

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE

6. PREDAVANJE



Vodotornjevi i spremnici tekućina

*(funkcija, oblici, gradnja,
seizmički proračun spremnika tekućina)*

VODOTORNJEVI I SPREMNICI TEKUĆINA

SADRŽAJ PREDAVANJA

- Funkcija
 - Spremnici tekućina
 - Vodotornjevi
- Oblici
 - Konstruktivni oblici vodospremnika na vodotornjevima
 - Pravokutni vodospremnik
 - Vodospremnik s ovješnim dnom
 - Intze-ov vodospremnik
 - Barkhausen vodospremnik
 - Klönne-ov vodospremnik
 - Oblici spremnika tekućina
 - Spremnici okruglog tlocrta
 - Spremnici pravokutnog tlocrta
- Gradnja, armiranje i prednapinjanje vodospremnika
- Seizmički proračun spremnika tekućina
 - Seizmička oštećenja
 - Pojednostavljeni proračun
 - Impulsno i konvektivno djelovanje
 - Ukupna posmična sila
 - Moment prevrtanja iznad temelja
 - Moment prevrtanja ispod temelja
 - Momenti prikladni za dimenzioniranje
 - Vertikalni pomak tekućine

SPREMNICI TEKUĆINA

FUNKCIJA

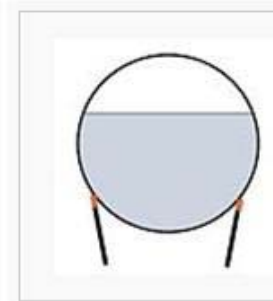
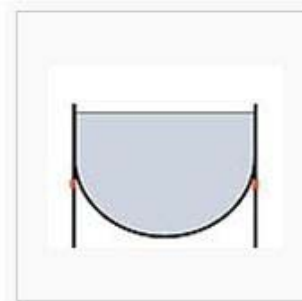
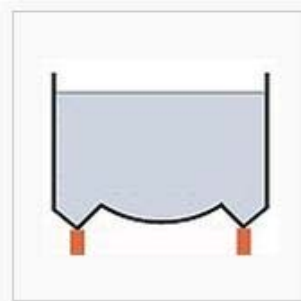
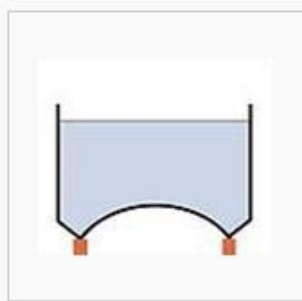
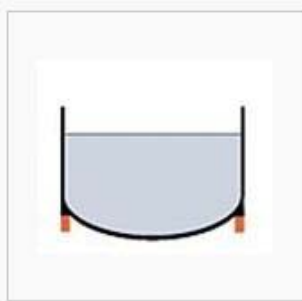
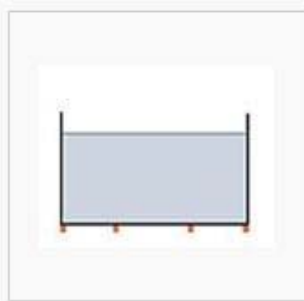
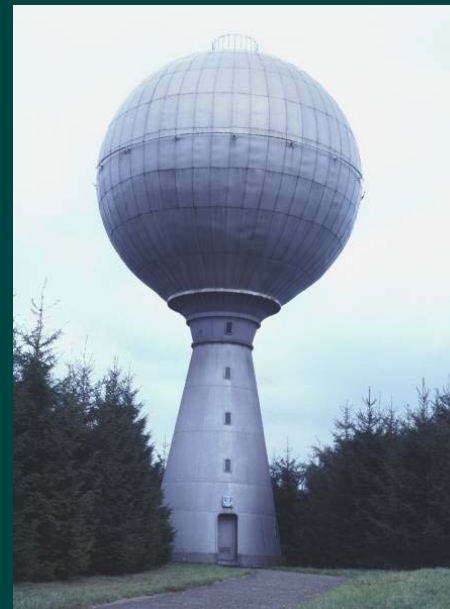
- Armiranobetonski spremnici (rezervoari) se grade za
 - vodovode, kanalizacije i za razne tehničke potrebe u tvornicama.
- Služe za držanje vode i drugih tekućina,
 - npr. vina, špiritusa, naftnih proizvoda, smola, različitih kiselina i plinova.
- Pri izradi spremnika pozornost se obraća na potrebnu nepropusnost koja se postiže
 - Proizvodnjom i ugradbom kompaktnog, gustog i nepropusnog betona
 - (dodavanjem aditiva betonu poboljšavaju se svojstva)
 - Ispravno odabranom, dimenzioniranom i temeljenom konstrukcijom
 - Kod spremnika agresivnih tekućina unutrašnjom oblogom od keramičkih pločica, stakla ili prirodnog kamena;
 - Nepropusnost kroz spojnicu se osigurava
 - umetanjem bakrenog lima i mase za zalijevanje, ili
 - još bolje pomoću rebraste gumene trake i kita za popunjene reške.
 - Reške se zalijevaju veznim sredstvom otpornim prema tekućini koja je u spremniku.



VODOTORNJEVI

FUNKCIJA

- Vodotoranj je konstrukcija za skladištenje vode
 - velike varijacije oblika nosive konstrukcije i spremnika
 - betonski i čelični



VODOTORNJEVI

FUNKCIJA

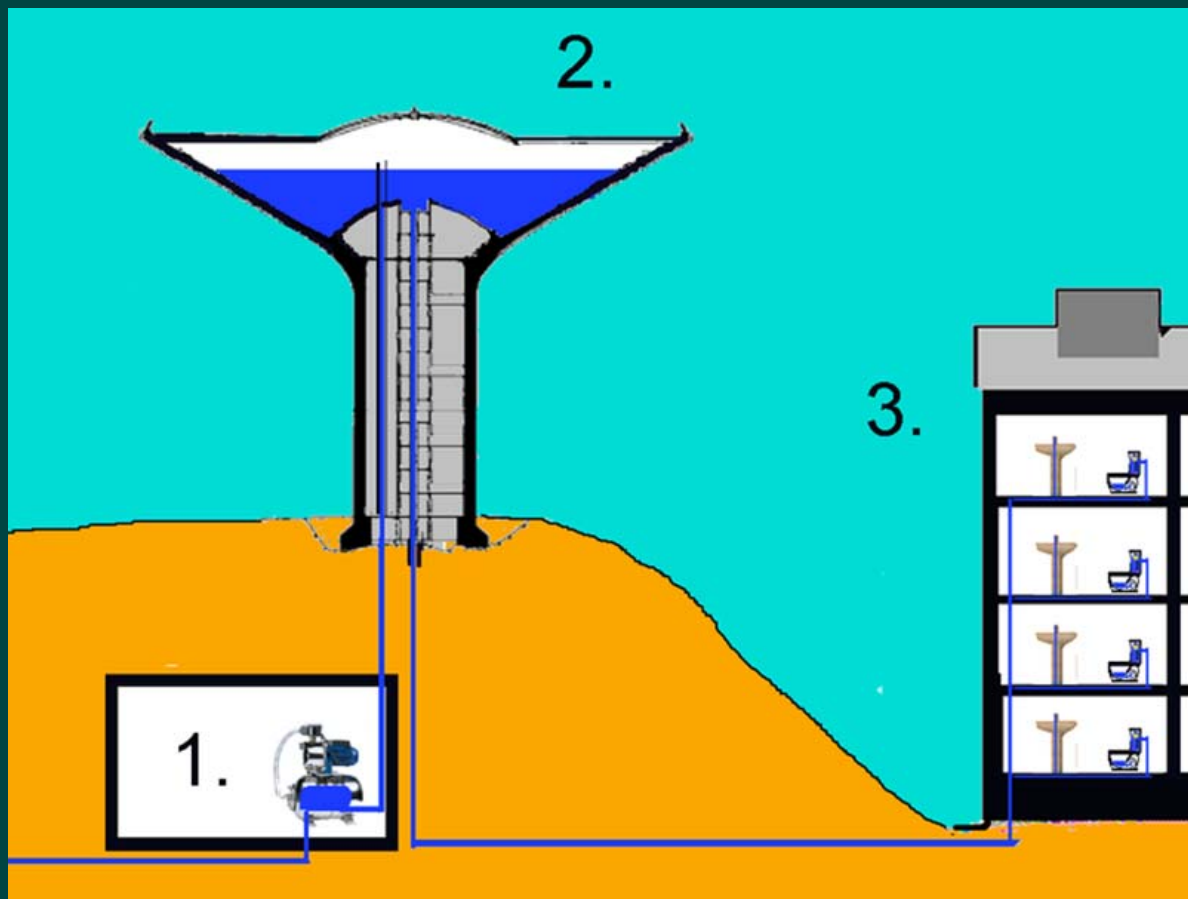
□ Načelo funkcioniranja vodotornja:

- Pumpom (1.) se voda dovodi do vodotornja (2.)
- Iz vodotornja (2.) se djelovanjem gravitacije voda dovodi do konačnog potrošača (3.)

