

UTICAJ SEIZMIČKIH SILA NA VERTIKALNE CILINDRIČNE SKLADIŠNE REZERVOARE

THE EFFECT OF SEISMIC FORCES ON VERTICAL CYLINDRICAL STORAGE TANKS

Stručni rad / Professional paper

UDK /UDC: 624.95.042.6

Rad primljen / Paper received: 15.6.2002.

Adresa autora / Author's address:

⁽¹⁾ GP Mostogradnja, AD, Beograd

⁽²⁾ Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Ključne reči

- vertikalni rezervoari
- konstrukcija
- proračun
- seizmički uticaj

Keywords

- vertical storage tank
- design
- calculation
- seismic effect

IZVOD

Pri proračunu posude za skladištenje moraju se uzeti u obzir i spoljni uticaji (veter, sneg, kiša, zemljotres), ako ih ima. Jugoslovenski standardi za takav proračun ne postoje, pa se i kod nas koriste API standardi. U radu je prikazan tok proračuna rezervoara zapremine 10 000 m³ prema API 650.

ABSTRACT

External effects (wind, snow, rain, earthquake), if acting, have to be taken into account in calcualtion. Yugoslav standards for such a calculation are not existing, and API (American Petroleum Institute) standards are used. In the paper the calculation procedure for storage tank of 10 000 m³ in volume according to API 650 is presented.

UVOD

U poslednjoj deceniji primetan je trend u skladištenju tečnih fluida u nadzemnim rezervoarima nakon što se pokazalo da primena ukopanih - podzemnih rezervoara ima niz nedostataka u odnosu na sve strožije ekološke zahteve. Osnovne prednosti nadzemnih rezervoara su:

- značajno manja sredstva koja treba uložiti u opremu za detektovanje curenja i sprečavanje kontaminacije terena;
- manja ulaganja u održavanje i kraći rokovi sanacije;
- jednostavna i svakodnevna kontrola.

Nadzemni skladišni rezervoari se zbog izloženosti nalaze pod većim uticajem okoline, što uslovjava primenu specifičnih proračuna kojima se obezbeđuje ispravno funkcioniisanje i dug vek konstrukcije.

UTICAJI NA REZERVOARE

Osim proračunate debljine zida rezervoara na osnovu hidrostatičkog pritiska uskladištenog fluida, uvećanog za vrednost unutrašnjeg pritiska (ukoliko postoji), stabilnost vertikalnih cilindričnih rezervoara se obezbeđuje dodatnim proračunima, koji uzimaju u obzir uticaj veta na cilindrični (omotač) i sferni/konični deo (krov) rezervoara, uticaj padavina (kiša, sneg), temperature, kao i seizmičkih sila. Takvim proračunima se, osim sigurnosti veza elemenata rezervoara, uzima u obzir i stabilnost omotača od izvijanja (ulubljivanja), odnosno sposobnost rezervoara da pod predviđenim opterećenjem očuva prvobitnu geometriju.

Svaki uticaj treba prvo analizirati nezavisno od ostalih uticaja, uzimajući u obzir specifičnost pretpostavljenog opterećenja. Nakon toga treba izvršiti analizu kombinovanih uticaja u skladu sa važećim propisima. Tako, na primer, specifičnost opterećenja vетром je da, osim povećanja napona u nosećoj strukturi, gde se uticaj razmatra u kombinaciji sa hidrostatičkim pritiskom, može da prouzrokuje preturanje ili smicanje rezervoara sa temelja, kada se

razmatra samo sila uzgona, odnosno horizontalna sila pritisaka vetra. U svetu se, naročito posle katastrofalnih zemljotresa, veliki značaj pridaje uticaju seizmičkih sila na rezervoare.

Višegodišnja ispitivanja i analize doveli su do razvoja novih metoda proračuna, od kojih su neke uključene u svetske standarde za projektovanje i izgradnju rezervoara.

