	38,2
17	4,5	5,2	6,9	8,6	10,3	12	13,7	15,3	17	21,1	25,1	29,1	33	40,7
18	4,8	5,5	7,3	9,1	10,9	12,7	14,5	16,2	18	22,3	26,6	30,8	35	43,2
19	5,1	5,8	7,7	9,5	11,5	13,4	15,3	17,1	19	23,6	28,1	32,6	37	45,7
20	5,4	6,1	8,2	10,2	12,1	14,1	16,1	18,1	20	24,8	29,6	34,3	39	48,1
21	5,7	6,4	8,6	10,6	12,6	14,6	16,6	18,6	20,6	25,9	31,1	36,1	41	50,6
22	6,1	6,8	9	11,2	13,4	15,5	17,7	19,9	22	27,4	32,6	37,8	43	53,1
23	6,4	7,1	9,4	11,7	14	16,3	18,5	20,8	23	28,6	34,1	39,6	45	55,6
24	6,7	7,4	9,8	12,2	14,6	17	19,3	21,7	24,1	29,9	35,7	41,4	47	58,1
25	7,1	7,7	10,2	12,7	15,2	17,7	20,2	22,6	25,1	31,2	37,2	43,1	49	60,6
30	8,5	11	13	15,2	17,2	19,3	21,4	23,5	25,6	31,5	37,3	43,2	49	60,7
35	9,5	13,4	15,4	17,7	20,3	22,9	25,4	27,9	30,3	36,8	43,7	50,5	57,3	70,9
40	10,6	16	18,5	20,2	23,1	26,1	29,1	32	34,9	42,1	50	57,8	65,5	81,1

**Tabela 8.6: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,15$ , material  $S 275$** 

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,7 2,2	2,5 2,8	3,3 3,3	4,1 4	4,9 4,7	5,6 5,3	6,4 6	7,2 6,7	8 7,3	9,8 9	11,7 10,7	13,5 12,3	15,3 14	
9	1,9 2,5	2,8 3,2	3,7 3,8	4,6 4,5	5,5 5,2	6,4 6	7,2 6,7	8,1 7,5	9 8,2	11,1 10,1	13,2 12	15,2 13,8	17,2 15,7	21,1 19,4
10	2,1 2,9	3,1 3,6	4,1 4,2	5,1 5	6,1 5,8	7,1 6,6	8 7,5	9 8,3	10 9,1	12,3 11,2	14,6 13,3	16,9 15,4	19,2 17,4	23,5 21,5
11	2,3 3,2	3,4 4	4,5 4,7	5,6 5,5	6,7 6,4	7,8 7,3	8,8 8,2	9,9 9,1	11 10	13,6 12,3	16,1 14,6	18,7 16,9	21,1 19,1	26 23,7
12	2,5 3,5	3,7 4,4	4,9 5,2	6,1 6	7,3 7	8,5 8	9,6 8,9	10,8 9,9	12 10,9	14,8 13,4	17,6 15,9	20,4 18,4	23,1 20,9	28,4 25,8
13	2,7 3,9	4 4,8	5,3 5,7	6,6 6,5	7,9 7,6	9,2 8,6	10,4 9,7	11,7 10,8	13 11,8	16,1 14,5	19,1 17,2	22,1 19,9	25,1 22,6	30,9 27,9
14	2,9 4,2	4,3 5,2	5,7 6,2	7,1 7,1	8,5 8,2	9,9 9,3	11,2 10,5	12,6 11,6	14 12,7	17,3 15,6	20,6 18,5	23,9 21,4	27,1 24,3	33,3 30,1
15	3,1 4,6	4,6 5,6	6,1 6,7	7,6 7,7	9,1 8,8	10,6 10	12,1 11,2	13,5 12,4	15 13,6	18,6 16,8	22,1 19,9	25,6 22,9	29 26	35,8 32,2
16	3,3 4,9	4,9 6,1	6,5 7,2	8,1 8,3	9,7 9,4	11,3 10,7	12,9 12	14,4 13,3	16 14,6	19,8 17,9	23,6 21,2	27,3 24,5	31 27,7	38,2 34,3
17	3,5 5,3	5,2 6,5	6,9 7,7	8,6 8,9	10,3 10	12 11,4	13,7 12,7	15,3 14,1	17 15,5	21,1 19	25,1 22,5	29,1 26	33 29,5	40,7 36,5
18	3,7 5,7	5,5 7	7,3 8,2	9,1 9,5	10,9 10,7	12,7 12	14,5 13,5	16,2 15	18 16,4	22,3 20,1	26,6 23,8	30,8 27,5	35 31,2	43,2 38,6
19	3,9 6,1	5,8 7,4	7,7 8,8	9,6 10,1	11,5 11,3	13,4 12,7	15,3 14,3	17,1 15,8	19 17,4	23,6 21,2	28,1 25,1	32,6 29	37 32,9	45,7 40,7
20	4,1 6,5	6,1 7,9	8,2 9,3	10,2 10,7	12,1 12	14,1 13,4	16,1 15	18,1 16,7	20 18,3	24,8 22,3	29,6 26,4	34,3 30,5	39 34,7	48,1 42,9
21	4,3 6,9	6,4 8,4	8,6 9,8	10,7 11,3	12,8 12,7	14,8 14,1	16,9 15,8	19 17,5	21 19,2	26,1 23,5	31,1 27,7	36,1 32,1	41 36,4	50,6 45
22	4,5 7,3	6,8 8,9	9 10,4	11,2 11,9	13,4 13,4	15,5 14,9	17,7 16,6	19,9 18,4	22 20,2	27,4 24,6	32,6 29,1	37,8 33,6	43 38,1	53,1 47,1
23	4,7 7,8	7,1 9,4	9,4 11	11,7 12,5	14 14,1	16,3 15,7	18,5 17,3	20,8 19,2	23 21,1	28,6 25,8	34,1 30,4	39,6 35,1	45 39,8	55,6 49,3
24	4,9 8,2	7,4 9,9	9,8 11,5	12,2 13,2	14,6 14,8	17 16,5	19,3 18,1	21,7 20,1	24,1 22	29,9 26,9	35,7 31,7	41,4 36,6	47 41,6	58,1 51,4
25	5,1 8,7	7,7 10,4	10,2 12,1	12,7 13,8	15,2 15,5	17,7 17,2	20,2 19	22,6 20,9	25,1 23	31,2 28,1	37,2 33,1	43,1 38,2	49 43,3	60,6 53,6
30	6,2 10,2	9,2 13,2	12,2 15,2	15,3 17,2	18,3 19,3	21,2 21,3	24,2 23,4	27,2 25,4	30,1 27,7	37,5 33,8	44,7 39,9	51,9 45,9	59 52	73 64,3
35	7,2 11,4	10,7 16,3	14,3 18,6	17,8 20,6	21,3 23,3	24,8 25,6	28,3 28	31,8 30,4	35,2 32,8	43,8 39,6	52,3 46,7	60,8 53,8	69,1 60,9	85,6 75
40	8,2 12,8	12,3 19,7	16,3 22,3	20,4 23,7	24,4 26,5	28,4 29,5	32,4 32,5	36,4 35,4	40,4 38,2	50,2 45,4	60 53,6	69,7 61,7	79,2 69,7	98,2 85,8

**Tabela 8.7: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,20$ , material  $S 275$** 

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,7 2,5	2,5 3	3,3 3,7	4,1 4,4	4,9 5,1	5,6 5,8	6,4 6,5	7,2 7,2	8 7,9	9,8 9,6	11,7 11,4	13,5 13,1	15,3 14,8	
9	1,9 2,8	2,8 3,5	3,7 4,1	4,6 4,9	5,5 5,7	6,4 6,5	7,2 7,3	8,1 8,1	9 8,8	11,1 10,8	13,2 12,8	15,2 14,7	17,2 16,6	21,1 20,5
10	2,1 3,2	3,1 3,9	4,1 4,6	5,1 5,5	6,1 6,3	7,1 7,2	8 8,1	9 8,9	10 9,8	12,3 12	14,6 14,1	16,9 16,3	19,2 18,5	23,5 22,7
11	2,3 3,6	3,4 4,4	4,5 5,1	5,6 6	6,7 7	7,8 7,9	8,8 8,8	9,9 9,8	11 10,8	13,6 13,2	16,1 15,5	18,7 17,9	21,1 20,3	26 25
12	2,5 4	3,7 4,9	4,9 5,7	6,1 6,6	7,3 7,6	8,5 8,6	9,6 9,6	10,8 10,7	12 11,7	14,8 14,3	17,6 16,9	20,4 19,5	23,1 22,1	28,4 27,2
13	2,7 4,4	4 5,3	5,3 6,2	6,6 7,1	7,9 8,3	9,2 9,4	10,4 10,5	11,7 11,6	13 12,7	16,1 15,5	19,1 18,3	22,1 21,1	25,1 23,9	30,9 29,5
14	2,9 4,8	4,3 5,8	5,7 6,8	7,1 7,7	8,5 8,9	9,9 10,1	11,2 11,3	12,6 12,4	14 13,7	17,3 16,7	20,6 19,7	23,9 22,7	27,1 25,7	33,3 31,7
15	3,1 5,2	4,6 6,3	6,1 7,3	7,6 8,4	9,1 9,6	10,6 10,9	12,1 12,1	13,5 13,4	15 14,6	18,6 17,9	22,1 21,1	25,6 24,3	29 27,6	35,8 34
16	3,3 5,6	4,9 6,8	6,5 7,9	8,1 9	9,7 10,2	11,3 11,6	12,9 12,9	14,4 14,3	16 15,6	19,8 19,1	23,6 22,5	27,3 26	31 29,4	38,2 36,2
17	3,5 6,1	5,2 7,3	6,9 8,5	8,6 9,7	10,3 10,9	12 12,3	13,7 13,8	15,3 15,2	17 16,6	21,1 20,2	25,1 23,9	29,1 27,6	33 31,2	40,7 38,5
18	3,7 6,6	5,5 7,9	7,3 9,1	9,1 10,3	10,9 11,5	12,7 13,1	14,5 14,6	16,2 16,1	18 17,6	22,3 21,4	26,6 25,3	30,8 29,2	35 33	43,2 40,7
19	3,9 7	5,8 8,4	7,7 9,7	9,6 11	11,5 12,3	13,4 13,8	15,3 15,4	17,1 17	19 18,7	23,6 22,6	28,1 26,7	32,6 30,8	37 34,9	45,7 43
20	4,1 7,5	6,1 9	8,2 10,3	10,2 11,7	12,1 13,1	14,1 14,5	16,1 16,3	18,1 18	20 19,7	24,8 23,8	29,6 28,1	34,3 32,4	39 36,7	48,1 45,3
21	4,3 8	6,4 9,5	8,6 11	10,7 12,4	12,8 13,8	14,8 15,3	16,9 17,1	19 18,9	21 20,7	26,1 25,1	31,1 29,5	36,1 34	41 38,5	50,6 47,5
22	4,5 8,6	6,8 10,1	9 11,6	11,2 13,1	13,4 14,6	15,5 16,1	17,7 17,9	19,9 19,8	22 21,7	27,4 26,3	32,6 30,9	37,8 35,6	43 40,4	53,1 49,8
23	4,7 9,1	7,1 10,7	9,4 12,3	11,7 13,8	14 15,4	16,3 16,9	18,5 18,8	20,8 20,7	23 22,7	28,6 27,5	34,1 32,3	39,6 37,3	45 42,2	55,6 52
24	4,9 9,7	7,4 11,3	9,8 13	12,2 14,6	14,6 16,2	17 17,8	19,3 19,6	21,7 21,7	24,1 23,7	29,9 28,8	35,7 33,8	41,4 38,9	47 44	58,1 54,3
25	5,1 10,2	7,7 11,9	10,2 13,6	12,7 15,3	15,2 17	17,7 18,7	20,2 20,4	22,6 22,6	25,1 24,7	31,2 30	37,2 35,2	43,1 40,5	49 45,9	60,6 56,6
30	6,2 11,8	9,2 15,3	12,2 17,3	15,3 19,3	18,3 21,3	21,2 23,3	24,2 25,3	27,2 27,3	30,1 29,8	37,5 36,2	44,7 42,5	51,9 48,8	59 55	73 67,9
35	7,2 13,3	10,7 19,2	14,3 21,4	17,8 23,6	21,3 25,9	24,8 28,2	28,3 30,5	31,8 32,9	35,2 35,2	43,8 42,4	52,3 49,8	60,8 57,2	69,1 64,5	85,6 79,2
40	8,2 15	12,3 23,5	16,3 25,9	20,4 27,8	24,4 30,3	28,4 33,3	32,4 36,1	36,4 38,8	40,4 41,4	50,2 48,7	60 57,2	69,7 65,6	79,2 74	98,2 90,7