- *Kod vodovodnih sustava sa vodotornjevima, pumpne stanice služe samo za punjenje vodotornjeva vodom*

- *Vodotornjevi se konstantno pune kako bi se održao tlak u cjevovodu*

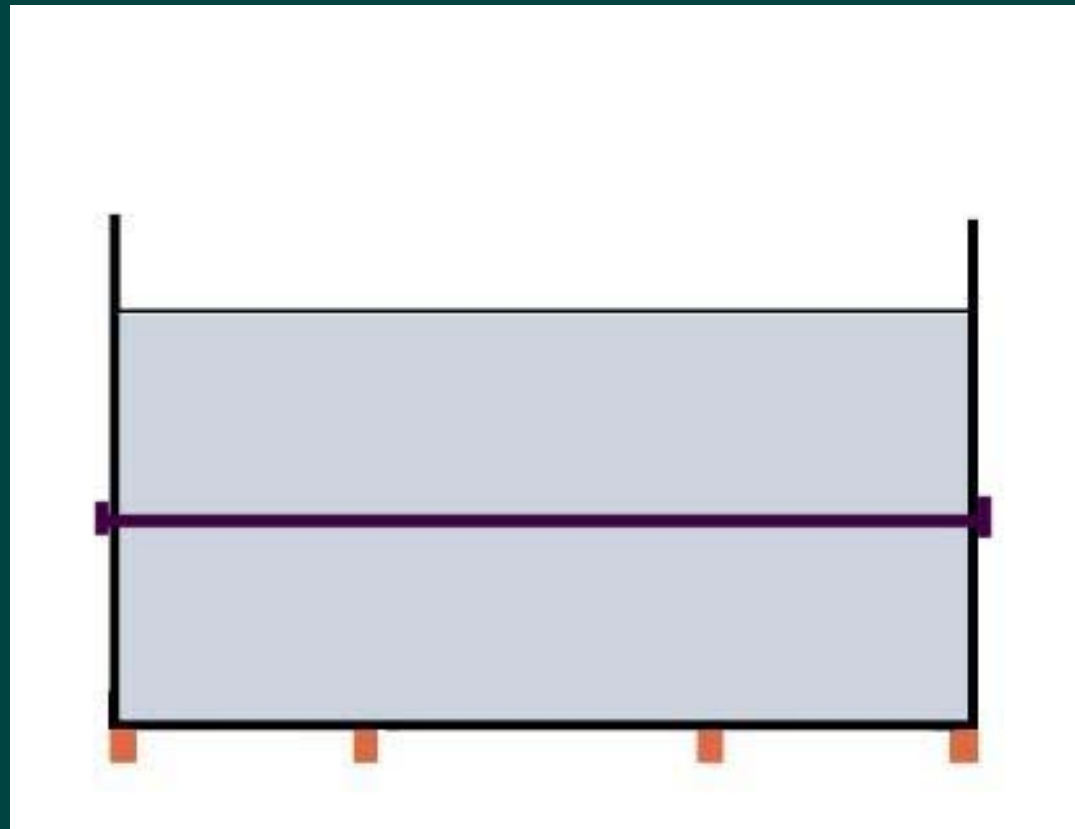
- *Nijedan potrošač ne smije biti na većoj nadmorskoj visini od vodotornja da bi sustav funkcionirao*



VODOTORNJEVI

KONSTRUKTIVNI OBLICI: Pravokutni vodospremnik

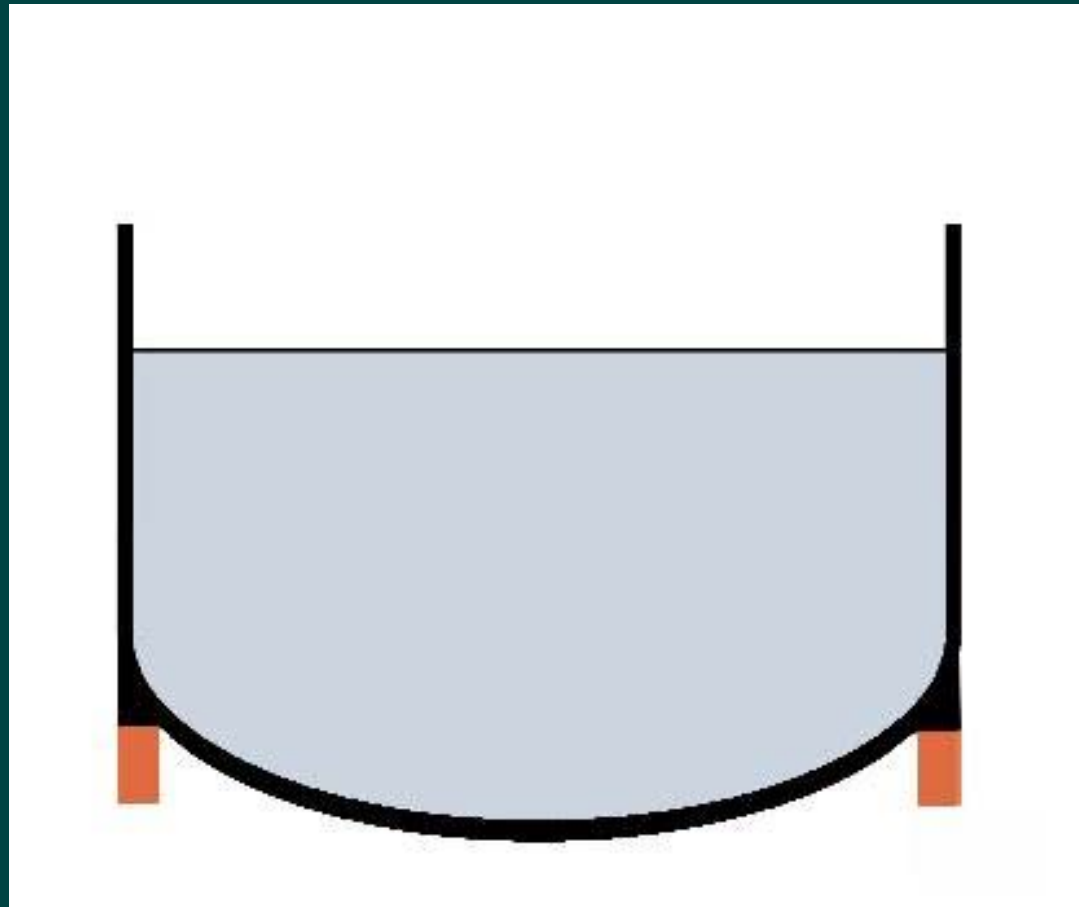
- Prvi vodospremnici izvedeni (1830) imali su pravokutni tlocrt s ravnim dnom
- Dio sila je preuzet vlačnim zategama koje su prolazile kroz vodospremnik i time bile vrlo podložne koroziji
- Zatege su otežavale čišćenje spremnika
- Kasnije se počinju izvoditi spremnici kružnog tlocrtnog oblika



VODOTORNJEVI

KONSTRUKTIVNI OBLICI: Vodospremnik s ovješnim dnom

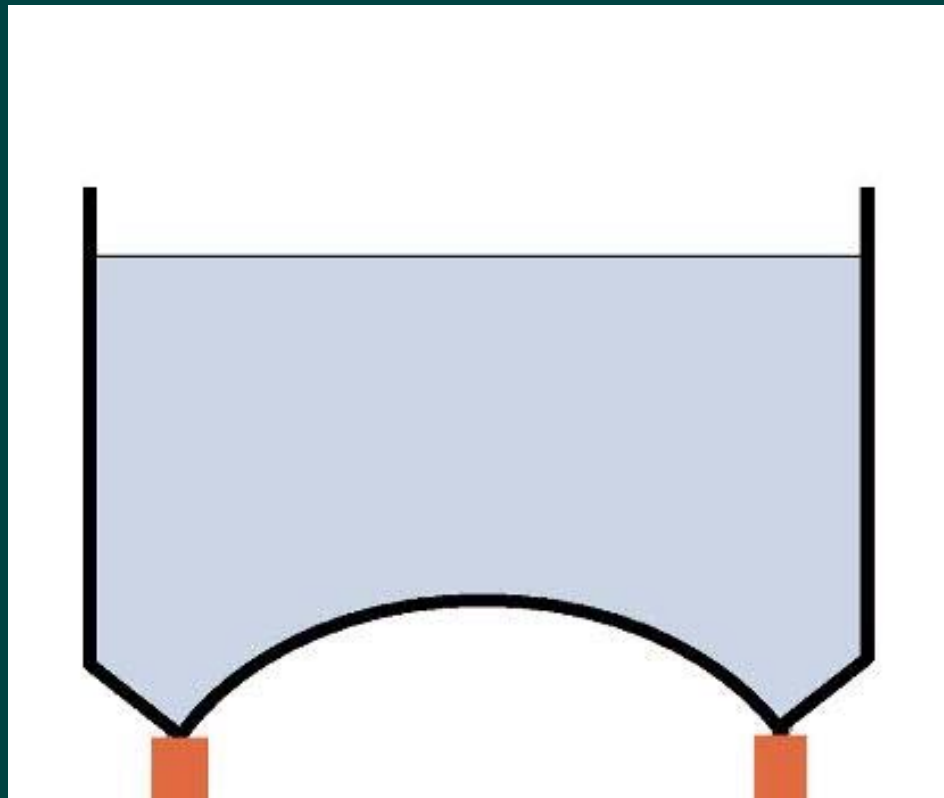
- 1860. pojavljuje se poboljšani oblik konstrukcije vodospremnika u Francuskoj
- Dno spremnika je ljuska koja se spaja na kružne zidove spremnika gdje se formira tlačni prsten
- Deformacije tlačnog prstena su uzrokovala oštećenja spojne konstrukcije