SPECIFIČNOSTI SEIZMIČKOG UTICAJA

Analize i izveštaji o stanju rezervoara koji su se našli pod uticajem zemljotresa ukazuju na uobičajena oštećenja u vidu [1, 2]:

- Izvijanja (ulubljivanja) omotača rezervoara u blizini dna usled velikih longitudinalnih (aksijalnih) membranskih sila. Ovakvo oštećenje se uobičajeno naziva „slonova stopa“ (izraz je nastao zbog specifičnog izgleda rezervoara na mestu ulubljivanja omotača, pri čemu na tom mestu dolazi do izdizanja i plastičnog deformisanja jednog dela dna odnosno prstena rezervoara) i obično se javlja pri spoju omotača i dna kod rezervoara velikog prečnika D . Kod rezervoara, čiji je odnos maksimalne visine punjenja i prečnika $H/D \geq 1$, ulubljivanje se javlja na donjem prstenu i ima oblik „dijamanta“, nalik ojačanju koje se izrađuje oko otvora i priključaka.

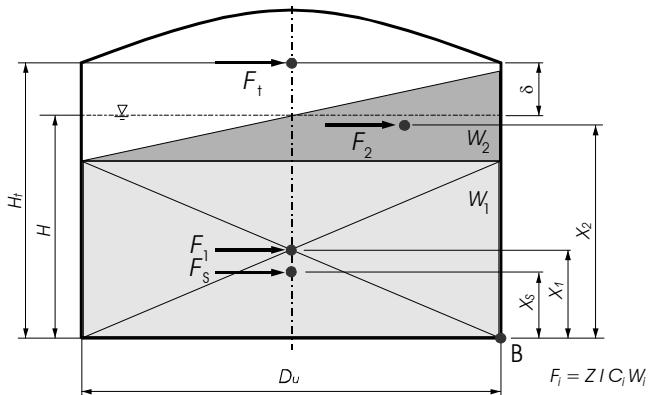
- Oštećenja krova usled udara talasa fluida se javlja u slučaju da nije predviđeno sigurnosno rastojanje nivoa punjenja (u literaturi na engleskom jeziku se naziva "slobodna ivica" - "freeboard") (veličina δ na sl. 1). Takođe, talas fluida može prouzrokovati i oštećenje na unutrašnjem osloncu krova u slučaju kada krov nije samonoseći.

- Oštećenja, odnosno loma cevi i drugih strukturnih elemenata čvrsto spojenih za omotač, koja nastaju usled pomeranja rezervoara.

- Oštećenja temelja.

Rezervoari opremljeni plivajućim krovom, spolnjim ili unutrašnjim, pokazali su se kao dobro rešenje za seizmički aktivna područja, pri čemu su oštećenja uočena na zaptivnom

sistemu i vodilici, ali je zato uticaj konvektivne komponente sveden na minimum.



Slika 1. Rezervoar pod dejstvom seizmičkih sila F_i

Metode proračuna rezervoara na dejstvo seizmičkih sila, danas usvojene u brojnim industrijskim standardima, imaju korene u analitičkim radovima Jakobsena, Hausnera i Velecosa. Standardi Američkog instituta za petrolej (American Petroleum Institute) API 650 [3] i API 620, kao i Američkog udruženja za vode (American Water Works Association) AWWA D100 za čelične rezervoare koji se izrađuju zavarivanjem propisuju način proračuna rezervoara sa ravnim dnom na dejstvo seizmičkih sila. Taj proračun se zasniva na praćenju ponašanja noseće strukture rezervoara u zemljotresima još od 1930. godine. Svaka od prihvaćenih metoda proračuna podrazumeva dinamičko modeliranje strukture i skladišnog fluida, odnosno utvrđivanje potrebnih parametara:

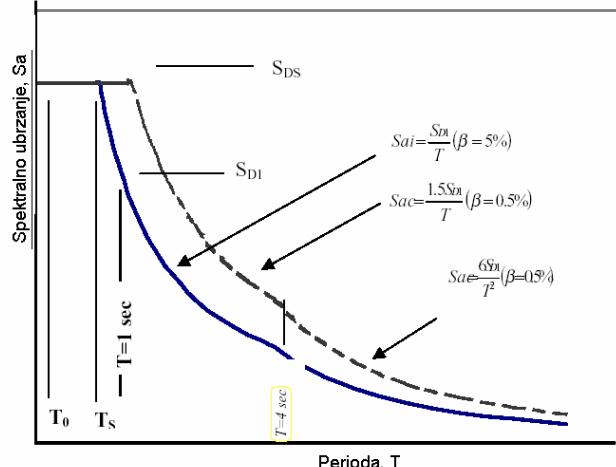
1. Kada se temelj napunjenoj rezervoara kreće (podrazumeva se horizontalno vibriranje zemlje), određeni - niži deo skladištenog fluida težine W_1 , označen kao impulsna komponenta, ponaša se kao čvrsto telo, kruto spojeno sa omotačem rezervoara.
2. U isto vreme, gornji deo skladištenog fluida težine W_2 , označen kao konvektivna komponenta, osciluje po sopstvenoj frekvenciji. Idealizovani izgled slobodne površine tečnosti usled oscilovanja – talasanja je prikazan na sl. 1.
3. Određivanje perioda prinudnog oscilovanja noseće konstrukcije rezervoara i dela fluida težine W_1 (impulsne komponente), kao i perioda sopstvenog oscilovanja konvektivne komponente W_2 , podrazumevajući da se konvektivna komponenta kreće po prvom oscilatornom modu. „Impulsni“ period oscilovanja se kreće obično između 0,25 i 0,6 s. Period oscilovanja konvektivne komponente za većinu rezervoara je 2,5 (i više) sekundi.
4. Izrada spektralnog odgovora konstrukcije, koji može biti specifičan za konkretnu lokaciju na kojoj se gradi rezervoar (prema podacima naručioca/korisnika rezervoara) ili određen na osnovu seizmičkih koeficijenata, datih u nacionalnim propisima i standardima. Na osnovu spektralnog odgovora konstrukcije se mogu odrediti spektralna ubrzanja masa W_1 i W_2 , na osnovu kojih se mogu izračunati horizontalne dinamičke sile koje deluju u težištu svake uticajne komponente (sl. 1. i 2).

Na sl. 2. prikazan je tipičan spektar za jedan rezervoar, gde S_{ai} odnosno S_{ac} predstavljaju vrednosti spektralnog ubrzanja impulsne, odnosno konvektivne komponente. Na

slici se vidi da se spektralno ubrzanje impulsne komponente (puna linija) računa sa velikim konstrukcijskim prigušnjem, u ovom slučaju 5%, dok se za proračun spektralnog ubrzanja konvektivne komponente (isprekidana linija) koristi prigušenje 0,5% od kritičnog.

Opisana procedura je propisana i API 650 standardom, pri čemu se za izračunavanje spektralnog ubrzanja uzima konstruktivno prigušenje 2% od kritičnog za impulsnu komponentu, odnosno 0,5% za konvektivnu komponentu (dodatak E.3.3.3 API 650). Kako ovakav postupak od projektanta rezervoara zahteva značajno poznavanje dinamičkih svojstava konstrukcije i pouzdane geološke podatke o stanju zemljишta, API je izradio i postupak proračuna rezervoara prema polu-statičkoj metodi, koji na jednostaviji način obezbeđuje stabilnost i pouzdanost rezervoara. Takav postupak je zasnovan na maksimalnim vrednostima pojedinih faktora i svakako je na strani sigurnosti.

Na primeru proračuna rezervoara su objašnjeni pojedini faktori, njihov uticaj i način određivanja prema zahtevima API 650 standarda.



Slika 2. Tipičan izgled jednog spektralnog odgovora

PRIMER PRORAČUNA

U sektoru za projektovanje GP „Mostogradnja“ AD proračun rezervoara na dejstvo seizmičkih sila se sprovodi već niz godina u skladu sa API 650 standardom, jer važeći jugoslovenski standard ne propisuje odredbe vezane za tu problematiku. U nastavku teksta je ukratko prikazan seizmički proračun rezervoara A-5501, nominalne zapremine 10.000 m³, koji je projektovan i izgrađen za potrebe NIS na Terminalu jugoslovenskog naftovoda u Novom Sadu.