**Tabela 8.8: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,25$ , material S 275**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,7 2,7	2,5 3,3	3,3 4	4,1 4,8	4,9 5,5	5,6 6,2	6,4 7	7,2 7,7	8 8,4	9,8 10,3	11,7 12,1	13,5 13,9	15,3 15,7	
9	1,9 3,1	2,8 3,8	3,7 4,6	4,6 5,4	5,5 6,1	6,4 7	7,2 7,8	8,1 8,7	9 9,5	11,1 11,5	13,2 13,5	15,2 15,6	17,2 17,6	21,1 21,6
10	2,1 3,5	3,1 4,3	4,1 5,1	5,1 6	6,1 6,9	7,1 7,7	8 8,7	9 9,6	10 10,5	12,3 12,8	14,6 15	16,9 17,3	19,2 19,5	23,5 24
11	2,3 4	3,4 4,8	4,5 5,6	5,6 6,6	6,7 7,6	7,8 8,5	8,8 9,5	9,9 10,5	11 11,5	13,6 14	16,1 16,5	18,7 19	21,1 21,4	26 26,3
12	2,5 4,4	3,7 5,3	4,9 6,1	6,1 7,2	7,3 8,3	8,5 9,3	9,6 10,4	10,8 11,5	12 12,6	14,8 15,3	17,6 18	20,4 20,7	23,1 23,4	28,4 28,7
13	2,7 4,9	4 5,8	5,3 6,7	6,6 7,8	7,9 9	9,2 10,1	10,4 11,3	11,7 12,4	13 13,6	16,1 16,5	19,1 19,5	22,1 22,4	25,1 25,3	30,9 31,1
14	2,9 5,4	4,3 6,4	5,7 7,4	7,1 8,4	8,5 9,7	9,9 10,9	11,2 12,1	12,6 13,3	14 14,6	17,3 17,8	20,6 20,9	23,9 24,1	27,1 27,2	33,3 33,4
15	3,1 5,8	4,6 6,9	6,1 8	7,6 9	9,1 10,4	10,6 11,7	12,1 13	13,5 14,3	15 15,6	18,6 19,1	22,1 22,4	25,6 25,8	29 29,1	35,8 35,8
16	3,3 6,3	4,9 7,5	6,5 8,6	8,1 9,7	9,7 11,1	11,3 12,5	12,9 13,9	14,4 15,3	16 16,7	19,8 20,3	23,6 23,9	27,3 27,5	31 31,1	38,2 38,2
17	3,5 6,9	5,2 8,1	6,9 9,3	8,6 10,4	10,3 11,8	12 13,3	13,7 14,8	15,3 16,3	17 17,8	21,1 21,6	25,1 25,4	29,1 29,2	33 33,4	40,7 40,6
18	3,7 7,4	5,5 8,7	7,3 10	9,1 11,2	10,9 12,5	12,7 14,1	14,5 15,7	16,2 17,3	18 18,9	22,3 22,8	26,6 26,9	30,8 30,9	35 34,9	43,2 42,9
19	3,9 8	5,8 9,3	7,7 10,7	9,6 11,9	11,5 13,2	13,4 14,9	15,3 16,6	17,1 18,3	19 20	23,6 24,1	28,1 28,4	32,6 32,6	37 36,9	45,7 45,3
20	4,1 8,6	6,1 10	8,2 11,4	10,2 12,7	12,1 14,1	14,1 15,7	16,1 17,5	18,1 19,3	20 21,1	24,8 25,4	29,6 29,8	34,3 34,3	39 38,8	48,1 47,7
21	4,3 9,2	6,4 10,6	8,6 12,1	10,7 13,5	12,8 14,9	14,8 16,5	16,9 18,4	19 20,3	21 22,1	26,1 26,7	31,1 31,3	36,1 36	41 40,7	50,6 50,1
22	4,5 9,8	6,8 11,3	9 12,8	11,2 14,3	13,4 15,8	15,5 17,3	17,7 19,3	19,9 21,3	22 23,2	27,4 28	32,6 32,8	37,8 37,7	43 42,7	53,1 52,5
23	4,7 10,4	7,1 12	9,4 13,6	11,7 15,1	14 16,7	16,3 18,2	18,5 20,2	20,8 22,3	23 24,3	28,6 29,3	34,1 34,3	39,6 39,5	45 44,6	55,6 54,8
24	4,9 11,1	7,4 12,7	9,8 14,3	12,2 15,9	14,6 17,6	17 19,2	19,3 21,1	21,7 23,3	24,1 25,4	29,9 30,7	35,7 35,9	41,4 41,2	47 46,5	58,1 57,2
25	5,1 11,7	7,7 13,5	10,2 15,1	12,7 16,8	15,2 18,5	17,7 20,1	20,2 22	22,6 24,3	25,1 26,5	31,2 32	37,2 37,4	43,1 42,9	49 48,5	60,6 59,6
30	6,2 13,4	9,2 17,5	12,2 19,4	15,3 21,3	18,3 23,3	21,2 25,3	24,2 27,2	27,2 29,3	30,1 32	37,5 38,6	44,7 45,2	51,9 51,7	59 58,2	73 71,5
35	7,2 15,1	10,7 22,1	14,3 24,2	17,8 26,3	21,3 28,5	24,8 30,8	28,3 33,1	31,8 35,4	35,2 37,7	43,8 45,3	52,3 53	60,8 60,6	69,1 68,2	85,6 83,5
40	8,2 17,1	12,3 27,3	16,3 29,6	20,4 31,9	24,4 34,3	28,4 36,8	32,4 39,4	36,4 42	40,4 44,6	50,2 52	60 60,9	69,7 69,6	79,2 78,4	98,2 95,6

**Tabela 8.9: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,10$ , material S 355**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,3 1,7	1,9 2,1	2,6 2,5	3,2 2,9	3,8 3,4	4,4 3,8	5 4,3	5,6 4,8	6,2 5,3	7,7 6,5	9,1 7,8	10,5 9	11,9 10,3	
9	1,5 2	2,2 2,4	2,9 2,9	3,6 3,3	4,3 3,8	4,9 4,3	5,6 4,9	6,3 5,4	7 6	8,6 7,3	10,3 8,7	11,9 10,1	13,5 11,5	16,5 14,3
10	1,6 2,2	2,4 2,7	3,2 3,3	4 3,8	4,7 4,3	5,5 4,8	6,2 5,4	7 6	7,7 6,6	9,6 8,1	11,4 9,7	13,2 11,2	15 12,7	18,4 15,8
11	1,8 2,4	2,6 3	3,5 3,6	4,3 4,2	5,2 4,7	6 5,3	6,9 5,9	7,7 6,6	8,5 7,3	10,6 8,9	12,6 10,6	14,6 12,3	16,5 14	20,3 17,3
12	1,9 2,7	2,9 3,3	3,8 4	4,7 4,6	5,7 5,2	6,6 5,8	7,5 6,4	8,4 7,2	9,3 7,9	11,5 9,7	13,7 11,6	15,9 13,4	18 15,2	22,2 18,9
13	2,1 2,9	3,1 3,7	4,1 4,3	5,1 5	6,1 5,7	7,1 6,3	8,1 7	9,1 7,8	10,1 8,6	12,5 10,5	14,9 12,5	17,3 14,5	19,6 16,5	24,1 20,4
14	2,3 3,2	3,4 4	4,4 4,7	5,5 5,4	6,6 6,1	7,7 6,9	8,7 7,6	9,8 8,4	10,9 9,2	13,5 11,3	16,1 13,5	18,6 15,6	21,1 17,7	26 22
15	2,4 3,4	3,6 4,3	4,8 5,1	5,9 5,9	7,1 6,6	8,2 7,4	9,4 8,2	10,5 9	11,6 9,9	14,4 12,1	17,2 14,4	19,9 16,7	22,6 19	27,9 23,5
16	2,6 3,7	3,8 4,6	5,1 5,5	6,3 6,3	7,5 7,1	8,8 7,9	10 8,8	11,2 9,6	12,4 10,5	15,4 12,9	18,4 15,4	21,3 17,8	24,2 20,2	29,9 25,1
17	2,7 4	4,1 4,9	5,4 5,8	6,7 6,7	8 7,6	9,3 8,5	10,6 9,4	11,9 10,3	13,2 11,2	16,4 13,8	19,5 16,3	22,7 18,9	25,7 21,5	31,8 26,7
18	2,9 4,2	4,3 5,2	5,7 6,2	7,1 7,2	8,5 8,1	9,9 9	11,2 10	12,6 10,9	14 11,9	17,4 14,6	20,7 17,3	24 20	27,3 22,8	33,7 28,2
19	3 4,5	4,5 5,6	6 6,6	7,5 7,6	9 8,6	10,4 9,6	11,9 10,6	13,3 11,6	14,8 12,6	18,3 15,4	21,9 18,3	25,4 21,1	28,8 24	35,6 29,8
20	3,2 4,8	4,8 5,9	6,3 7	7,9 8,1	9,4 9,1	11 10,2	12,5 11,2	14 12,2	15,5 13,3	19,3 16,2	23 19,2	26,7 22,2	30,4 25,3	37,5 31,3
21	3,4 5	5 6,3	6,6 7,4	8,3 8,5	9,9 9,6	11,5 10,7	13,1 11,8	14,7 12,9	16,3 14	20,3 17	24,2 20,2	28,1 23,4	31,9 26,5	39,5 32,9
22	3,5 5,3	5,2 6,6	7 7,8	8,7 9	10,4 10,1	12,1 11,3	13,8 12,4	15,4 13,6	17,1 14,7	21,3 17,8	25,4 21,1	29,4 24,5	33,5 27,8	41,4 34,4
23	3,7 5,6	5,5 6,9	7,3 8,2	9,1 9,4	10,8 10,6	12,6 11,8	14,4 13	16,1 14,3	17,9 15,5	22,2 18,7	26,5 22,1	30,8 25,6	35 29,1	43,3 36
24	3,8 5,9	5,7 7,3	7,6 8,6	9,5 9,9	11,3 11,2	13,2 12,4	15 13,7	16,8 14,9	18,7 16,2	23,2 19,5	27,7 23,1	32,2 26,7	36,6 30,3	45,2 37,6
25	4 6,2	6 7,6	7,9 9	9,8 10,4	11,8 11,7	13,7 13	15,6 14,3	17,5 15,6	19,5 16,9	24,2 20,3	28,9 24,1	33,5 27,8	38,1 31,6	47,2 39,1
30	4,8 7,5	7,1 9,5	9,5 10,7	11,8 12,5	14,2 14,2	16,5 15,9	18,8 17,5	21,1 19,1	23,4 20,7	29,1 24,6	34,7 28,9	40,3 33,4	45,9 37,9	56,8 47
35	5,6 8,3	8,3 11,5	11,1 12,6	13,8 14,3	16,5 16,4	19,2 18,4	21,9 20,4	24,6 22,3	27,3 24,2	34 28,9	40,6 33,8	47,2 39	53,7 44,3	66,6 54,8
40	6,4 9,1	9,5 13,6	12,7 15,1	15,8 16,3	18,9 18,5	22 20,9	25,1 23,2	28,2 25,5	31,3 27,7	38,9 33,1	46,5 38,7	54,1 44,7	61,5 50,7	76,3 62,7