VODOTORNJEVI

KONSTRUKTIVNI OBLICI: Intze-ov vodospremnik

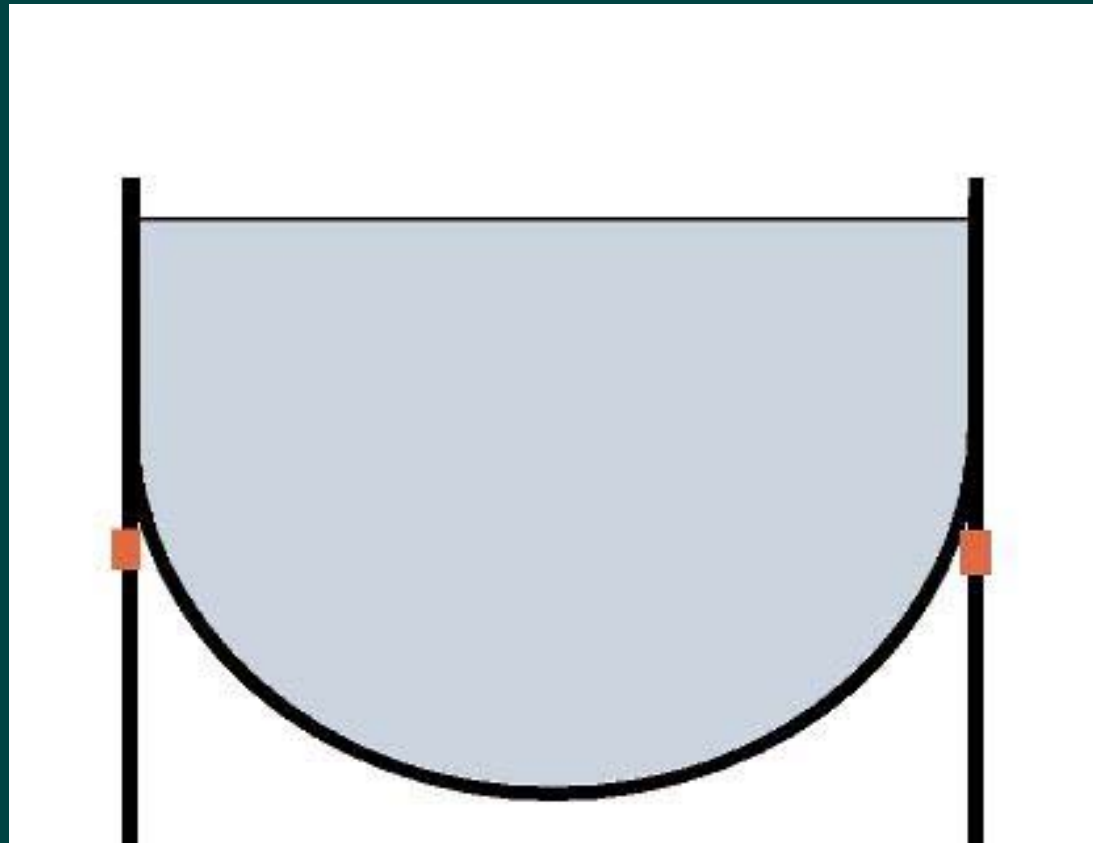
- Otto Intze riješio je 1883. problem deformacija tlačnog prstena pomoću konstrukcije na Intze-ovom načelu.
- Formira se tlačni prsten na dnu vodospremnika
- Dno vodospremnika sastoji se od unutrašnjeg sfernog dna i vanjskog dijela dna u obliku krnjeg stošca
- Pritom su sve horizontalne sile uravnotežene i ne uzrokuju štetna naprezanja



VODOTORNJEVI

KONSTRUKTIVNI OBLICI: Barkhausen vodospremnik

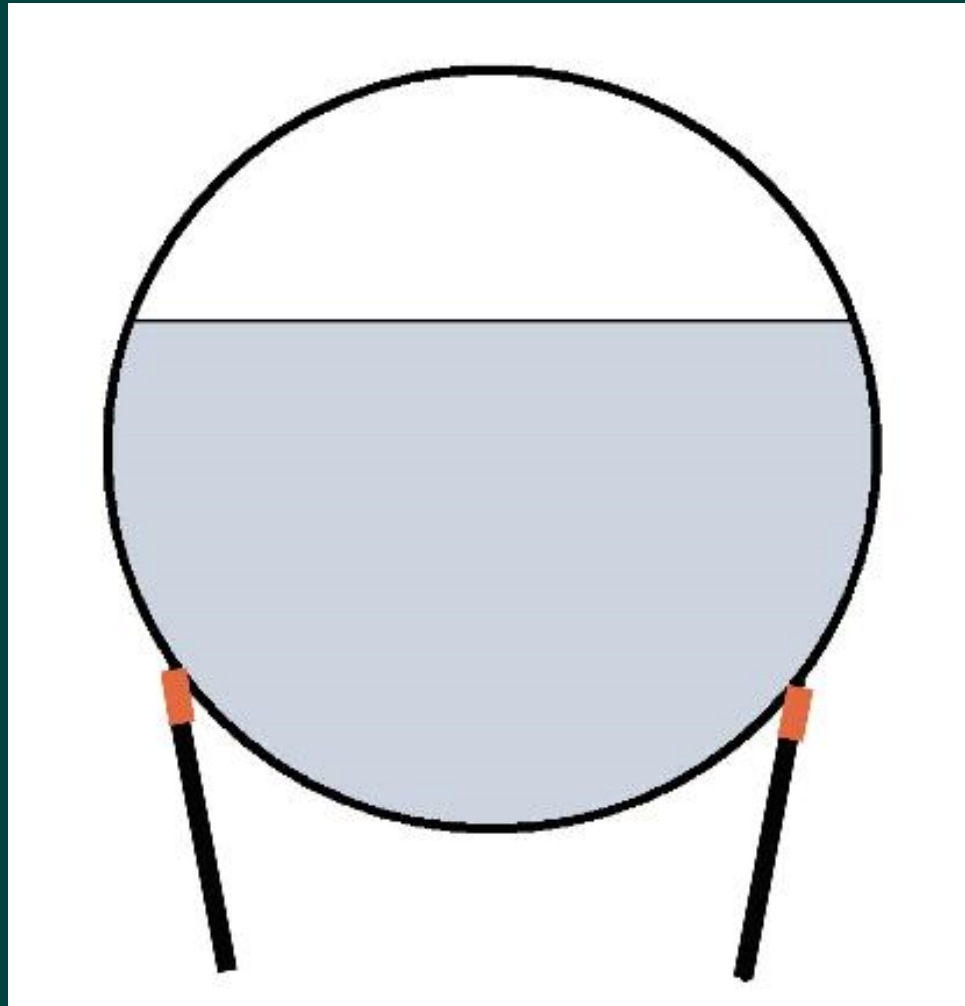
- Vodospremnik sa kuglastim dnom je 1898. godine izumio Georg Barkhausen
- Dno spremnika je polukugla
- Zbog tangencijalnog prijelaza između zidova i dna nije potrebno izvoditi potporni prsten



VODOTORNJEVI

KONSTRUKTIVNI OBLICI: Klönne-ov vodospremnik

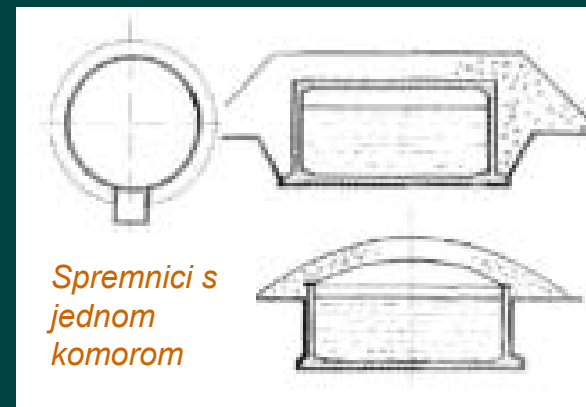
- 1898. godine je August Klönne patentirao kuglasti spremnik sa potpornjima
- Stupovi su tangencijalno spojeni na zidove kugle (kao kod Barkhausen vodospremnika)