Određivanje opterećenja rezervoara

Moment prevrtanja rezervoara od seizmičkih sila izračunava se po obrascu:

$$M = Z \cdot I \left(C_1 \cdot W_S \cdot X_S + C_1 \cdot W_r \cdot H_t + C_1 \cdot W_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot W_2 \cdot X_2 \right), \text{Nm}$$

gde je:

$Z = 0,1$ - faktor seizmičke zone - određuje se prema lokaciji rezervoara na osnovu karata seizmičkog hazarda prema maksimalno očekivanom horizontalnom ubrzanju oscilovanja tla [4]. Pri konstrukciji karata sagledavaju se uticaji svih relevantnih žarišnih

- zona jakih zemljotresa od značaja za lokaciju rezervoara.
- $I = 1$ - faktor važnosti objekta - određuje se u zavisnosti od namene rezervoara i njegove uloge u periodu neposredno posle eventualnog zemljotresa.
- C_1, C_2 - koeficijenti poprečnih seizmičkih sila, određuju se u skladu sa E.3.3. API 650.
- $C_1 = 0,6$ - koeficijent impulsne komponente zasnovan na vrednosti $T_s = 1$ s (sl. 2).
- $C_2 = \frac{3,375 \cdot S}{T^2} = 0,14$ - koeficijent konvektivne komponente,

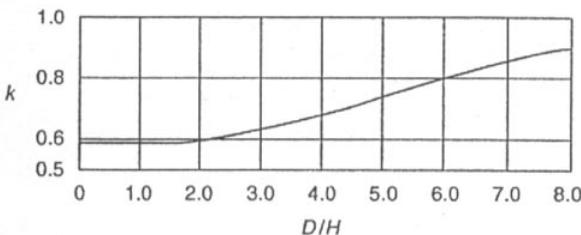
gde je:

S - lokacijski koeficijent, određen iz API 650 tabela E-3;
 $\Rightarrow S = 1,5$

T - perioda sopstvenih oscilacija konvektivne komponente u prvom modu:

$$T = 1,8113 \cdot k \cdot \sqrt{D} = 1,8113 \cdot 0,6 \cdot \sqrt{30,48} = 5,99 \text{ s} > 4,5 \text{ s}$$

k = 0,6 - faktor određen iz grafikona E-4 API 650, prikazanog na sl. 3, u funkciji odnosa D/H .



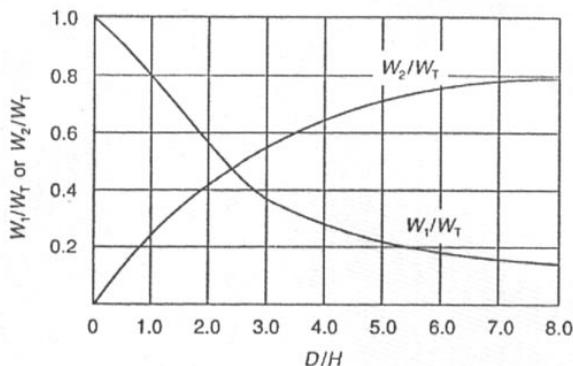
Slika 3. Dijagram za određivanje faktora k u zavisnosti od odnosa D/H (API 650)

$W_S = 1.589.844,9 \text{ N}$ - ukupna težina omotača rezervoara.
 $X_S = 4,966 \text{ m}$ - visina težišta omotača rezervoara (rastojanje od dna do težišta).

$W_r = 1.189.107,6 \text{ N}$ - ukupna težina krova rezervoara zajedno sa opterećenjem od snega.

$H_t = 14,9 \text{ m}$ - visina omotača rezervoara.

$W_l = 42.119,7 \text{ N}$ - težina tečnosti u rezervoaru koja se kreće sjedinjena sa omotačem, kako je definisano u tački E.3.2.1, i određuje se sa grafikona E-2, prikazanog na sl. 4, na osnovu odnosa D/H .



Slika 4. Odnos efektivnih masa u zavisnosti od odnosa D/H

$W_2 = 38.879,7 \text{ N}$ - težina medijuma u rezervoaru koji se pokreće u prvom talasu sa omotačem, kako je definisano u

E.3.2.1. API 650, i određuje sa grafikona E-2 (sl. 4) iz odnosa D/H .

$$W_T = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot H \cdot 9,81 \cdot \rho = 80.999,4 \text{ N} - \text{težina tečnosti.}$$

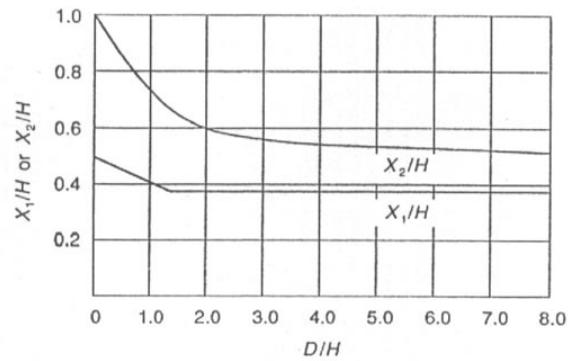
$D = 30,480 \text{ m}$ - prečnik omotača rezervoara.