**Tabela 8.10: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,15$ , material S 355**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,3 2	1,9 2,4	2,6 2,8	3,2 3,2	3,8 3,6	4,4 4,2	5 4,7	5,6 5,2	6,2 5,7	7,7 7	9,1 8,3	10,5 9,6	11,9 10,8	
9	1,5 2,3	2,2 2,8	2,9 3,2	3,6 3,7	4,3 4,1	4,9 4,7	5,6 5,2	6,3 5,8	7 6,4	8,6 7,8	10,3 9,3	11,9 10,7	13,5 12,2	16,5 15
10	1,6 2,6	2,4 3,1	3,2 3,6	4 4,1	4,7 4,6	5,5 5,2	6,2 5,8	7 6,4	7,7 7,1	9,6 8,7	11,4 10,3	13,2 11,9	15 13,5	18,4 16,7
11	1,8 2,9	2,6 3,5	3,5 4,1	4,3 4,6	5,2 5,2	6 5,7	6,9 6,4	7,7 7,1	8,5 7,8	10,6 9,5	12,6 11,3	14,6 13	16,5 14,8	20,3 18,3
12	1,9 3,2	2,9 3,9	3,8 4,5	4,7 5,1	5,7 5,7	6,6 6,3	7,5 7	8,4 7,7	9,3 8,5	11,5 10,4	13,7 12,3	15,9 14,2	18 16,1	22,2 19,9
13	2,1 3,5	3,1 4,2	4,1 4,9	5,1 5,6	6,1 6,2	7,1 6,9	8,1 7,5	9,1 8,4	10,1 9,2	12,5 11,2	14,9 13,3	17,3 15,4	19,6 17,4	24,1 21,6
14	2,3 3,8	3,4 4,6	4,4 5,3	5,5 6,1	6,6 6,8	7,7 7,5	8,7 8,2	9,8 9	10,9 9,9	13,5 12,1	16,1 14,3	18,6 16,5	21,1 18,8	26 23,2
15	2,4 4,1	3,6 5	4,8 5,8	5,9 6,6	7,1 7,3	8,2 8,1	9,4 8,8	10,5 9,7	11,6 10,6	14,4 13	17,2 15,3	19,9 17,7	22,6 20,1	27,9 24,8
16	2,6 4,4	3,8 5,3	5,1 6,2	6,3 7,1	7,5 7,9	8,8 8,7	10 9,5	11,2 10,3	12,4 11,3	15,4 13,8	18,4 16,4	21,3 18,9	24,2 21,4	29,9 26,5
17	2,7 4,7	4,1 5,7	5,4 6,7	6,7 7,6	8 8,4	9,3 9,3	10,6 10,2	11,9 11	13,2 12	16,4 14,7	19,5 17,4	22,7 20,1	25,7 22,8	31,8 28,1
18	2,9 5,1	4,3 6,1	5,7 7,1	7,1 8,1	8,5 9	9,9 9,9	11,2 10,8	12,6 11,7	14 12,8	17,4 15,6	20,7 18,4	24 21,2	27,3 24,1	33,7 29,8
19	3 5,4	4,5 6,5	6 7,6	7,5 8,6	9 9,6	10,4 10,5	11,9 11,5	13,3 12,5	14,8 13,5	18,3 16,4	21,9 19,4	25,4 22,4	28,8 25,4	35,6 31,4
20	3,2 5,8	4,8 6,9	6,3 8	7,9 9,1	9,4 10,1	11 11,2	12,5 12,2	14 13,2	15,5 14,2	19,3 17,3	23 20,5	26,7 23,6	30,4 26,8	37,5 33,1
21	3,4 6,1	5 7,4	6,6 8,5	8,3 9,6	9,9 10,7	11,5 11,8	13,1 12,9	14,7 14	16,3 15	20,3 18,2	24,2 21,5	28,1 24,8	31,9 28,1	39,5 34,7
22	3,5 6,5	5,2 7,8	7 9	8,7 10,2	10,4 11,3	12,1 12,5	13,8 13,6	15,4 14,7	17,1 15,9	21,3 19,1	25,4 22,5	29,4 26	33,5 29,4	41,4 36,4
23	3,7 6,9	5,5 8,2	7,3 9,5	9,1 10,7	10,8 11,9	12,6 13,1	14,4 14,3	16,1 15,5	17,9 16,7	22,2 20	26,5 23,5	30,8 27,2	35 30,8	43,3 38
24	3,8 7,2	5,7 8,6	7,6 10	9,5 11,3	11,3 12,5	13,2 13,8	15 15	16,8 16,2	18,7 17,5	23,2 20,9	27,7 24,6	32,2 28,3	36,6 32,1	45,2 39,7
25	4 7,6	6 9,1	7,9 10,5	9,8 11,8	11,8 13,1	13,7 14,4	15,6 15,7	17,5 17	19,5 18,3	24,2 21,8	28,9 25,6	33,5 29,5	38,1 33,5	47,2 41,3
30	4,8 9	7,1 11,4	9,5 12,9	11,8 14,7	14,2 16,3	16,5 17,8	18,8 19,4	21,1 21	23,4 22,5	29,1 26,4	34,7 30,9	40,3 35,5	45,9 40,2	56,8 49,6
35	5,6 10	8,3 14	11,1 15,3	13,8 16,9	16,5 18,9	19,2 21	21,9 23	24,6 24,9	27,3 26,7	34 31,2	40,6 36,1	47,2 41,6	53,7 47	66,6 57,9
40	6,4 11,1	9,5 16,8	12,7 18,8	15,8 19,2	18,9 21,4	22 23,8	25,1 26,1	28,2 28,4	31,3 30,6	38,9 35,9	46,5 41,3	54,1 47,6	61,5 53,8	76,3 66,2

**Tabela 8.11: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,20$ , material S 355**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,3 2,3	1,9 2,7	2,6 3,1	3,2 3,5	3,8 3,9	4,4 4,5	5 5	5,6 5,5	6,2 6,1	7,7 7,4	9,1 8,8	10,5 10,1	11,9 11,4	
9	1,5 2,6	2,2 3,1	2,9 3,6	3,6 4	4,3 4,4	4,9 5	5,6 5,6	6,3 6,2	7 6,8	8,6 8,3	10,3 9,8	11,9 11,3	13,5 12,8	16,5 15,8
10	1,6 2,9	2,4 3,5	3,2 4	4 4,5	4,7 5	5,5 5,6	6,2 6,2	7 6,9	7,7 7,6	9,6 9,2	11,4 10,9	13,2 12,6	15 14,2	18,4 17,5
11	1,8 3,3	2,6 3,9	3,5 4,5	4,3 5	5,2 5,6	6 6,1	6,9 6,9	7,7 7,6	8,5 8,3	10,6 10,1	12,6 12	14,6 13,8	16,5 15,6	20,3 19,3
12	1,9 3,6	2,9 4,3	3,8 5	4,7 5,6	5,7 6,1	6,6 6,7	7,5 7,5	8,4 8,3	9,3 9,1	11,5 11,1	13,7 13	15,9 15	18 17	22,2 21
13	2,1 4	3,1 4,7	4,1 5,4	5,1 6,1	6,1 6,7	7,1 7,4	8,1 8,1	9,1 9	10,1 9,8	12,5 12	14,9 14,1	17,3 16,3	19,6 18,4	24,1 22,7
14	2,3 4,3	3,4 5,2	4,4 5,9	5,5 6,6	6,6 7,3	7,7 8	8,7 8,8	9,8 9,6	10,9 10,6	13,5 12,9	16,1 15,2	18,6 17,5	21,1 19,8	26 24,4
15	2,4 4,7	3,6 5,6	4,8 6,4	5,9 7,2	7,1 8	8,2 8,7	9,4 9,4	10,5 10,4	11,6 11,3	14,4 13,8	17,2 16,3	19,9 18,7	22,6 21,2	27,9 26,2
16	2,6 5,1	3,8 6	5,1 6,9	6,3 7,8	7,5 8,6	8,8 9,4	10 10,2	11,2 11,1	12,4 12,1	15,4 14,7	18,4 17,4	21,3 20	24,2 22,6	29,9 27,9
17	2,7 5,5	4,1 6,5	5,4 7,4	6,7 8,3	8 9,2	9,3 10,1	10,6 10,9	11,9 11,8	13,2 12,9	16,4 15,6	19,5 18,4	22,7 21,2	25,7 24	31,8 29,6
18	2,9 5,9	4,3 7	5,7 8	7,1 8,9	8,5 9,8	9,9 10,7	11,2 11,6	12,6 13,7	14 16,6	17,4 16,6	20,7 19,5	24 22,5	27,3 25,5	33,7 31,4
19	3 6,3	4,5 7,4	6 8,5	7,5 9,5	9 10,5	10,4 11,4	11,9 12,4	13,3 13,3	14,8 14,5	18,3 17,5	21,9 20,6	25,4 23,7	28,8 26,9	35,6 33,1
20	3,2 6,7	4,8 7,9	6,3 9	7,9 10,1	9,4 11,1	11 12,1	12,5 13,2	14 14,2	15,5 15,3	19,3 18,4	23 21,7	26,7 25	30,4 28,3	37,5 34,8
21	3,4 7,1	5 8,4	6,6 9,6	8,3 10,7	9,9 11,8	11,5 12,9	13,1 13,9	14,7 15	16,3 16	20,3 19,4	24,2 22,8	28,1 26,2	31,9 29,7	39,5 36,6
22	3,5 7,6	5,2 8,9	7 10,1	8,7 11,3	10,4 12,4	12,1 13,6	13,8 14,7	15,4 15,8	17,1 16,9	21,3 20,4	25,4 23,9	29,4 27,5	33,5 31,1	41,4 38,3
23	3,7 8	5,5 9,4	7,3 10,7	9,1 11,9	10,8 13,1	12,6 14,3	14,4 15,5	16,1 16,6	17,9 17,8	22,2 21,3	26,5 25	30,8 28,8	35 32,5	43,3 40,1
24	3,8 8,5	5,7 9,9	7,6 11,3	9,5 12,5	11,3 13,8	13,2 15	15 16,3	16,8 17,5	18,7 18,7	23,2 22,3	27,7 26,1	32,2 30	36,6 34	45,2 41,8
25	4 9	6 10,5	7,9 11,8	9,8 13,2	11,8 14,5	13,7 15,8	15,6 17,1	17,5 18,3	19,5 19,6	24,2 23,2	28,9 27,2	33,5 31,3	38,1 35,4	47,2 43,5
30	4,8 10,5	7,1 13,3	9,5 14,9	11,8 16,5	14,2 18,1	16,5 19,7	18,8 21,2	21,1 22,7	23,4 24,3	29,1 28,1	34,7 32,9	40,3 37,7	45,9 42,5	56,8 52,3
35	5,6 11,6	8,3 16,5	11,1 18,3	13,8 19,6	16,5 21,7	19,2 23,7	21,9 25,6	24,6 27,4	27,3 29,2	34 33,6	40,6 38,5	47,2 44,1	53,7 49,7	66,6 61
40	6,4 12,9	9,5 20	12,7 22	15,8 22,5	18,9 24,5	22 26,9	25,1 29,2	28,2 31,4	31,3 33,6	38,9 38,7	46,5 44,1	54,1 50,5	61,5 57	76,3 69,8