OBLICI SPREMNIKA TEKUĆINA

SPREMNICI OKRUGLOG TLOCRTA

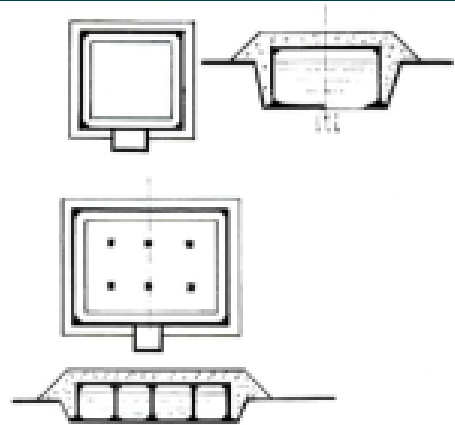
- ❑ Okrugli spremnici mogu imati jednu ili više komora.
- ❑ Zidovi manjih spremnika se često izvode jednake debljine po cijeloj visini, a kod većih se debljina stijenke smanjuje prema gore.
- ❑ Posebnu pozornost valja obratiti na spoj stijenke s dnom i stropom - izvesti vute na tim mjestima propisno ih armirati.
- ❑ Temeljna ploča sa stijenkama spremnika može činiti jednu cjelinu, ili se mogu izvoditi i zasebni temelji ispod stijena i stupova i s podom između temelja.
- ❑ U spremnicima velikog promjera za nošenje stropa se postavljaju stupovi, najčešće po kvadratnoj i pravokutnoj mreži, s razmakom od 3,5 do 4,5 m.
- ❑ Stropovi okruglih spremnika se obično rade kao ravne i rebraste konstrukcije, a vrlo su česte i kupole.
- ❑ Spremnici se proračunavaju na tlak vode iznutra i na tlak zemlje izvana.
- ❑ Pri proračunu se uzima u obzir kruti spoj stijene s temeljem, odnosno s donjom i eventualno gornjom pločom.



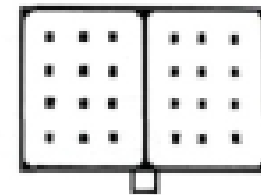
OBLICI SPREMNIKA TEKUĆINA

SPREMNICI PRAVOKUTNOG TLOCRTA

- ❑ Ovi spremnici imaju jednu ili više komora, tako da im volumen može biti izvanredno velik.
- ❑ U velikim spremnicima s velikim brojem komora može biti više zasunskih komora.
- ❑ Visina tih građevina je rijetko kad veća od 6 m.
- ❑ Kutovi spremnika se ojačavaju vutama s dopunskom armaturom za osiguranje vute.
- ❑ Stropovi se najčešće izvode kao ravne ili rebraste ploče.
- ❑ Donja ploča može biti monolitna i kruto spojena sa stijenkama spremnika, ili se izvode temelji ispod zidova i stupova s pločom između njih.



Spremnici s jednom komorom

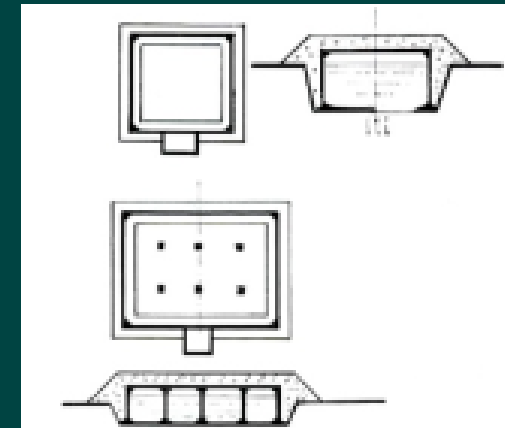


Spremnici s dvije komore

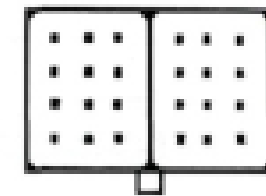
OBLICI SPREMNIKA TEKUĆINA

SPREMNICI PRAVOKUTNOG TLOCRTA

- ❑ Kod velikih spremnika je prisutna opasnost pojave naprezanja zbog skupljanja i mogućnosti nejednolikog slijeganja tla.
- ❑ Naprezanja izazvana skupljanjem se znatno smanjuju ako se spremnik betonira u dijelovima. Ostavljanjem reški i njihovim zatvaranjem nakon 28 dana veći dio skupljanja pojedinačnih dijelova bit će završen prije zatvaranja, pa neće utjecati na pojavu većih naprezanja.
- ❑ Stijenke pravokutnog spremnika su naprezane momentima savijanja, pa su zbog toga redovito deblje nego kod okruglih spremnika.
- ❑ Spojevi ploča moraju biti osigurani za djelovanje pozitivnog i negativnog momenta savijanja.



Spremnici s jednom komorom



Spremnici s dvije komore

GRAĐENJE VODOSPREMNIKA

Primjeri



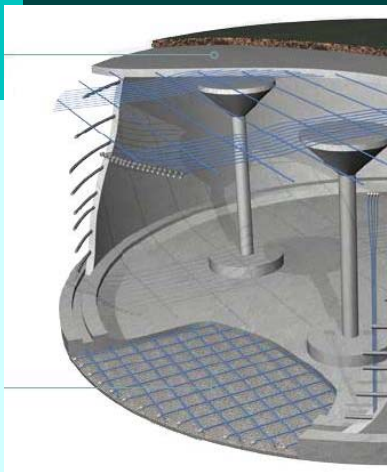
Prednapeta temeljna ploča



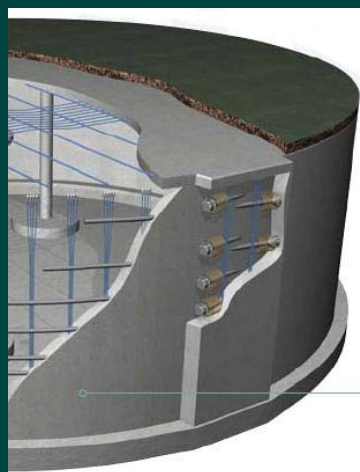
Podupirači za izvedbu krovne ploče



Izvedba prednapete krovne konstrukcije



Položaj natega



*Sidrenje vodoravnih natega u zidovima
Prednapinjanje vodospremnika*



*Gotov vodospremnik
prije ukapanja*

GRAĐENJE VODOSPREMNIKA

Primjeri



Oplata zidova vodospremnika



Izvedba prednapete krovne konstrukcije

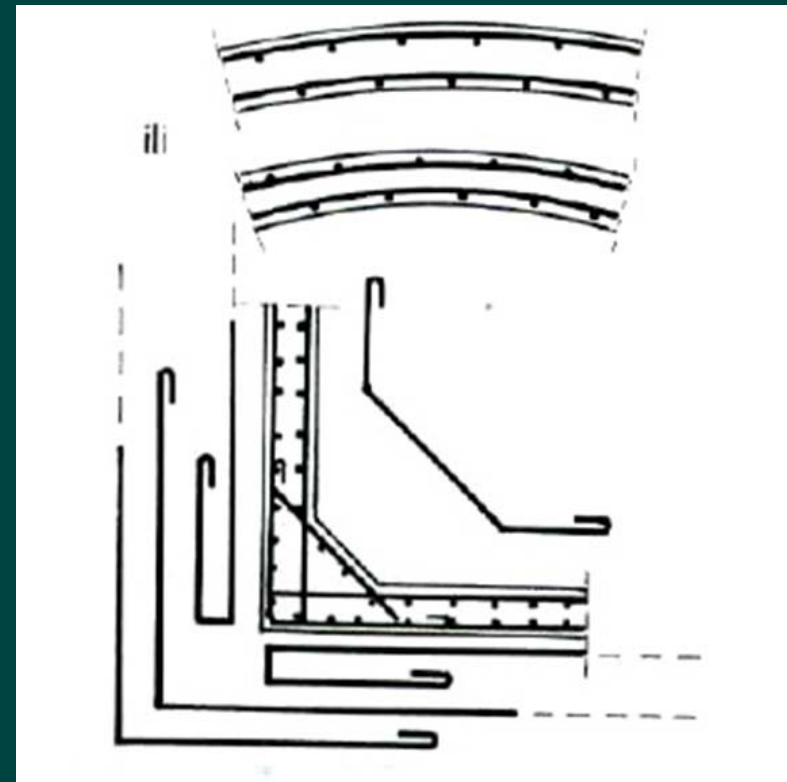
ARMIRANJE VODOSPREMNIKA

Primjeri: okrugli spremnik

- Prstenasta armatura
 - se proračunava za proračunsku prstenastu silu $n\phi$
 - postavlja se u jednom, ali češće u dva sloja

- Vertikalna armatura
 - se proračunava za uzdužnu silu n_x i moment savijanja m_x kao za ekscentrično naprezan element.
 - Na spoju stijenke i dna spremnika vertikalna armatura se postavlja u dva sloja, a izvan djelovanja poremećajnih momenata u jednom ili dva sloja, ovisno o količini prstenaste armature.