$H = 13,800 \text{ m}$ - maksimalna visina punjenja tečnosti.

X_1, m - rastojanje od dna rezervoara do centra delovanja bočne seizmične sile koja deluje na W_1 , kako je definisano u E.3.2.2.API 650, i određuje se iz odnosa:

$$\frac{X_1}{H} = 0,38 - \text{odnos koji se određuje sa grafikona E-3 API 650, prikazanog na sl. 5.}$$

$$\Rightarrow X_1 = H \cdot 0,38 = 13,8 \cdot 0,38 = 5,244 \text{ m}$$



Slika 5. Centroidi seizmičkih sila

X_2, m - rastojanje od dna rezervoara do centra delovanja bočne seizmične sile koja deluje na W_2 , kako je definisano u E.3.2.2. API 650, i određuje se iz odnosa:

$$\frac{X_2}{H} = 0,59 - \text{odnos koji se određuje sa grafikona E-3 API 650, (sl. 5).}$$

$$\Rightarrow X_2 = H \cdot 0,59 = 13,8 \cdot 0,59 = 8,142 \text{ m}$$

Na osnovu navedenog, moment prevrtanja rezervoara od seizmičkih sila je:

$$M = 1.554.406,2 \text{ Nm}$$

Otpornost na prevrtanje

Otpornost na prevrtanje rezervoara obezbeđuje se masom rezervoara i ankerisanjem ili za neankerisane rezervoare masom i jednom količinom skladišnog fluida koji se suprotstavlja prevrtanju rezervoara, pri čemu se pod prevrtanjem ne smatra samo bukvalno prevrtanje, već i odizanje dela dna na mestu spoja sa omotačem i plastično deformisanje, kako je prikazano na sl. 6.

Ta količina (težina) skladišnog medijuma je:

$$w_L = 99 \cdot t_b \cdot \sqrt{F_{by} \cdot \rho \cdot H} = 53.985,0 \text{ N/m}$$

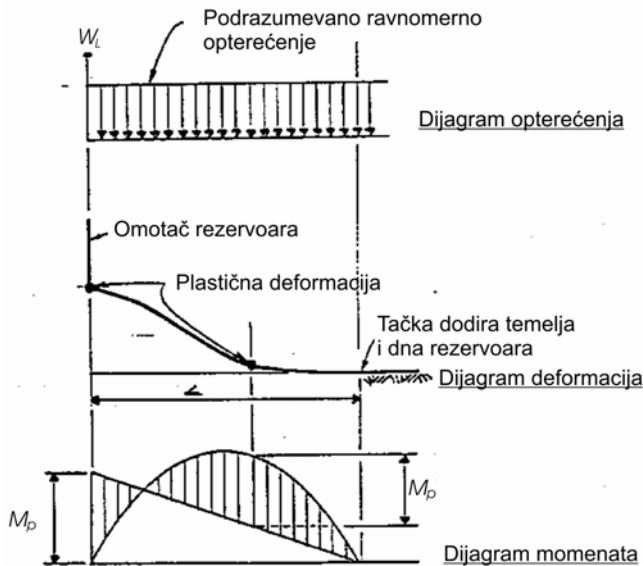
a maksimalno može iznositi

$$w_{Lmax} = 196 \cdot \rho \cdot H \cdot D = 67.602,7 \text{ N/m}$$

gde je:

$t_b = 13 \text{ mm}$ - debljina anularnog prstena,

$F_{by} = 150 \text{ MPa}$ - dozvoljeni napon tečenja za materijal anularnog prstena,
 $\rho = 0,85$ - specifična gustina skladišnog fluida.



Slika 6. Dijagram opterećenja, deformacija i momenata na mestu spoja omotača i dna rezervoara

Kako je $w_L < w_{L\max}$, potrebna širina anularnog prstena (računato od omotača ka centru) se računa prema

$$h = 0,1745 \cdot \frac{W_L}{GH} = 807,2 \text{ mm} \leq h_{an} = 1075 \text{ mm}$$

Iz prethodnog se zaključuje da je projektovana širina anularnog prstena rezervoara zadovoljavajuća i da rezervoar ne treba ankerisati.