**Tabela 8.12: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,25$ , material S 355**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,3 2,5	1,9 3	2,6 3,3	3,2 3,7	3,8 4,2	4,4 4,8	5 5,4	5,6 5,9	6,2 6,5	7,7 7,9	9,1 9,3	10,5 10,7	11,9 12	
9	1,5 2,9	2,2 3,4	2,9 3,8	3,6 4,3	4,3 4,8	4,9 5,4	5,6 6	6,3 6,6	7 7,3	8,6 8,8	10,3 10,4	11,9 12	13,5 13,5	16,5 16,6
10	1,6 3,2	2,4 3,8	3,2 4,4	4 4,8	4,7 5,3	5,5 6	6,2 6,7	7 7,4	7,7 8,1	9,6 9,8	11,4 11,5	13,2 13,3	15 15	18,4 18,4
11	1,8 3,6	2,6 4,3	3,5 4,9	4,3 5,4	5,2 5,9	6 6,6	6,9 7,3	7,7 8,1	8,5 8,9	10,6 10,8	12,6 12,7	14,6 14,6	16,5 16,4	20,3 20,2
12	1,9 4	2,9 4,7	3,8 5,4	4,7 6	5,7 6,6	6,6 7,2	7,5 8	8,4 8,8	9,3 9,7	11,5 11,7	13,7 13,8	15,9 15,9	18 17,9	22,2 22,1
13	2,1 4,4	3,1 5,2	4,1 5,9	5,1 6,6	6,1 7,2	7,1 7,9	8,1 8,7	9,1 9,6	10,1 10,5	12,5 12,7	14,9 14,9	17,3 17,2	19,6 19,4	24,1 23,9
14	2,3 4,8	3,4 5,7	4,4 6,5	5,5 7,2	6,6 7,9	7,7 8,6	8,7 9,4	9,8 10,3	10,9 11,3	13,5 13,7	16,1 16,1	18,6 18,5	21,1 20,9	26 25,7
15	2,4 5,3	3,6 6,2	4,8 7	5,9 7,8	7,1 8,6	8,2 9,3	9,4 10,1	10,5 11,1	11,6 12,1	14,4 14,7	17,2 17,2	19,9 19,8	22,6 22,4	27,9 27,5
16	2,6 5,7	3,8 6,7	5,1 7,6	6,3 8,4	7,5 9,2	8,8 10	10 10,8	11,2 11,9	12,4 12,9	15,4 15,6	18,4 18,4	21,3 21,1	24,2 23,9	29,9 29,3
17	2,7 6,1	4,1 7,2	5,4 8,2	6,7 9,1	8 9,9	9,3 10,8	10,6 11,6	11,9 12,6	13,2 13,8	16,4 16,6	19,5 19,5	22,7 22,4	25,7 25,3	31,8 31,2
18	2,9 6,6	4,3 7,7	5,7 8,7	7,1 9,7	8,5 10,6	9,9 11,5	11,2 12,4	12,6 13,4	14 14,6	17,4 17,6	20,7 20,7	24 23,8	27,3 26,8	33,7 33
19	3 7,1	4,5 8,3	6 9,3	7,5 10,4	9 11,3	10,4 12,3	11,9 13,2	13,3 14,2	14,8 15,4	18,3 18,6	21,9 21,8	25,4 25,1	28,8 28,3	35,6 34,8
20	3,2 7,6	4,8 8,8	6,3 9,9	7,9 11	9,4 12,1	11 13,1	12,5 14,1	14 15,1	15,5 16,3	19,3 19,6	23 23	26,7 26,4	30,4 29,8	37,5 36,6
21	3,4 8,1	5 9,4	6,6 10,6	8,3 11,7	9,9 12,8	11,5 13,9	13,1 14,9	14,7 16	16,3 17,1	20,3 20,6	24,2 24,1	28,1 27,7	31,9 31,3	39,5 38,5
22	3,5 8,6	5,2 10	7 11,2	8,7 12,4	10,4 13,5	12,1 14,7	13,8 15,8	15,4 16,9	17,1 18	21,3 21,6	25,4 25,3	29,4 29,1	33,5 32,8	41,4 40,3
23	3,7 9,2	5,5 10,5	7,3 11,8	9,1 13,1	10,8 14,3	12,6 15,5	14,4 16,6	16,1 17,8	17,9 18,9	22,2 22,7	26,5 26,4	30,8 30,4	35 34,3	43,3 42,1
24	3,8 9,7	5,7 11,1	7,6 12,5	9,5 13,8	11,3 15	13,2 16,3	15 17,5	16,8 18,7	18,7 19,9	23,2 23,7	27,7 27,7	32,2 31,7	36,6 35,8	45,2 44
25	4 10,3	6 11,8	7,9 13,2	9,8 14,5	11,8 15,8	13,7 17,1	15,6 18,4	17,5 19,6	19,5 20,9	24,2 24,7	28,9 28,9	33,5 33	38,1 37,3	47,2 45,8
30	4,8 11,8	7,1 15,1	9,5 16,7	11,8 18,3	14,2 19,9	16,5 21,4	18,8 22,9	21,1 24,5	23,4 26	29,1 29,9	34,7 34,9	40,3 39,9	45,9 44,8	56,8 55
35	5,6 13,2	8,3 18,9	11,1 20,7	13,8 22,5	16,5 24,3	19,2 26,1	21,9 27,8	24,6 29,6	26 31,4	34 35,8	40,6 41	47,2 46,7	53,7 52,5	66,6 64,2
40	6,4 14,7	9,5 23,2	12,7 25,1	15,8 26	18,9 27,8	22 30,2	25,1 32,5	28,2 34,7	31,3 36,7	38,9 41,7	46,5 46,9	54,1 53,6	61,5 60,2	76,3 73,5

**Tabela 8.13: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,10$ , material S 420**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,1 1,6	1,6 2	2,2 2,3	2,7 2,6	3,2 3	3,7 3,3	4,2 3,7	4,8 4,1	5,3 4,5	6,5 5,6	7,7 6,6	9 7,7	10,1 8,7	
9	1,3 1,8	1,8 2,3	2,4 2,6	3 3	3,6 3,4	4,2 3,8	4,8 4,2	5,3 4,6	5,9 5,1	7,3 6,2	8,7 7,4	10,1 8,6	11,4 9,8	14,1 12,1
10	1,4 2,1	2 2,5	2,7 3	3,4 3,4	4 3,8	4,7 4,2	5,3 4,6	5,9 5,1	6,6 5,6	8,1 6,9	9,7 8,2	11,2 9,5	12,7 10,8	15,7 13,4
11	1,5 2,3	2,2 2,8	3 3,3	3,7 3,8	4,4 4,2	5,1 4,7	5,8 5,1	6,5 5,6	7,2 6,2	9 7,6	10,7 9	12,4 10,4	14 11,8	17,3 14,7
12	1,6 2,5	2,4 3,1	3,2 3,6	4 4,1	4,8 4,6	5,6 5,1	6,4 5,7	7,1 6,2	7,9 6,7	9,8 8,3	11,7 9,8	13,5 11,4	15,3 12,9	18,9 16
13	1,7 2,7	2,6 3,4	3,5 4	4,3 4,5	5,2 5,1	6 5,6	6,9 6,2	7,7 6,7	8,5 7,3	10,6 8,9	12,6 10,6	14,6 12,3	16,6 14	20,5 17,3
14	1,9 3	2,8 3,7	3,8 4,3	4,7 4,9	5,6 5,5	6,5 6,1	7,4 6,7	8,3 7,3	9,2 7,9	11,4 9,6	13,6 11,4	15,8 13,2	17,9 15	22,1 18,6
15	2 3,2	3 4	4 4,6	5 5,3	6 5,9	7 6,6	7,9 7,2	8,9 7,9	9,9 8,5	12,2 10,3	14,6 12,2	16,9 14,1	19,2 16,1	23,7 19,9
16	2,2 3,5	3,2 4,2	4,3 5	5,3 5,7	6,4 6,4	7,4 7,1	8,5 7,7	9,5 8,4	10,5 9,1	13,1 11	15,6 13	18,1 15,1	20,5 17,1	25,4 21,2
17	2,3 3,7	3,4 4,5	4,6 5,3	5,7 6,1	6,8 6,8	7,9 7,6	9 8,3	10,1 9	11,2 9,7	13,9 11,7	16,6 13,9	19,2 16	21,8 18,2	27 22,5
18	2,4 3,9	3,6 4,8	4,8 5,7	6 6,5	7,2 7,3	8,4 8	9,5 8,8	10,7 9,6	11,8 10,4	14,7 12,4	17,5 14,7	20,4 17	23,1 19,2	28,6 23,9
19	2,6 4,2	3,8 5,1	5,1 6	6,3 6,9	7,6 7,7	8,8 8,5	10 9,4	11,3 10,2	12,5 11	15,5 13,1	18,5 15,5	21,5 17,9	24,4 20,3	30,2 25,2
20	2,7 4,4	4 5,4	5,4 6,4	6,7 7,3	8 8,2	9,3 9	10,6 9,9	11,9 10,8	13,2 11,6	16,4 13,8	19,5 16,3	22,6 18,8	25,7 21,4	31,9 26,5
21	2,8 4,7	4,2 5,8	5,6 6,7	7 7,7	8,4 8,6	9,7 9,5	11,1 10,5	12,5 11,4	13,8 12,3	17,2 14,6	20,5 17,1	23,8 19,8	27,1 22,4	33,5 27,8
22	3 5	4,4 6,1	5,9 7,1	7,3 8,1	8,8 9,1	10,2 10	11,6 11	13,1 12	14,5 12,9	18 15,3	21,5 17,9	24,9 20,7	28,4 23,5	35,1 29,1
23	3,1 5,2	4,6 6,4	6,2 7,5	7,7 8,5	9,2 9,5	10,7 10,6	12,2 11,6	13,7 12,6	15,1 13,6	18,8 16,1	22,5 18,7	26,1 21,6	29,7 24,6	36,7 30,4
24	3,2 5,5	4,8 6,7	6,4 7,8	8 8,9	9,6 10	11,1 11,1	12,7 12,1	14,3 13,2	15,8 14,2	19,7 16,8	23,5 19,6	27,2 22,6	31 25,6	38,4 31,8
25	3,4 5,8	5 7	6,7 8,2	8,3 9,4	10 10,5	11,6 11,6	13,2 12,7	14,9 13,8	16,5 14,9	20,5 17,6	24,5 20,4	28,4 23,5	32,3 26,7	40 33,1
30	4 7	6 8,7	8 9,5	10 11	12 12,6	13,9 14	15,9 15,4	17,8 16,7	19,8 18	24,6 21,2	29,4 24,5	34,2 28,3	38,9 32	48,2 39,7
35	4,7 7,6	7 10,5	9,4 11,1	11,7 12,6	14 14,4	16,3 16,1	18,6 17,8	20,8 19,4	23,1 21	28,8 24,9	34,4 28,8	39,9 33	45,5 37,4	56,4 46,3
40	5,4 8,3	8 12,4	10,7 13,3	13,3 14,3	16 16,2	18,6 18,2	21,2 20,2	23,8 22,1	26,4 24	32,9 28,5	39,4 33	45,7 37,8	52,1 42,8	64,6 53