- Vertikalna i horizontalna armatura se međusobno povezuju paljenom žicom u krutu mrežu.



Armatura čvora okruglog spremnika

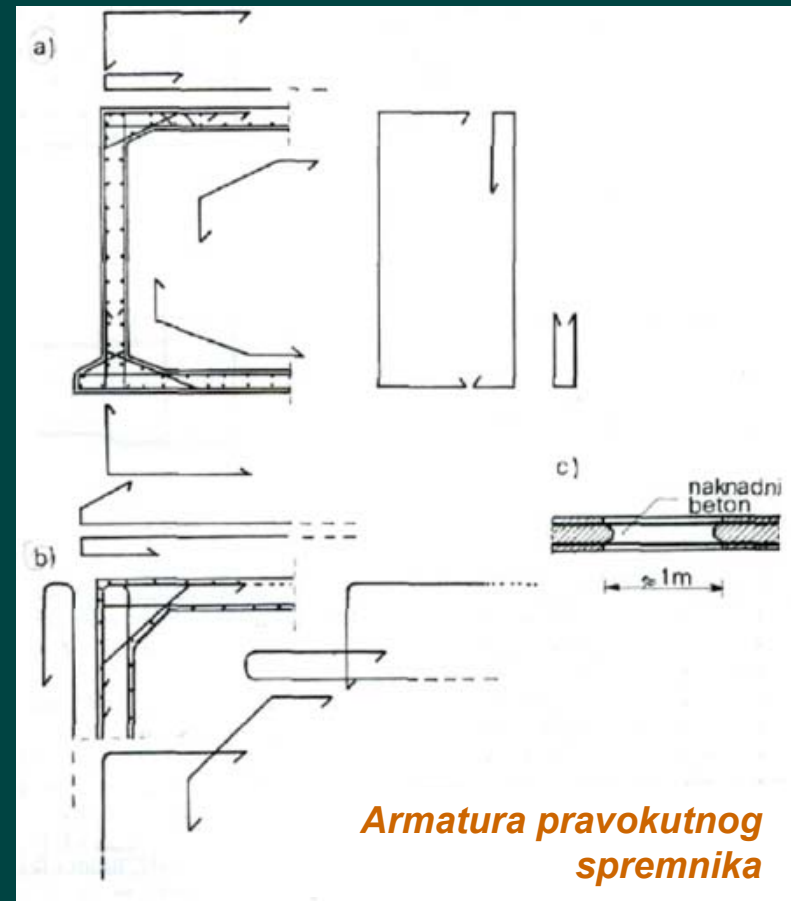
ARMIRANJE VODOSPREMNIKA

Primjeri: pravokutni spremnik

- Armiranje spremnika
 - se provodi prema prethodno proračunatim reznim silama i
 - provedenom dimenzioniranju po načelima koji vrijede za ploče.

- Spojevi ploča
 - moraju biti osigurani za djelovanje pozitivnog i negativnog momenta savijanja.

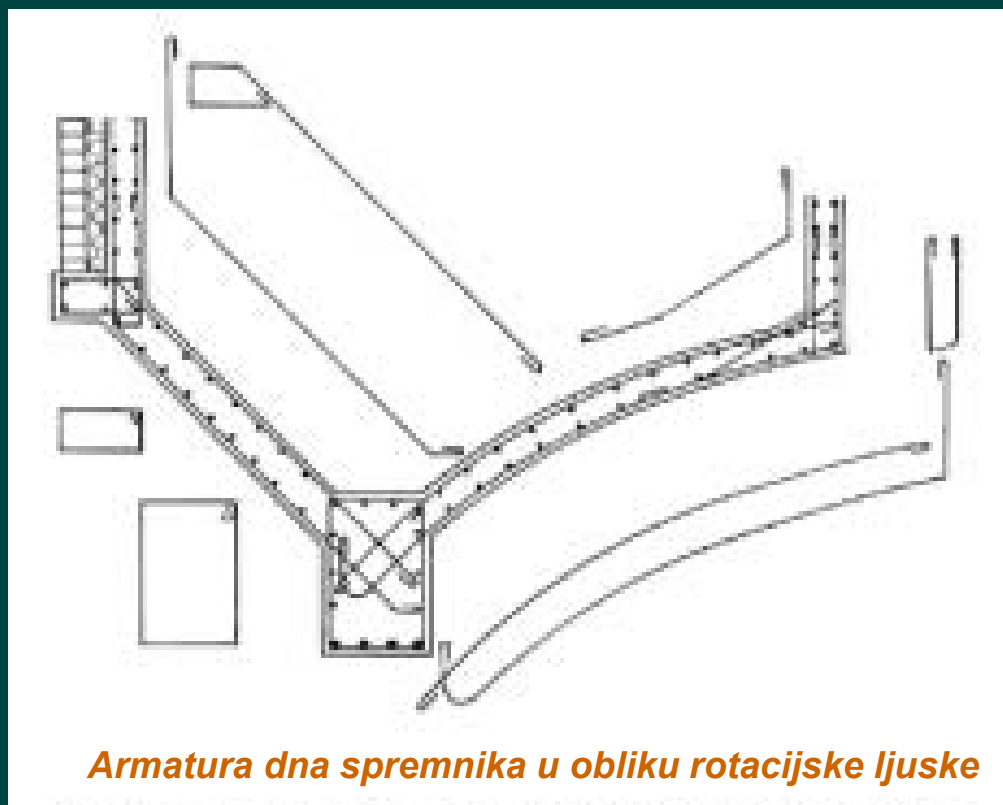
- Kutovi spremnika
 - se ojačavaju vutama s dopunskom armaturom za osiguranje vute.



ARMIRANJE VODOSPREMNIKA

Primjeri: spremnik vodotornja

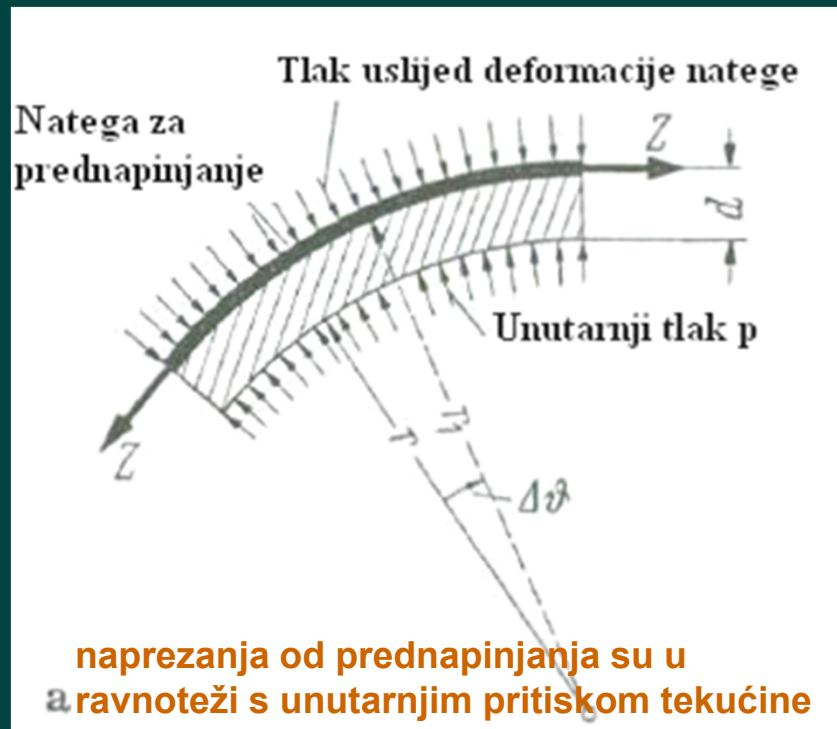
- Spremnik vodotornja se armira po načelima armiranja elemenata od kojih je sastavljen (stijene, ploče, ljuske).
- Posebnu pozornost valja obratiti spojevima elemenata koji su najslabija mjesta u svim spremnicima.