Stabilnost prvog prstena omotača

Kako je $\frac{\rho \cdot H \cdot D^2}{t^2} = 37,71 \leq 44$, maksimalni dozvoljeni napon F_{adoz} se računa prema

$$F_{adoz} = \frac{83 \cdot t}{2,5D} + 7,5\sqrt{G \cdot H} = 44,2 \text{ MPa}$$

Ukoliko je projektom predviđen nadpritisak u rezervoaru P_n , dozvoljeni napon potrebno je umanjiti za tu vrednost.

$$\text{Kako je: } \frac{M}{D^2 \cdot (w_t + w_L)} = 0,022 \leq 0,785 \text{ prema E.5.1}$$

API 650 izlazi

$$\Rightarrow b = \left(w_t + \frac{1,273 \cdot M}{D^2} \right) \cdot 0,45359 = 10824,66 \text{ Nm}$$

gde je:

b - longitudinalna jedinična sila na dnu omotača po obimu,

$$w_t = \frac{(m_{om} + m_{kr}) \cdot g}{D \cdot \pi} = 21.734,5 \text{ N/m} \text{ - jedinična težina po obimu omotača i krova,}$$

$t = 17 \text{ mm}$ - debljina prvog prstena bez dodataka (3 mm)

Sada se može izračunati vrednost longitudinalnog napona F_a u prvom prstenu na dnu rezervoara

$$F_a = \frac{b}{1000 \cdot t} = 0,64 \text{ MPa}$$

Proračun pokazuje da je $F_a < F_{adoz}$ pa je zaključak da je prvi prsten omotača stabilan u pogledu dejstva seizmičkih sila.

ZAKLJUČAK

Prikazanim proračunom potvrđena je činjenica da se konstrukcijska stabilnost velikih - „teških“ rezervoara ($H/D < 1$) može osigurati pravilnim izbirom širine anularnog prstena i generalno gledajući nije ih potrebno ankerisati. Problem, koji se kod ovakvih rezervoara, u seizmički vrlo aktivnim područjima, može javiti, je značajno povećanje obimnih napona u srednjem delu omotača kao i mogućnost prelivanja skladištenog fluida usled velikog uticaja konvektivne komponente. U tim slučajevima investitor - korisnik rezervoara procenjuje potrebu za dodatnom proverom napona, propisuje metodu proračuna, veličinu zaštitnog pojasa δ i druge podatke. Rezervoari kod kojih je odnos $H/D > 1$, naročito preko 2, su pod značajnim uticajem impulsne komponente, pa je posebnu pažnju potrebno posvetiti potrebi i načinu ankerisanja takvih rezervoara.

API 650 standard, takođe, propisuje način osiguranja vertikalnih oslonaca krovova (ukoliko postoje), vrednosti koeficijenta trenja pri proračunu klizanja rezervoara sa temelja ($\mu = 0,4$), dodatno opterećenje temelja i druge veličine.

Kako važeći jugoslovenski standard JUS M.Z3.054 [5] ne propisuje nikakve odredbe vezane za seizmički uticaj, želja je da se prikazanim proračunom i ukazivanjem na moguće posledice stručnjacima koji se bave projektovanjem i izgradnjom rezervoara ukaže na potrebu sagledavanja ovog, do sada, nedovoljno obrađenog fenomena.

LITERATURA

1. R.S.Wozniak, W.W.Mitchell, (1978), Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks, API, Refining 43rd Midyear Meeting, Toronto, Canada
2. Stephen W.Meier, (2000), Upcoming Changes to Seismic Design Criteria–2000, Tank Industry Consultants, Inc
3. American Petroleum Institute, (1998), API 650 Standard – Welded Steel Tanks for Oil Storage, 10th Edition
4. M. N. Petrović, (1998), Atlas karata seizmičkog hazarda republike Srbije, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
5. JUS M.Z3.054, (1981), Skladištenje nafte i naftnih derivata. Vertikalni cilindrični nadzemni rezervoari sa ravnim i nepomičnim ili plivajućim krovom