**Tabela 8.14: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,15$ , material S 420**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,1 1,9	1,6 2,3	2,2 2,6	2,7 2,9	3,2 3,2	3,7 3,6	4,2 4	4,8 4,4	5,3 4,8	6,5 5,9	7,7 7	9 8,1	10,1 9,2	
9	1,3 2,2	1,8 2,6	2,4 3	3 3,3	3,6 3,7	4,2 4,1	4,8 4,5	5,3 4,9	5,9 5,4	7,3 6,6	8,7 7,9	10,1 9,1	11,4 10,3	14,1 12,7
10	1,4 2,4	2 2,9	2,7 3,4	3,4 3,8	4 4,2	4,7 4,6	5,3 5	5,9 5,5	6,6 6	8,1 7,4	9,7 8,7	11,2 10,1	12,7 11,4	15,7 14,1
11	1,5 2,7	2,2 3,3	3 3,7	3,7 4,2	4,4 4,6	5,1 5,1	5,8 5,5	6,5 6	7,2 6,6	9 8,1	10,7 9,6	12,4 11	14 12,5	17,3 15,5
12	1,6 3	2,4 3,6	3,2 4,1	4 4,6	4,8 5,1	5,6 5,6	6,4 6,1	7,1 6,6	7,9 7,2	9,8 8,8	11,7 10,4	13,5 12	15,3 13,6	18,9 16,8
13	1,8 3,3	2,6 3,9	3,5 4,5	4,3 5,1	5,2 5,6	6 6,2	6,9 6,7	7,7 7,2	8,5 7,8	10,6 9,5	12,6 11,3	14,6 13	16,6 14,7	20,5 18,2
14	1,9 3,5	2,8 4,3	3,8 4,9	4,7 5,5	5,6 6,1	6,5 6,7	7,4 7,3	8,3 7,9	9,2 8,4	11,4 10,3	13,6 12,1	15,8 14	17,9 15,9	22,1 19,6
15	2 3,8	3 4,6	4 5,3	5 6	6 6,6	7 7,2	7,9 7,9	8,9 8,5	9,9 9,1	12,2 11	14,6 13	16,9 15	19,2 17	23,7 21
16	2,2 4,1	3,2 5	4,3 5,7	5,3 6,4	6,4 7,1	7,4 7,8	8,5 8,5	9,5 9,1	10,5 9,8	13,1 11,7	15,6 13,9	18,1 16	20,5 18,1	25,4 22,4
17	2,3 4,4	3,4 5,3	4,6 6,1	5,7 6,9	6,8 7,6	7,9 8,4	9 9,1	10,1 9,8	11,2 10,5	13,9 12,5	16,6 14,7	19,2 17	21,8 19,2	27 23,8
18	2,4 4,7	3,6 5,7	4,8 6,6	6 7,4	7,2 8,2	8,4 8,9	9,5 9,7	10,7 10,4	11,8 11,2	14,7 13,2	17,5 15,6	20,4 18	23,1 20,4	28,6 25,1
19	2,6 5,1	3,8 6,1	5,1 7	6,3 7,8	7,6 8,7	8,8 9,5	10 10,3	11,3 11,1	12,5 11,9	15,5 14	18,5 16,5	21,5 19	24,4 21,5	30,2 26,5
20	2,7 5,4	4 6,4	5,4 7,4	6,7 8,3	8 9,2	9,3 10,1	10,6 10,9	11,9 11,8	13,2 12,6	16,4 14,7	19,5 17,3	22,6 20,6	25,7 22,6	31,9 27,9
21	2,8 5,7	4,2 6,8	5,6 7,8	7 8,8	8,4 9,7	9,7 10,6	11,1 11,5	12,5 12,4	13,8 13,3	17,2 15,6	20,5 18,2	23,8 21	27,1 23,7	33,5 29,3
22	3 6	4,4 7,2	5,9 8,3	7,3 9,3	8,8 10,3	10,2 11,2	11,6 12,2	13,1 13,1	14,5 14	18 16,4	21,5 19,1	24,9 22	28,4 24,9	35,1 30,7
23	3,1 6,4	4,6 7,6	6,2 8,7	7,7 9,8	9,2 10,8	10,7 11,8	12,2 12,8	13,7 13,8	15,1 14,8	18,8 17,2	22,5 20	26,1 23	29,7 26	36,7 32,1
24	3,2 6,7	4,8 8	6,4 9,2	8 10,3	9,6 11,3	11,1 12,4	12,7 13,4	14,3 14,5	15,8 15,5	19,7 18,1	23,5 20,9	27,2 24	31 27,1	38,4 33,5
25	3,4 7,1	5 8,4	6,7 9,6	8,3 10,8	10 11,9	11,6 13	13,2 14,1	14,9 15,2	16,5 16,2	20,5 18,9	24,5 21,7	28,4 25	32,3 28,3	40 34,9
30	4 8,4	6 10,5	8 11,6	10 13,1	12 14,6	13,9 16	15,9 17,4	17,8 18,7	19,8 19,9	24,6 23	29,4 26,2	34,2 30	38,9 33,9	48,2 41,9
35	4,7 9,2	7 12,8	9,4 13,6	11,7 14,9	14 16,7	16,3 18,5	18,6 20,2	20,8 21,8	23,1 23,3	28,8 27,1	34,4 30,8	39,9 35,1	45,5 39,7	56,4 48,9
40	5,4 10,1	8 15,3	10,7 16,5	13,3 16,9	16 18,8	18,6 20,8	21,2 22,8	23,8 24,7	26,4 26,6	32,9 31,1	39,4 35,4	45,7 40,2	52,1 45,4	64,6 55,9

**Tabela 8.15: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,20$ , material S 420**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,1 2,2	1,6 2,5	2,2 2,9	2,7 3,2	3,2 3,5	3,7 3,8	4,2 4,3	4,8 4,7	5,3 5,2	6,5 6,3	7,7 7,4	9 8,6	10,1 9,7	
9	1,3 2,5	1,8 2,9	2,4 3,3	3 3,6	3,6 4	4,2 4,4	4,8 4,8	5,3 5,3	5,9 5,8	7,3 7	8,7 8,3	10,1 9,6	11,4 10,8	14,1 13,4
10	1,4 2,8	2 3,3	2,7 3,7	3,4 4,1	4 4,5	4,7 4,9	5,3 5,3	5,9 5,9	6,6 6,4	8,1 7,8	9,7 9,2	11,2 10,6	12,7 12	15,7 14,8
11	1,5 3,1	2,2 3,7	3 4,2	3,7 4,6	4,4 5	5,1 5,5	5,8 5,9	6,5 6,5	7,2 7,1	9 8,6	10,7 10,1	12,4 11,7	14 13,2	17,3 16,3
12	1,6 3,4	2,4 4	3,2 4,6	4 5,1	4,8 5,6	5,6 6,1	6,4 6,5	7,1 7	7,9 7,7	9,8 9,4	11,7 11	13,5 12,7	15,3 14,4	18,9 17,7
13	1,8 3,8	2,6 4,4	3,5 5	4,3 5,6	5,2 6,1	6 6,7	6,9 7,2	7,7 7,7	8,5 8,3	10,6 10,1	12,6 11,9	14,6 13,7	16,6 15,6	20,5 19,2
14	1,9 4,1	2,8 4,8	3,8 5,5	4,7 6,1	5,6 6,7	6,5 7,3	7,4 7,8	8,3 8,4	9,2 9	11,4 10,9	13,6 12,9	15,8 14,8	17,9 16,7	22,1 20,6
15	2 4,4	3 5,2	4 6	5 6,6	6 7,3	7 7,9	7,9 8,5	8,9 9,1	9,9 9,7	12,2 11,7	14,6 13,8	16,9 15,8	19,2 17,9	23,7 22,1
16	2,2 4,8	3,2 5,6	4,3 6,4	5,3 7,1	6,4 7,8	7,4 8,5	8,5 9,1	9,5 9,8	10,5 10,4	13,1 12,5	15,6 14,7	18,1 16,9	20,5 19,1	25,4 23,5
17	2,3 5,1	3,4 6,1	4,6 6,9	5,7 7,7	6,8 8,4	7,9 9,1	9 9,8	10,1 10,5	11,2 11,2	13,9 13,3	16,6 15,6	19,2 18	21,8 20,3	27 25
18	2,4 5,5	3,6 6,5	4,8 7,4	6 8,2	7,2 9	8,4 9,7	9,5 10,5	10,7 11,2	11,8 12	14,7 14,1	17,5 16,5	20,4 19	23,1 21,5	28,6 26,5
19	2,6 5,8	3,8 6,9	5,1 7,8	6,3 8,7	7,6 9,6	8,8 10,4	10 11,2	11,3 11,9	12,5 12,7	15,5 14,9	18,5 17,5	21,5 20,1	24,4 22,7	30,2 27,9
20	2,7 6,2	4 7,3	5,4 8,3	6,7 9,3	8 10,1	9,3 11	10,6 11,8	11,9 12,7	13,2 13,5	16,4 15,7	19,5 18,4	22,6 21,1	25,7 23,9	31,9 29,4
21	2,8 6,6	4,2 7,8	5,6 8,8	7 9,8	8,4 10,7	9,7 11,7	11,1 12,5	12,5 13,4	13,8 14,3	17,2 16,5	20,5 19,3	23,8 22,2	27,1 25,1	33,5 30,8
22	3 7	4,4 8,2	5,9 9,3	7,3 10,4	8,8 11,3	10,2 12,3	11,6 13,2	13,1 14,2	14,5 15,1	18 17,4	21,5 20,3	24,9 23,3	28,4 26,3	35,1 32,3
23	3,1 7,4	4,6 8,7	6,2 9,8	7,7 10,9	9,2 12	10,7 13	12,2 13,9	13,7 14,9	15,1 15,9	18,8 18,3	22,5 21,2	26,1 24,3	29,7 27,5	36,7 33,8
24	3,2 7,8	4,8 9,2	6,4 10,4	8 11,5	9,6 12,6	11,1 13,6	12,7 14,7	14,3 15,7	15,8 16,7	19,7 19,2	23,5 22,2	27,2 25,4	31 28,7	38,4 35,3
25	3,4 8,3	5 9,6	6,7 10,9	8,3 12,1	10 13,2	11,6 14,3	13,2 15,4	14,9 16,4	16,5 17,5	20,5 20,1	24,5 23,1	28,4 26,5	32,3 29,9	40 36,7
30	4 9,7	6 12,2	8 13,7	10 15,1	12 16,4	13,9 17,8	15,9 19,1	17,8 20,4	19,8 21,7	24,6 24,8	29,4 27,8	34,2 31,8	38,9 35,9	48,2 44,1
35	4,7 10,7	7 15	9,4 16,2	11,7 17,3	14 19,2	16,3 21	18,6 22,6	20,8 24,2	23,1 25,7	28,8 29,3	34,4 32,8	39,9 37,3	45,5 42	56,4 51,5
40	5,4 11,8	8 18,1	10,7 20	13,3 19,7	16 21,5	18,6 23,6	21,2 25,6	23,8 27,5	26,4 29,3	32,9 33,7	39,4 37,9	45,7 42,7	52,1 48,1	64,6 58,9