Armatura dna spremnika u obliku rotacijske ljuske

PREDNAPINJANJE VODOSPREMNIKA

- Prednapinjanjem se izbjegava vlak u betonu → izbjegava raspucavanje betona → postiže nepropusnost
 - Unutarnji pritisak tekućine p preuzima se prednapinjanjem natega na silu:
$$Z = p \cdot r$$
 - Silu prednapinjanja Z je potrebno povećati zbog puzanja i skupljanja betona čime se osigurava vodonepropusnost i sprečava raspucavanje betona:
$$Z = p \cdot r + \sigma_0 \cdot d$$
 - σ_0 rezerva tlačnih naprezanja; = 0,50 do 1 MPa



PREDNAPINJANJE VODOSPREMNIKA

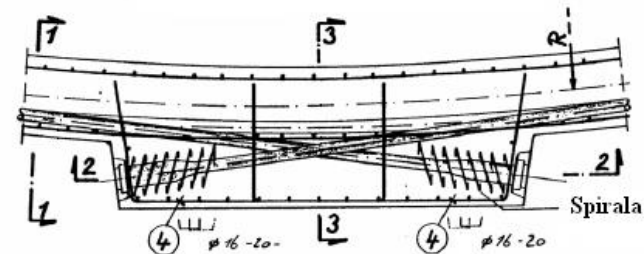
■ Izvedba:

1. Betonska jezgra se lijeva i njeguje.
2. Površina se priprema pjeskarenjem ili pod pritiskom vode.
3. Primjenjuje se kružno prednapinjanje pomoću uređaja za obavijanje.
4. Mlaznim betonom se radi obložni sloj.

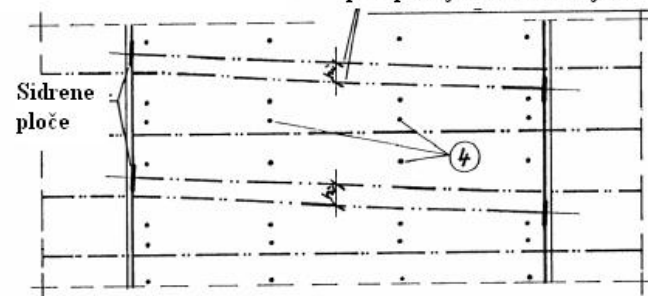
■ Dominantan prijenos sila ostvaruje se prstenastim vlačnim silama



TLOCRT

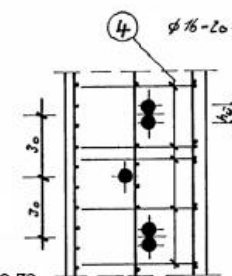


PRESJEK 2-2

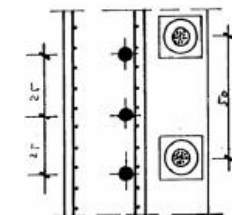


DETALJ SIDRENJA

PRESJEK 3-3



PRESJEK 1-1



SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

SEIZMIČKA OŠTEĆENJA



*Oštećenja spremnika
tekućine nakon potresa
u Turskoj (1999)*

SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

SEIZMIČKA OŠTEĆENJA

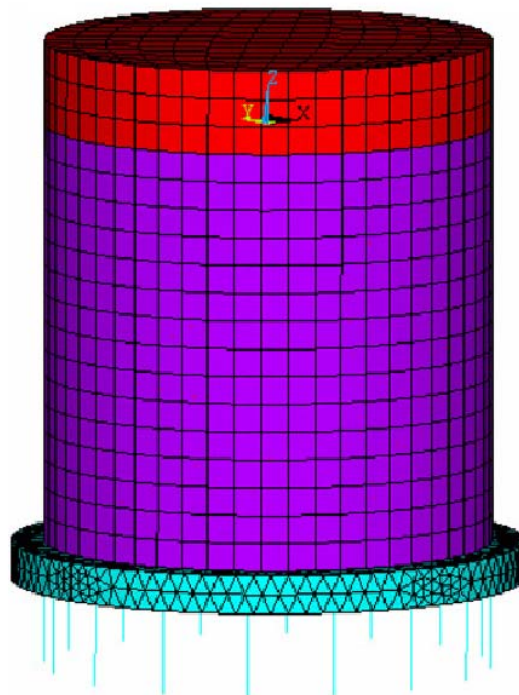
- Oštećenja spremnika uslijed djelovanja potresa:
 - Pojava “slonove noge” na dnu spremnika
 - uslijed izbočavanja limova izazvano velikim vertikalnim tlačnim naprezanjima u stijenkaama zbog momenata savijanja koji se računski određuju na zamjenskom štapnom modelu
 - Oštećenje krova i vrhova zidnih stijenki
 - uslijed valovitog gibanja fluida u čeličnom spremniku



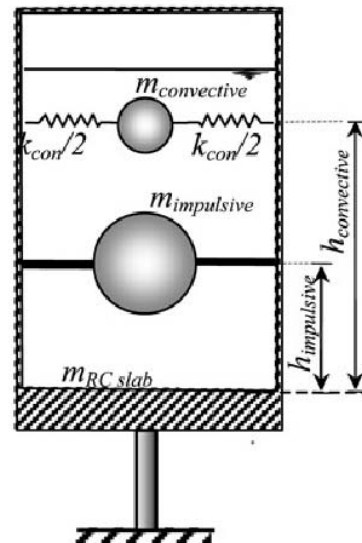
SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Impulsno i konvektivno djelovanje

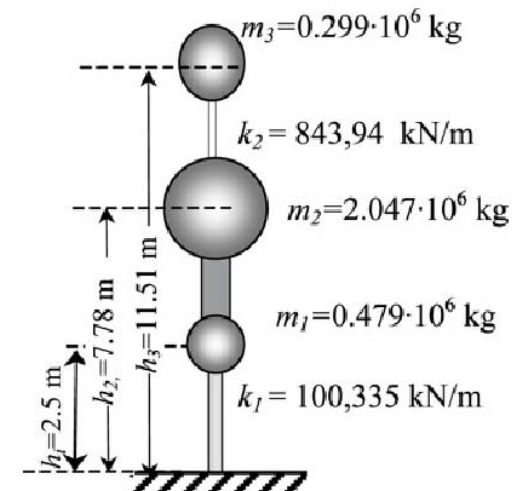
- Primjenjuje se na cilindrične spremnike oslonjene na tlo (Malhotra, Wenk, Wieland: SEI 3/2000)
- Postupak uzima u obzir djelovanje impulsa na tekućinu i konvektivno djelovanje tekućine u fleksibilnim čeličnim ili betonskim spremnicima fiksiranim za krute temelje
 - Djelovanje impulsa na tekućinu – smatra se da je dio mase tekućine kruto vezan sa spremnikom - djeluje kvazistatičko opterećenje
 - Konvektivno djelovanje (eng. *sloshing*) – povećanje sile na konstrukciju uslijed valovitog gibanja tekućine u spremniku



a) FEM model



b) Mehanički model



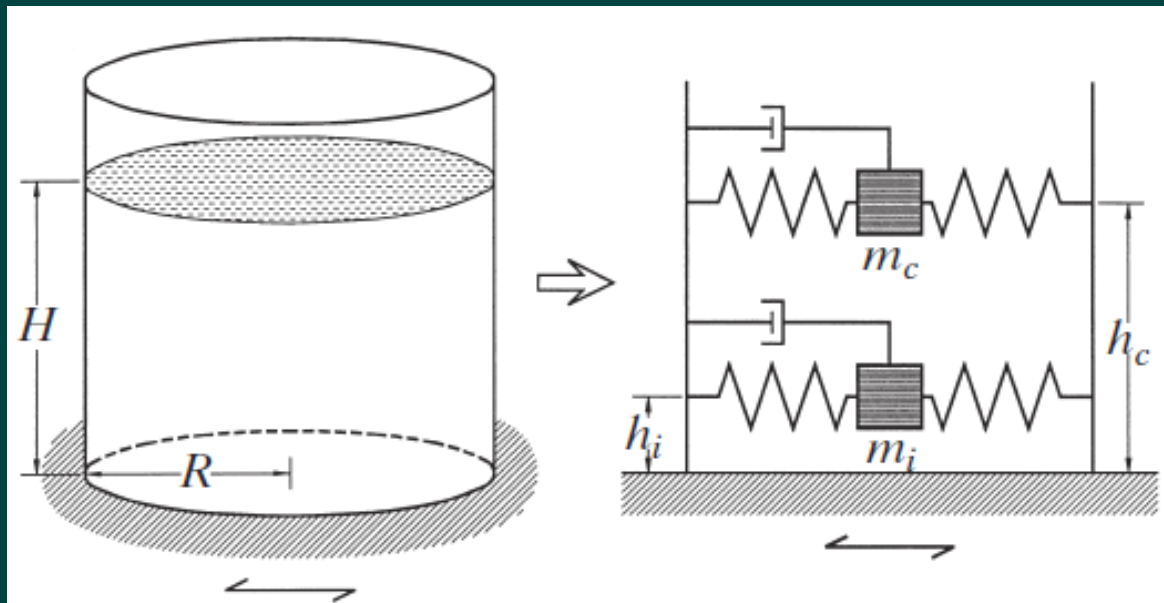
c) Pojednostavljeni model

SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Impulsno i konvektivno djelovanje