**Tabela 8.16: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,25$ , material S 420**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1,1 2,4	1,6 2,8	2,2 3,1	2,7 3,4	3,2 3,7	3,7 4,1	4,2 4,6	4,8 5	5,3 5,5	6,5 6,7	7,7 7,8	9	10,1 10,2	
9	1,3 2,8	1,8 3,2	2,4 3,6	3 3,9	3,6 4,3	4,2 4,6	4,8 5,1	5,3 5,6	5,9 6,2	7,3 7,5	8,7 8,8	10,1 10,1	11,4 11,4	14,1 14
10	1,4 3,1	2 3,6	2,7 4,1	3,4 4,5	4 4,8	4,7 5,2	5,3 5,7	5,9 6,3	6,6 6,8	8,1 8,3	9,7 9,7	11,2 11,2	12,7 12,6	15,7 15,6
11	1,5 3,5	2,2 4	3 4,5	3,7 5	4,4 5,4	5,1 5,8	5,8 6,3	6,5 6,9	7,2 7,5	9 9,1	10,7 10,7	12,4 12,3	14 13,9	17,3 17,1
12	1,6 3,9	2,4 4,5	3,2 5	4 5,5	4,8 6	5,6 6,5	6,4 7	7,1 7,5	7,9 8,2	9,8 9,9	11,7 11,7	13,5 13,4	15,3 15,1	18,9 18,6
13	1,8 4,3	2,6 4,9	3,5 5,5	4,3 6,1	5,2 6,6	6 7,1	6,9 7,6	7,7 8,2	8,5 8,9	10,6 10,8	12,6 12,6	14,6 14,5	16,6 16,4	20,5 20,1
14	1,9 4,6	2,8 5,3	3,8 6	4,7 6,6	5,6 7,2	6,5 7,8	7,4 8,3	8,3 8,9	9,2 9,6	11,4 11,6	13,6 13,6	15,8 15,6	17,9 17,6	22,1 21,6
15	2 5	3 5,8	4 6,5	5 7,2	6 7,8	7 8,5	7,9 9,1	8,9 9,7	9,9 10,3	12,2 12,4	14,6 14,6	16,9 16,7	19,2 18,9	23,7 23,2
16	2,2 5,4	3,2 6,2	4,3 7	5,3 7,8	6,4 8,5	7,4 9,1	8,5 9,8	9,5 10,4	10,5 11,1	13,1 13,2	15,6 15,5	18,1 17,8	20,5 20,1	25,4 24,7
17	2,3 5,8	3,4 6,7	4,6 7,6	5,7 8,4	6,8 9,1	7,9 9,8	9 10,5	10,1 11,2	11,2 11,9	13,9 14,1	16,6 16,5	19,2 18,9	21,8 21,4	27 26,2
18	2,4 6,2	3,6 7,2	4,8 8,1	6 8,9	7,2 9,7	8,4 10,5	9,5 11,2	10,7 12	11,8 12,7	14,7 14,9	17,5 17,5	20,4 20,1	23,1 22,6	28,6 27,8
19	2,6 6,6	3,8 7,7	5,1 8,7	6,3 9,5	7,6 10,4	8,8 11,2	10 12	11,3 12,8	12,5 13,5	15,5 15,8	18,5 18,5	21,5 21,2	24,4 23,9	30,2 29,3
20	2,7 7	4 8,2	5,4 9,2	6,7 10,2	8 11	9,3 11,9	10,6 12,7	11,9 13,6	13,2 14,4	16,4 16,6	19,5 19,5	22,6 22,3	25,7 25,2	31,9 30,9
21	2,8 7,5	4,2 8,7	5,6 9,8	7 10,8	8,4 11,7	9,7 12,6	11,1 13,5	12,5 14,4	13,8 15,2	17,2 17,5	20,5 20,4	23,8 23,4	27,1 26,4	33,5 32,4
22	3 8	4,4 9,2	5,9 10,3	7,3 11,4	8,8 12,4	10,2 13,3	11,6 14,3	13,1 15,2	14,5 16,1	18 18,4	21,5 21,4	24,9 24,6	28,4 27,7	35,1 33,9
23	3,1 8,5	4,6 9,8	6,2 10,9	7,7 12	9,2 13,1	10,7 14,1	12,2 15	13,7 16	15,1 17	18,8 19,4	22,5 22,4	26,1 25,7	29,7 29	36,7 35,5
24	3,2 9	4,8 10,3	6,4 11,5	8 12,7	9,6 13,8	11,1 14,8	12,7 15,8	14,3 16,8	15,8 17,8	19,7 20,3	23,5 23,5	27,2 26,8	31 30,2	38,4 37
25	3,4 9,5	5 10,9	6,7 12,1	8,3 13,3	10 14,5	11,6 15,6	13,2 16,6	14,9 17,7	16,5 18,7	20,5 21,3	24,5 24,5	28,4 27,9	32,3 31,5	40 38,6
30	4 10,9	6 13,8	8 15,3	10 16,7	12 18,1	13,9 19,4	15,9 20,7	17,8 22	19,8 23,3	24,6 26,5	29,4 29,6	34,2 33,7	38,9 37,8	48,2 46,3
35	4,7 12,1	7 17,2	9,4 18,9	11,7 19,9	14 21,7	16,3 23,5	18,6 25,1	20,8 26,6	23,1 28,1	28,8 31,5	34,4 34,9	39,9 39,4	45,5 44,3	56,4 54,1
40	5,4 13,4	8 20,9	10,7 22,7	13,3 22,8	16 24,4	18,6 26,5	21,2 28,5	23,8 30,4	26,4 32,1	32,9 36,3	39,4 40,3	45,7 45,2	52,1 50,8	64,6 61,9

**Tabela 8.17: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,10$ , material S 460**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1 1,6	1,5 1,9	2 2,2	2,5 2,5	2,9 2,8	3,4 3,1	3,9 3,4	4,4 3,8	4,8 4,2	6 5,1	7,1 6,1	8,2 7	9,3 8	
9	1,1 1,8	1,7 2,2	2,2 2,5	2,8 2,9	3,3 3,2	3,8 3,5	4,4 3,9	4,9 4,2	5,4 4,7	6,7 5,7	8 6,8	9,2 7,9	10,5 8,9	12,9 11,1
10	1,3 2	1,9 2,4	2,5 2,8	3,1 3,2	3,7 3,6	4,3 4	4,8 4,3	5,4 4,7	6 5,2	7,5 6,3	8,9 7,5	10,3 8,7	11,7 9,9	14,4 12,3
11	1,4 2,2	2,1 2,7	2,7 3,1	3,4 3,6	4 4	4,7 4,4	5,3 4,8	6 5,2	6,6 5,7	8,2 7	9,8 8,3	11,3 9,5	12,8 10,8	15,8 13,4
12	1,5 2,4	2,2 3	3 3,5	3,7 3,9	4,4 4,4	5,1 4,8	5,8 5,3	6,5 5,8	7,2 6,2	8,9 7,6	10,7 9	12,4 10,4	14 11,8	17,3 14,6
13	1,6 2,7	2,4 3,3	3,2 3,8	4 4,3	4,8 4,8	5,5 5,3	6,3 5,8	7,1 6,3	7,8 6,8	9,7 8,2	11,6 9,7	13,4 11,2	15,2 12,8	18,8 15,8
14	1,8 2,9	2,6 3,5	3,4 4,1	4,3 4,7	5,1 5,2	5,9 5,7	6,8 6,3	7,6 6,8	8,4 7,4	10,4 8,8	12,5 10,5	14,4 12,1	16,4 13,7	20,3 17
15	1,9 3,1	2,8 3,8	3,7 4,4	4,6 5	5,5 5,6	6,4 6,2	7,3 6,8	8,1 7,3	9 7,9	11,2 9,5	13,3 11,2	15,5 12,9	17,6 14,7	21,7 18,2
16	2 3,3	3 4,1	3,9 4,8	4,9 5,4	5,8 6	6,8 6,7	7,7 7,3	8,7 7,9	9,6 8,5	11,9 10,1	14,2 11,9	16,5 13,8	18,8 15,7	23,2 19,4
17	2,1 3,6	3,1 4,4	4,2 5,1	5,2 5,8	6,2 6,5	7,2 7,1	8,2 7,8	9,2 8,4	10,2 9,1	12,7 10,8	15,1 12,7	17,6 14,6	20 16,6	24,7 20,6
18	2,2 3,8	3,3 4,7	4,4 5,4	5,5 6,2	6,6 6,9	7,6 7,6	8,7 8,3	9,8 9	10,8 9,7	13,4 11,5	16 13,4	18,6 15,5	21,2 17,6	26,2 21,8
19	2,4 4	3,5 4,9	4,7 5,8	5,8 6,5	6,9 7,3	8,1 8,1	9,2 8,8	10,3 9,5	11,4 10,3	14,2 12,2	16,9 14,2	19,7 16,4	22,4 18,6	27,7 23
20	2,5 4,3	3,7 5,2	4,9 6,1	6,1 6,9	7,3 7,7	8,5 8,5	9,7 9,3	10,8 10,1	12 10,9	14,9 12,8	17,8 14,9	20,7 17,2	23,5 19,5	29,1 24,2
21	2,6 4,5	3,9 5,5	5,1 6,4	6,4 7,3	7,7 8,2	8,9 9	10,2 9,8	11,4 10,7	12,6 11,5	15,7 13,5	18,7 15,7	21,8 18,1	24,7 20,5	30,6 25,4
22	2,7 4,8	4,1 5,8	5,4 6,8	6,7 7,7	8 8,6	9,3 9,5	10,6 10,3	11,9 11,2	13,2 12,1	16,5 14,2	19,6 16,4	22,8 18,9	25,9 21,5	32,1 26,6
23	2,8 5	4,2 6,1	5,6 7,1	7 8,1	8,4 9	9,8 10	11,1 10,9	12,5 11,8	13,8 12,7	17,2 14,9	20,5 17,1	23,9 19,8	27,1 22,5	33,6 27,8
24	3 5,3	4,4 6,4	5,9 7,5	7,3 8,5	8,7 9,5	10,2 10,4	11,6 11,4	13 12,3	14,4 13,3	18 15,6	21,4 17,9	24,9 20,7	28,3 23,4	35,1 29
25	3,1 5,5	4,6 6,6	6,1 7,7	7,6 8,9	9,1 9,9	10,6 10,9	12,1 11,9	13,6 12,9	15 13,9	18,7 16,3	22,4 18,7	26 21,5	29,5 24,4	36,6 30,2
30	3,7 6,7	5,5 8,3	7,3 9	9,1 10,4	10,9 11,8	12,7 13,1	14,5 14,3	16,3 15,5	18,1 16,7	22,5 19,7	26,9 22,6	31,2 25,8	35,5 29,3	44,1 36,3
35	4,3 7,3	6,4 10	8,5 10,4	10,7 11,8	12,8 13,4	14,9 15	16,9 16,6	19 18	21,1 19,5	26,3 23	31,4 26,5	36,5 30,2	41,6 34,2	51,6 42,3
40	4,9 8	7,3 11,8	9,8 12,4	12,2 13,3	14,6 15,1	17 16,9	19,4 18,7	21,8 20,5	24,1 22,2	30,1 26,4	36 30,4	41,8 34,5	47,6 39,1	59,1 48,4

**Tabela 8.18: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,15$ , material S 460**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1 1,9	1,5 2,2	2 2,5	2,5 2,8	2,9 3,1	3,4 3,4	3,9 3,7	4,4 4,1	4,8 4,4	6 5,4	7,1 6,4	8,2 7,4	9,3 8,4	
9	1,1 2,1	1,7 2,5	2,2 2,9	2,8 3,2	3,3 3,5	3,8 3,8	4,4 4,2	4,9 4,5	5,4 5	6,7 6,1	8 7,2	9,2 8,3	10,5 9,4	12,9 11,7
10	1,3 2,4	1,9 2,8	2,5 3,2	3,1 3,6	3,7 4	4,3 4,3	4,8 4,7	5,4 5,1	6 5,5	7,5 6,7	8,9 8	10,3 9,2	11,7 10,4	14,4 12,9
11	1,4 2,6	2,1 3,2	2,7 3,6	3,4 4	4 4,4	4,7 4,9	5,3 5,3	6 5,6	6,6 6,1	8,2 7,4	9,8 8,8	11,3 10,1	12,8 11,4	15,8 14,1
12	1,5 2,9	2,2 3,5	3 4	3,7 4,4	4,4 4,9	5,1 5,3	5,8 5,8	6,5 6,2	7,2 6,7	8,9 8,1	10,7 9,5	12,4 11	14 12,5	17,3 15,4
13	1,6 3,2	2,4 3,8	3,2 4,4	4 4,9	4,8 5,3	5,5 5,8	6,3 6,3	7,1 6,8	7,8 7,3	9,7 8,7	11,6 10,3	13,4 11,9	15,2 13,5	18,8 16,7
14	1,8 3,5	2,6 4,1	3,4 4,7	4,3 5,3	5,1 5,8	5,9 6,3	6,8 6,9	7,6 7,4	8,4 7,9	10,4 9,4	12,5 11,1	14,4 12,8	16,4 14,5	20,3 17,9
15	1,9 3,8	2,8 4,5	3,7 5,1	4,6 5,7	5,5 6,3	6,4 6,9	7,3 7,4	8,1 8	9 8,5	11,2 10,1	13,3 11,9	15,5 13,7	17,6 15,5	21,7 19,2
16	2 4	3 4,8	3,9 5,5	4,9 6,2	5,8 6,8	6,8 7,4	7,7 8	8,7 8,6	9,6 9,2	11,9 10,8	14,2 12,7	16,5 14,6	18,8 16,5	23,2 20,4
17	2,1 4,3	3,1 5,1	4,2 5,9	5,2 6,6	6,2 7,3	7,2 7,9	8,2 8,6	9,2 9,2	10,2 9,8	12,7 11,5	15,1 13,5	17,6 15,5	20 17,6	24,7 21,7
18	2,2 4,6	3,3 5,5	4,4 6,3	5,5 7	6,6 7,8	7,6 8,5	8,7 9,1	9,8 9,8	10,8 10,5	13,4 12,2	16 14,3	18,6 16,4	21,2 18,6	26,2 23
19	2,4 4,9	3,5 5,8	4,7 6,7	5,8 7,5	6,9 8,3	8,1 9	9,2 9,7	10,3 10,4	11,4 11,2	14,2 13	16,9 15,1	19,7 17,4	22,4 19,6	27,7 24,2
20	2,5 5,2	3,7 6,2	4,9 7,1	6,1 7,9	7,3 8,8	8,5 9,5	9,7 10,3	10,8 11,1	12 11,8	14,9 13,8	17,8 15,9	20,7 18,3	23,5 20,7	29,1 25,5
21	2,6 5,5	3,9 6,6	5,1 7,5	6,4 8,4	7,7 9,3	8,9 10,1	10,2 10,9	11,4 11,7	12,6 12,5	15,7 14,5	18,7 16,7	21,8 19,2	24,7 21,7	30,6 26,8
22	2,7 5,8	4,1 6,9	5,4 7,9	6,7 8,9	8 9,8	9,3 10,6	10,6 11,5	11,9 12,4	13,2 13,2	16,5 15,3	19,6 17,5	22,8 20,1	25,9 22,7	32,1 28
23	2,8 6,1	4,2 7,2	5,6 8,3	7 9,3	8,4 10,3	9,8 11,2	11,1 12,1	12,5 13	13,8 13,9	17,2 16,1	20,5 18,3	23,9 21	27,1 23,8	33,6 29,3
24	3 6,4	4,4 7,7	5,9 8,8	7,3 9,8	8,7 10,8	10,2 11,8	11,6 12,7	13 13,6	14,4 14,6	18 16,9	21,4 19,1	24,9 21,9	28,3 24,8	35,1 30,6
25	3,1 6,8	4,6 8	6,1 9,2	7,6 10,3	9,1 11,3	10,6 12,3	12,1 13,3	13,6 14,3	15 15,3	18,7 17,6	22,4 19,9	26 22,8	29,5 25,8	36,6 31,9
30	3,7 8,1	5,5 10	7,3 10,9	9,1 12,3	10,9 13,8	12,7 15,1	14,5 16,3	16,3 17,5	18,1 18,6	22,5 21,4	26,9 24,2	31,2 27,5	35,5 31	44,1 38,2
35	4,3 8,8	6,4 12,2	8,5 12,8	10,7 14,1	12,8 15,7	14,9 17,3	16,9 18,9	19 20,3	21,1 21,7	26,3 25,1	31,4 28,5	36,5 32,1	41,6 36,3	51,6 44,6
40	4,9 9,7	7,3 14,5	9,8 15,5	12,2 15,8	14,6 17,5	17 19,4	19,4 21,3	21,8 23	24,1 24,7	30,1 28,8	36 32,8	41,8 36,7	47,6 41,5	59,1 51,1

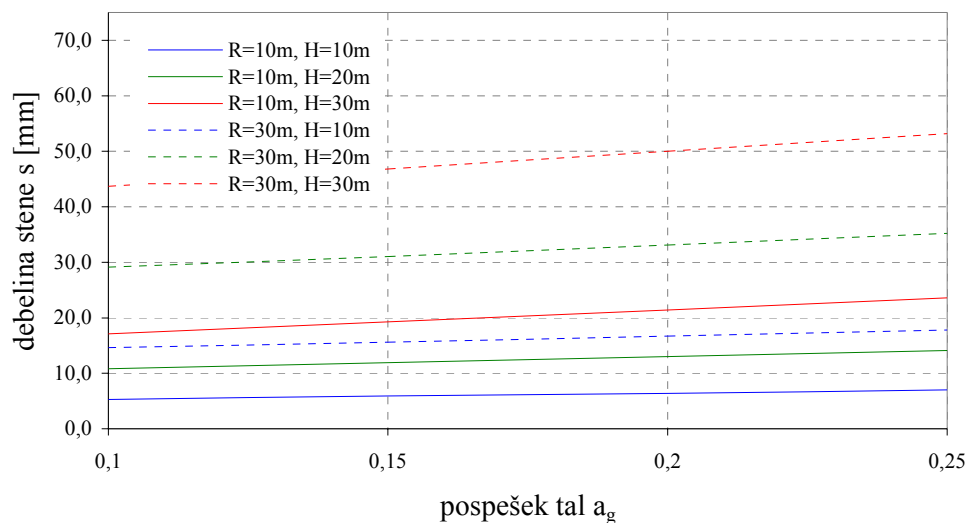
**Tabela 8.19: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,20$ , material S 460**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1 2,1	1,5 2,5	2 2,8	2,5 3	2,9 3,3	3,4 3,6	3,9 3,9	4,4 4,3	4,8 4,7	6 5,8	7,1 6,8	8,2 7,8	9,3 8,9	
9	1,1 2,4	1,7 2,8	2,2 3,2	2,8 3,5	3,3 3,8	3,8 4,1	4,4 4,5	4,9 4,9	5,4 5,3	6,7 6,5	8 7,6	9,2 8,8	10,5 9,9	12,9 12,2
10	1,3 2,8	1,9 3,2	2,5 3,6	3,1 4	3,7 4,3	4,3 4,7	4,8 5	5,4 5,4	6 5,9	7,5 7,2	8,9 8,4	10,3 9,7	11,7 11	14,4 13,5
11	1,4 3,1	2,1 3,5	2,7 4	3,4 4,4	4 4,8	4,7 5,2	5,3 5,6	6 6	6,6 6,5	8,2 7,9	9,8 9,3	11,3 10,7	12,8 12,1	15,8 14,9
12	1,5 3,4	2,2 3,9	3 4,4	3,7 4,9	4,4 5,3	5,1 5,8	5,8 6,2	6,5 6,6	7,2 7,1	8,9 8,6	10,7 10,1	12,4 11,6	14 13,1	17,3 16,2
13	1,6 3,8	2,4 4,3	3,2 4,9	4 5,4	4,8 5,9	5,5 6,3	6,3 6,8	7,1 7,3	7,8 7,8	9,7 9,3	11,6 10,9	13,4 12,6	15,2 14,2	18,8 17,5
14	1,8 4,1	2,6 4,7	3,4 5,3	4,3 5,9	5,1 6,4	5,9 6,9	6,8 7,4	7,6 7,9	8,4 8,4	10,4 10	12,5 11,8	14,4 13,5	16,4 15,3	20,3 18,8
15	1,9 4,4	2,8 5,1	3,7 5,7	4,6 6,3	5,5 6,9	6,4 7,5	7,3 8	8,1 8,6	9 9,1	11,2 10,7	13,3 12,6	15,5 14,5	17,6 16,4	21,7 20,2
16	2 4,8	3 5,4	3,9 6,2	4,9 6,8	5,8 7,5	6,8 8,1	7,7 8,7	8,7 9,3	9,6 9,8	11,9 11,5	14,2 13,5	16,5 15,5	18,8 17,5	23,2 21,5
17	2,1 5,1	3,1 5,8	4,2 6,6	5,2 7,3	6,2 8	7,2 8,7	8,2 9,3	9,2 9,9	10,2 10,6	12,7 12,2	15,1 14,3	17,6 16,4	20 18,5	24,7 22,8
18	2,2 5,4	3,3 6,2	4,4 7,1	5,5 7,8	6,6 8,6	7,6 9,3	8,7 9,9	9,8 10,6	10,8 11,3	13,4 13	16 15,1	18,6 17,4	21,2 19,6	26,2 24,1
19	2,4 5,8	3,5 6,7	4,7 7,5	5,8 8,4	6,9 9,1	8,1 9,9	9,2 10,6	10,3 11,3	11,4 12	14,2 13,8	16,9 16	19,7 18,4	22,4 20,7	27,7 25,5
20	2,5 6,1	3,7 7,1	4,9 8	6,1 8,9	7,3 9,7	8,5 10,5	9,7 11,2	10,8 12	12 12,7	14,9 14,6	17,8 16,9	20,7 19,3	23,5 21,8	29,1 26,8
21	2,6 6,4	3,9 7,5	5,1 8,5	6,4 9,4	7,7 10,3	8,9 11,1	10,2 11,9	11,4 12,7	12,6 13,5	15,7 15,5	18,7 17,7	21,8 20,3	24,7 22,9	30,6 28,2
22	2,7 6,8	4,1 7,9	5,4 9	6,7 9,9	8 10,8	9,3 11,7	10,6 12,6	11,9 13,4	13,2 14,2	16,5 16,3	19,6 18,6	22,8 21,3	25,9 24	32,1 29,5
23	2,8 7,1	4,2 8,4	5,6 9,5	7 10,5	8,4 11,4	9,8 12,3	11,1 13,2	12,5 14,1	13,8 15	17,2 17,2	20,5 19,4	23,9 22,2	27,1 25,1	33,6 30,8
24	3 7,5	4,4 8,8	5,9 9,9	7,3 11	8,7 12	10,2 13	11,6 13,9	13 14,8	14,4 15,8	18 18	21,4 20,3	24,9 23,2	28,3 26,2	35,1 32,2
25	3,1 7,9	4,6 9,3	6,1 10,4	7,6 11,6	9,1 12,6	10,6 13,6	12,1 14,6	13,6 15,6	15 16,5	18,7 18,9	22,4 21,1	26 24,2	29,5 27,3	36,6 33,5
30	3,7 9,3	5,5 11,7	7,3 12,9	9,1 14,4	10,9 15,7	12,7 16,9	14,5 18,1	16,3 19,3	18,1 20,5	22,5 23,1	26,9 25,8	31,2 29,1	35,5 32,8	44,1 40,2
35	4,3 10,2	6,4 14,3	8,5 15,2	10,7 16,3	12,8 18,3	14,9 19,7	16,9 21,2	19 22,6	21,1 24	26,3 27,2	31,4 30,4	36,5 34,1	41,6 38,3	51,6 47
40	4,9 11,3	7,3 17,2	9,8 18,9	12,2 18,5	14,6 20,1	17 22	19,4 23,9	21,8 25,7	24,1 27,3	30,1 31,3	36 35,1	41,8 39	47,6 43,9	59,1 53,8