- Ispitivanja spremnika sa krutim temeljima pokazala su da se
 - dio tekućine u spremniku giba valovito s dugim periodom vibracija (konvektivni dio),
 - Dio tekućine koji se giba valovito određuje visinu valova u spremniku i potrebnu slobodnu visinu zidova spremnika iznad maksimalno dozvoljene razine tekućine u spremniku
 - a preostali dio tekućine se giba “kruto” (zajedno) sa zidovima spremnika (impulsni dio)
 - “Kruti” dio tekućine znači da se impulsna tekućina giba sa jednakim ubrzanjem kao tlo
 - Ima dominantan utjecaj na “base shear” silu i moment prevrtanja spremnika
- Ovaj postupak proračuna se primjenjuje na elastičnu analizu potpuno usidrenog spremnika u temelje
- Potres djeluje na sustavu s jednim stupnjem slobode
- Za praktičan proračun potrebno je promatrati samo nekoliko prvih vlastitih oblika vibracija

- m_c – konvektivni dio mase
- m_i – impulsni dio mase



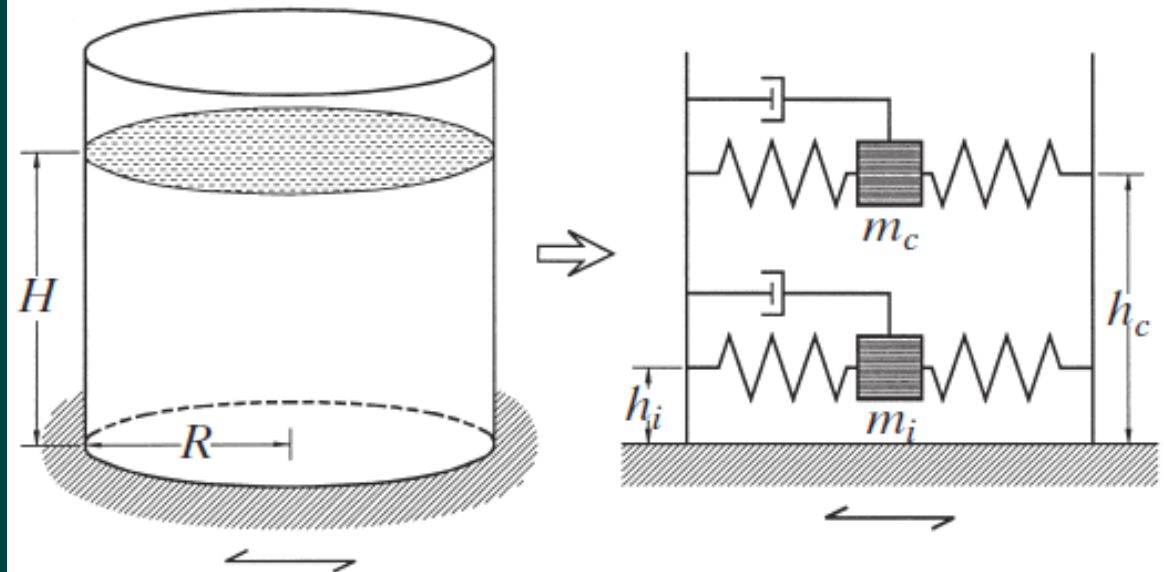
SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Impulsno i konvektivno djelovanje

□ Za većinu spremnika:

$$0,30 < H/R < 3$$

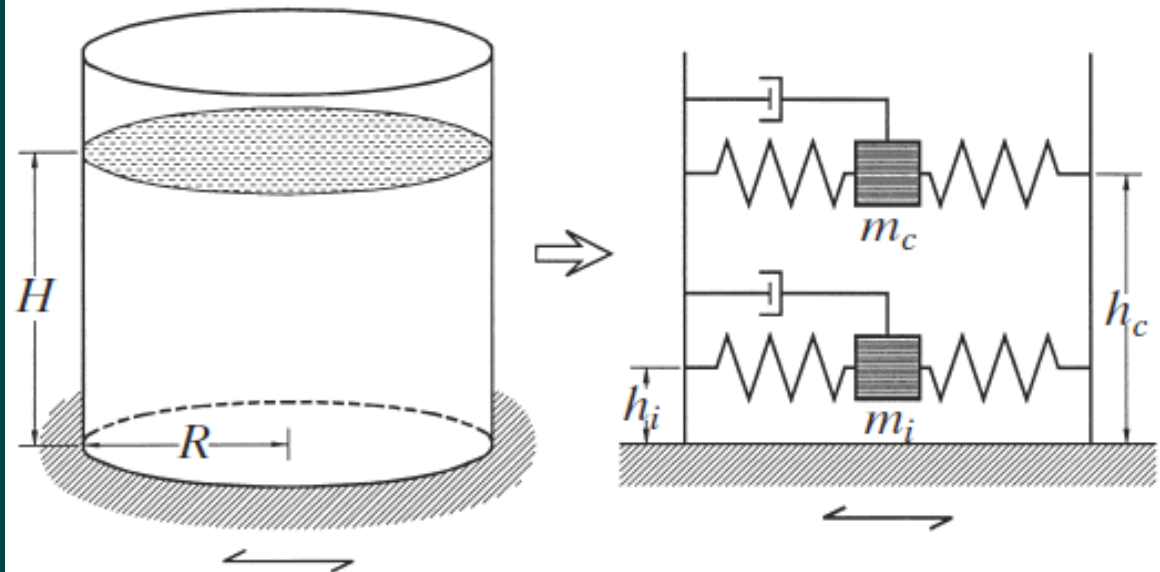
- H visina vode u spremniku,
- R radijus spremnika
- Prvi impulsni vlastiti oblik (kruto gibanje) i prvi konveksni vlastiti oblik (valovito gibanje) zajedno obuhvaćaju 86 – 98 % ukupne mase tekućine u spremniku
- Preostali dio tekućine vibrira
 - primarno u višim impulsnim vlastitim oblicima u visokim spremnicima ($H/R > 1$) i
 - u višim konvektivnim vlastitim oblicima u širokim spremnicima ($H/R \leq 1$).



SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Impulsno i konvektivno djelovanje

- Pojednostavljeni proračun se temelji na modificiranoj teoriji Velestos-a
- Modifikacije u teoriji omogućuju:
 - a) Modeliranje spremnika samo s prvim impulsnim i prvim konvektivnim vlastitim oblikom vibriranja
 - b) Kombinaciju
viših vlastitih impulsnih modalnih masa s prvim impulsnim vlastitim oblikom vibriranja i
viših vlastitih konvektivnih masa s prvim konvektivnim oblikom vibriranja
 - c) Određivanje impulsne i konvektivne visine čime se u obzir uzimaju viši vlastiti oblici za proračun prevrtanja spremnika
 - d) Poopćenje izraza za impulsni period vibracija kako bi se izraz mogao primijeniti za spremnike od čelika i betona različitih debljina stijenki
- Impulsni i konvektivni odgovor spremnika kombiniraju se sumiranjem



SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Impulsno i konvektivno djelovanje

- Impulsni prirodni period vibracija:

$$T_{imp} = C_i \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{h/r} \times \sqrt{E}}$$

- Konvektivni period vibracija:

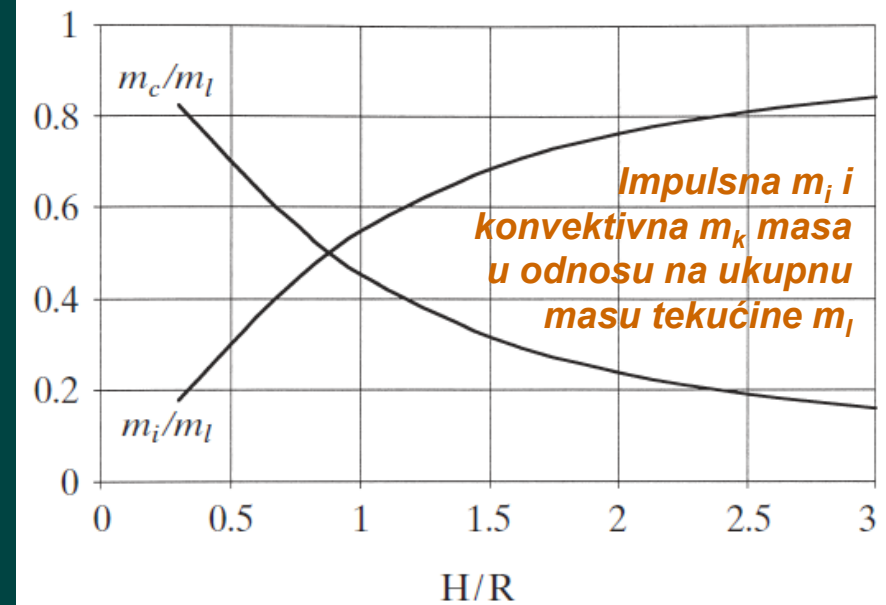
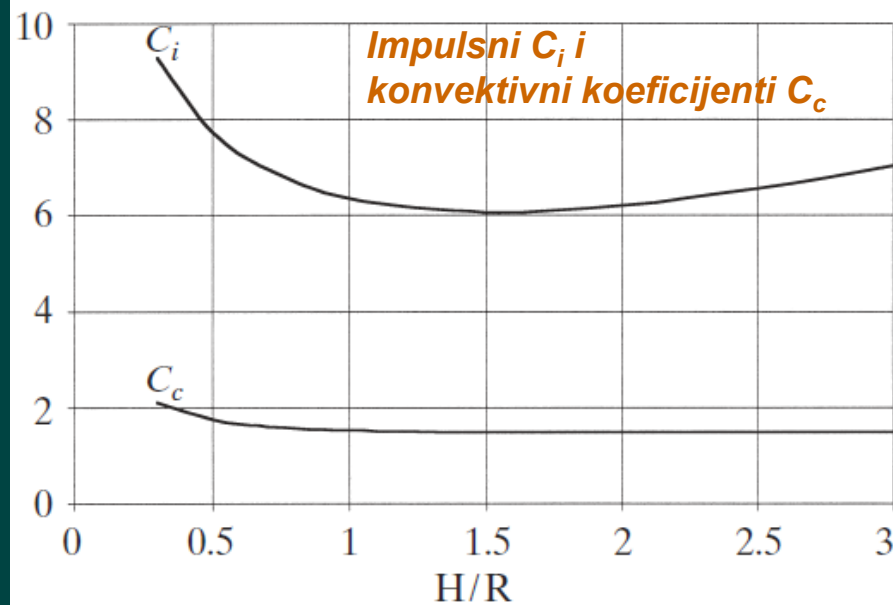
$$T_{con} = C_c \sqrt{r}$$

- h ekvivalentna jednolika debljina stjenke (srednja debljina)
- E modul elastičnosti materijala
- ρ gustoća tekućine u spremniku
- H visina vode u spremniku
- C_i, C_c koeficijenti iz tablice

H/r	C_i	C_c [s/√m]	m_i/m_l	m_c/m_l	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

SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Impulsno i konvektivno djelovanje



H/r	C_i	C_c [s/√m]	m_i/m_l	m_c/m_l	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

SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Ukupna posmična sila

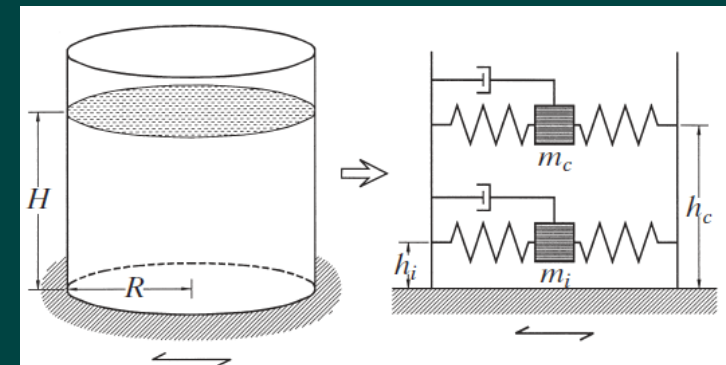
□ Ukupan “base shear” :

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

- m_i – impulsni dio mase
- m_w – masa zidova spremnika
- m_r – masa krova spremnika
- m_c – konvektivni dio mase

- $S_e(T_{imp})$ – impulsno spektralno ubrzanje
 - dobiveno iz elastičnog spektra odgovora sa 2 % prigušenja za čelične spremnike i spremnike od prednapetog betona,
 - a za AB spremnike iz elastičnog spektra odgovora konstrukcije sa 5 % prigušenja

- $S_e(T_{con})$ – konvektivno spektralno ubrzanje
 - dobiveno iz elastičnog spektra odgovora sa 0,5 % prigušenja



SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Moment prevrtanja iznad temeljne ploče

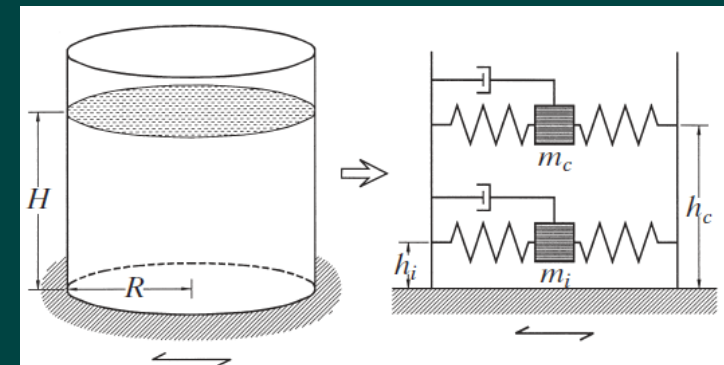
- Moment prevrtanja iznad temeljne ploče M
- uzrokuje prema teoriji greda tlačna vertikalna naprezanja u dnu zida:

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

- h_i – visina težišta impulsnog dijela tekućine
- h_w – težište zida spremnika
- h_r – visina krova spremnika
- h_c – visina težišta konvektivnog dijela tekućine

- m_i – impulsni dio mase
- m_w – masa zidova spremnika
- m_r – masa krova spremnika
- m_c – konvektivni dio mase

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



SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

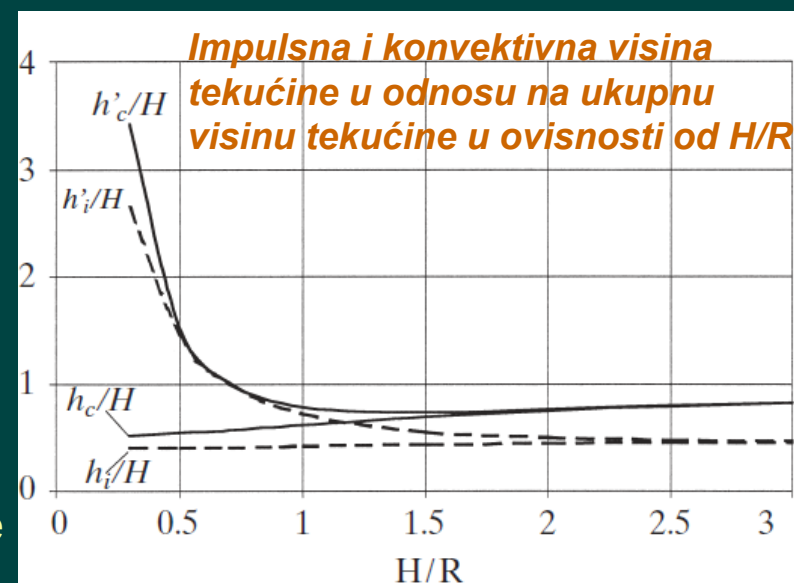
POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Moment prevrtanja ispod temeljne ploče

- Moment prevrtanja neposredno ispod temeljne ploče M'
- ovisi o hidrodinamičkom pritisku na zidove spremnika kao i o pritisku na temeljnu ploču:

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

- h_i' – visina težišta impulsnog dijela tekućine (iz tablice (slajd 23) ili sa slike)
- h_w – težište zida spremnika
- h_r – visina krova spremnika
- h_c' – visina težišta konvektivnog dijela tekućine (iz tablice (slajd 23) ili sa slike)

- m_i – impulsni dio mase
- m_w – masa zidova spremnika
- m_r – masa krova spremnika
- m_c – konvektivni dio mase
- $S_e(T_{imp})$ – impulsno spektralno ubrzanje
- $S_e(T_{con})$ – konvektivno spektralno ubrzanje



SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Momenti prikladni za dimensioniranje

□ Spremnici na prstenastim temeljima:

- Moment M – služi za dimensioniranje
 - zidova,
 - sidrenja u temelje
 - i temelja

□ Spremnici na temeljnoj ploči:

- Moment M' – služi za dimensioniranje
 - temelja
- Moment M – služi za dimensioniranje
 - zidova
 - i sidrenja

SEIZMIČKI PRORAČUN SPREMNIKA TEKUĆINA

POJEDNOSTAVLJENI PRORAČUN : Vertikalni pomak tekućine

- Vertikalni pomak tekućine (visina vala):

$$d = R \frac{S_e(T_{con})}{g}$$

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE SLJEDEĆE PREDAVANJE



Čelični tornjevi, jarboli, dimnjaci - projektiranje