**Tabela 8.20: Debelina stene  $s$ , pospešek tal  $a_g = 0,25$ , material  $S 460$**

H \ R	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50
8	1 2,4	1,5 2,7	2 3	2,5 3,3	2,9 3,6	3,4 3,8	3,9 4,2	4,4 4,6	4,8 5	6 6,1	7,1 7,2	8,2 8,2	9,3 9,3	
9	1,1 2,8	1,7 3,1	2,2 3,5	2,8 3,8	3,3 4,1	3,8 4,4	4,4 4,7	4,9 5,2	5,4 5,6	6,7 6,8	8 8	9,2 9,2	10,5 10,4	12,9 12,8
10	1,3 3,1	1,9 3,5	2,5 3,9	3,1 4,3	3,7 4,6	4,3 5	4,8 5,3	5,4 5,7	6 6,3	7,5 7,6	8,9 8,9	10,3 10,2	11,7 11,6	14,4 14,2
11	1,4 3,5	2,1 3,9	2,7 4,4	3,4 4,8	4 5,2	4,7 5,6	5,3 6	6 6,4	6,6 6,9	8,2 8,3	9,8 9,8	11,3 11,2	12,8 12,7	15,8 15,6
12	1,5 3,9	2,2 4,3	3 4,9	3,7 5,3	4,4 5,8	5,1 6,2	5,8 6,6	6,5 7	7,2 7,5	8,9 9,1	10,7 10,7	12,4 12,2	14 13,8	17,3 17
13	1,6 4,3	2,4 4,7	3,2 5,3	4 5,9	4,8 6,3	5,5 6,8	6,3 7,3	7,1 7,7	7,8 8,2	9,7 9,8	11,6 11,5	13,4 13,2	15,2 14,9	18,8 18,4
14	1,8 4,6	2,6 5,2	3,4 5,8	4,3 6,4	5,1 6,9	5,9 7,4	6,8 7,9	7,6 8,4	8,4 8,9	10,4 10,6	12,5 12,4	14,4 14,3	16,4 16,1	20,3 19,7
15	1,9 5	2,8 5,6	3,7 6,3	4,6 6,9	5,5 7,5	6,4 8,1	7,3 8,6	8,1 9,1	9 9,7	11,2 11,4	13,3 13,3	15,5 15,3	17,6 17,2	21,7 21,1
16	2 5,4	3 6,1	3,9 6,8	4,9 7,5	5,8 8,1	6,8 8,7	7,7 9,3	8,7 9,9	9,6 10,4	11,9 12,1	14,2 14,2	16,5 16,3	18,8 18,4	23,2 22,5
17	2,1 5,8	3,1 6,5	4,2 7,3	5,2 8	6,2 8,7	7,2 9,4	8,2 10	9,2 10,6	10,2 11,2	12,7 12,9	15,1 15,1	17,6 17,3	20 19,5	24,7 23,9
18	2,2 6,1	3,3 7	4,4 7,8	5,5 8,6	6,6 9,3	7,6 10	8,7 10,7	9,8 11,4	10,8 12	13,4 13,7	16 16	18,6 18,3	21,2 20,7	26,2 25,3
19	2,4 6,5	3,5 7,5	4,7 8,3	5,8 9,2	6,9 9,9	8,1 10,7	9,2 11,4	10,3 12,1	11,4 12,8	14,2 14,6	16,9 16,9	19,7 19,4	22,4 21,8	27,7 26,7
20	2,5 6,9	3,7 7,9	4,9 8,9	6,1 9,7	7,3 10,6	8,5 11,4	9,7 12,1	10,8 12,9	12 13,6	14,9 15,5	17,8 17,8	20,7 20,4	23,5 23	29,1 28,2
21	2,6 7,3	3,9 8,4	5,1 9,4	6,4 10,3	7,7 11,2	8,9 12	10,2 12,8	11,4 13,6	12,6 14,4	15,7 16,4	18,7 18,7	21,8 21,4	24,7 24,1	30,6 29,6
22	2,7 7,7	4,1 8,9	5,4 9,9	6,7 10,9	8 11,8	9,3 12,7	10,6 13,6	11,9 14,4	13,2 15,2	16,5 17,3	19,6 19,6	22,8 22,5	25,9 25,3	32,1 31
23	2,8 8,1	4,2 9,4	5,6 10,5	7 11,5	8,4 12,5	9,8 13,4	11,1 14,3	12,5 15,2	13,8 16,1	17,2 18,2	20,5 20,5	23,9 23,5	27,1 26,4	33,6 32,4
24	3 8,6	4,4 9,9	5,9 11,1	7,3 12,1	8,7 13,1	10,2 14,1	11,6 15,1	13 16	14,4 16,9	18 19,1	21,4 21,5	24,9 24,5	28,3 27,6	35,1 33,8
25	3,1 9,1	4,6 10,4	6,1 11,6	7,6 12,8	9,1 13,8	10,6 14,8	12,1 15,8	13,6 16,8	15 17,7	18,7 20,1	22,4 22,4	26 25,5	29,5 28,7	36,6 35,2
30	3,7 10,5	5,5 13,2	7,3 14,7	9,1 16	10,9 17,3	12,7 18,5	14,5 19,7	16,3 20,9	18,1 22,1	22,5 24,9	26,9 27,4	31,2 30,8	35,5 34,5	44,1 42,3
35	4,3 11,5	6,4 16,3	8,5 17,9	10,7 18,7	12,8 20,4	14,9 22,1	16,9 23,6	19 25	21,1 26,3	26,3 29,4	31,4 32,4	36,5 36	41,6 40,4	51,6 49,4
40	4,9 12,8	7,3 19,8	9,8 21,6	12,2 21,3	14,6 22,8	17 24,8	19,4 26,6	21,8 28,4	24,1 30	30,1 33,8	36 37,5	41,8 41,3	47,6 46,3	59,1 56,5

Iz preglednic je razvidno, da je potresna obtežba merodajna za visoke rezervoarje, medtem ko je za široke merodajno trajno projektno stanje, kjer prevladujejo natezne napetosti v plašču. To pa je iz tega razloga, ker so pri majhnih radijih rezervoarjev lahko stene spodnjega ovoja relativno tanke.



Slika 8.1: Debelina stene  $s$  v odvisnosti od pospeška tal  $a_g$  za material S235

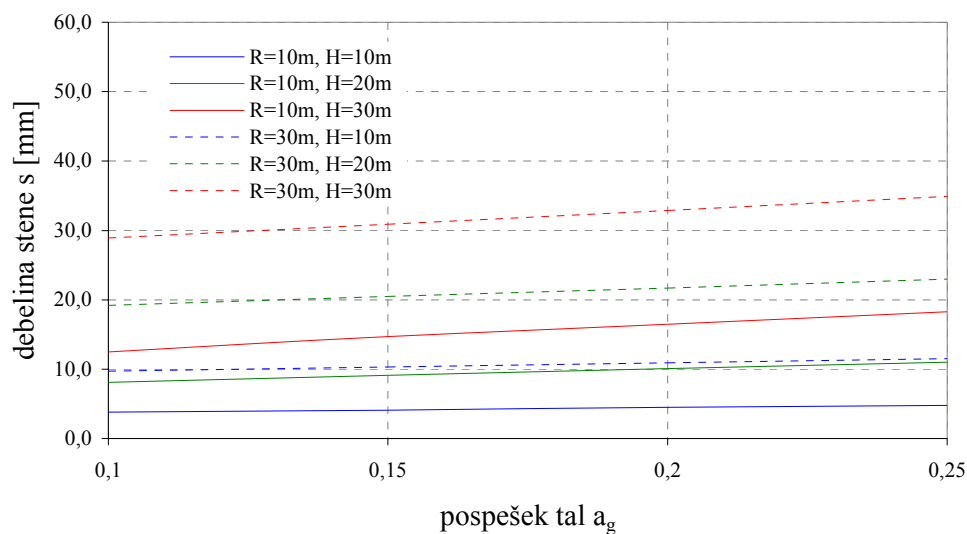


Figure 8.2: Debelina stene  $s$  v odvisnosti od pospeška tal  $a_g$  za material S355

Na slikah 8.1 in 8.2 je prikazan vpliv pospeška tal  $a_g$  na potrebno debelino spodnjega ovoja plašča, ki je linearen. Za različne kvalitete materiala ostanejo razmerja več ali manj enaka, le da so potrebne debeline manjše.