

JEKLENI SILOSI ZA SIPKE MATERIALE: 1. DEL – VPLIVI PRI POLNJENJU IN PRAZNJENJU

STEEL SILOS FOR PARTICULATE SOLID MATERIALS: PART 1 – ACTIONS AT FILLING AND DISCHARGE

Simon Petrovčič, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo,
Zoisova 12, 1000 Ljubljana
simon.petrovcic@fa.uni-lj.si

Znanstveni članek

624.014.2:624.074:624.9

izr. prof. dr. Werner Guggenberger, univ. dipl. inž.

Tehniška univerza v Gradcu, Inštitut za jeklene in ploskovne konstrukcije
Lessingstraße 25/III, 8010 Gradec, Avstrija
werner.guggenberger@tugraz.at

izr. prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana
bbrank@ikpir.fgg.uni-lj.si

Povzetek | V članku obravnavamo osno-simetrične jeklene silose, ki so namenjeni shranjevanju sipkih materialov. Pokažemo, kako se po Evrokodih določi vplive (pritiske) na stene silosa med polnjenjem in praznjenjem. Postopke, ki jih za določitev pritiskov predpisuje standard EN 1991-4, podamo v nekaj korakih in diagramih potekov. V spremljajočem članku (2. del) pokažemo, kako se določi membranske sile v silosu in podamo primer izračuna pritiskov in membranskih sil.

Summary | The paper addresses axisymmetric steel silo structures used for the storage of particulate solid materials. It is shown how to determine actions (pressure loads) on silo walls during the filling and discharge according to EN Eurocodes. The procedures given in EN 1991-4 are presented in several steps and flowcharts. The determination of membrane forces in a silo structure and an illustrative example are given in an accompanying paper (part 2).

1 • UVOD

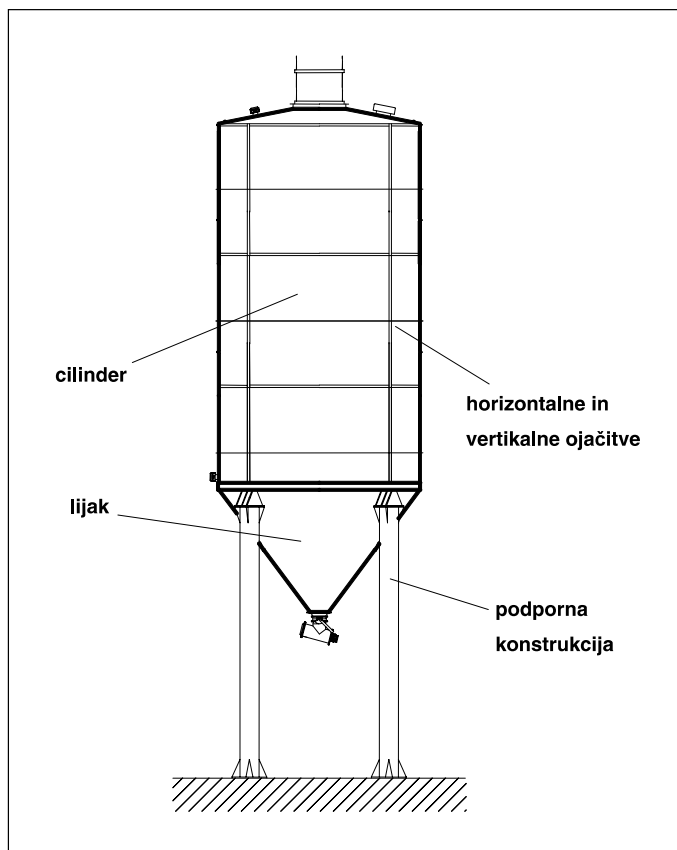
Siloski so posebne konstrukcije, ki se uporabljajo za shrambo organskih in anorganskih sipkih materialov predvsem v industriji in kmetijstvu. So raznoobrazni oblik in velikosti (od nekaj ton do prek 10.000 ton). Za njihovo izdelavo se uporabljajo različni materiali (tako jeklo in armirani beton kot tudi poliestrski laminati in les). Manjše silose po navadi obravnavamo kot izdelke, večje pa kot zahtevne vitke konstrukcije, ki jih

je treba pazljivo projektirati, predvsem zaradi njihove velike občutljivosti na uklon (Guggenberger, 2006).

Določitev vplivov (obtežb) na jekleno konstrukcijo silosa je razmeroma zahteven proces. Sipki materiali namreč lahko povzročajo nenavadne pritiske na stene silosa med procesoma polnjenja in praznjenja, zato jih je treba dovolj natančno oceniti, saj so jekleni silosi konstrukcije,

ki se rade uklonijo, če niso skrbno projektirane. Poleg pritiskov zaradi polnjenja in praznjenja je treba dovolj natančno oceniti tudi vplive vetra in potresa. V sklopu Evrokodov za konstrukcije se dva standarda nanašata izključno na določitev obtežb na silose. To sta EN 1991-4 (CEN, 2006a) in EN 1998-4 (CEN, 2006b). Prvi se ukvarja z določitvijo pritiskov na stene silosa, ki nastanejo med procesoma polnjenja in praznjenja z organskimi in anorganskimi sipkimi materiali, drugi pa je namenjen določitvi potresne obtežbe na silosno konstrukcijo. S tema dvema standardoma je mogoče ob uporabi nekaterih ostalih standardov Evrokod, ki se ukvarjajo z določitvijo vplivov na konstrukcije, npr. ((CEN, 2000), (CEN, 2005), (CEN, 2004)), določiti bistvene projektno obtežbe na konstrukcijo silosa.

V tem članku se omejimo na določitev osnovne obtežbe – tj. na določitev pritiskov na stene silosa, ki nastanejo med procesoma polnjenja in praznjenja s sipkimi materiali. Z vplivoma vetra in potresa se ne ukvarjamo; za obravnavo teh dveh vplivov glej (Petrovčič, 2008). Nadalje se omejimo na zelo pogoste silosne konstrukcije, tj. na osno-simetrične jeklene cilindrične silose (slika 1), ki so sestavljeni iz cilindričnega zgornjega dela – cilindra – in stožčastega spodnjega dela – lijaka. Osnovni namen članka je, da v obliki kratkega priročnika podamo postopek za določitev vplivov na silos zaradi polnjenja in praznjenja, ki ga predpisuje standard EN 1991-4 (CEN, 2006a). Postopek prikažemo kot proces sedmih zaporednih korakov. Zaradi boljše preglednosti in razumljivosti podajamo za ključne korake diagrame potekov. Za določitev pritiskov na jekleno osno-simetrični silos zaradi polnjenja in praznjenja po EN 1991-4 (CEN, 2006a) torej lahko uporabimo 2. in 3. poglavje članka, v standard EN 1991-4 (CEN, 2006a) pa pogledamo le toliko, da poiščemo vrednosti parametrov, ki določajo lastnosti shranjenega materiala (dodatek E), ter da določimo vrednost koeficienta trenja med materialom in steno silosa (dodatka D in E).



Slika 1 • Konstrukcijski elementi tipičnega osno-simetričnega cilindričnega silosa

2 • OSNO-SIMETRIČNA OBTEŽBA ZARADI POLNJENJA IN PRAZNJENJA

Pritiski na stene silosa zaradi polnjenja in praznjenja niso popolnoma osno-simetrični, ker med obema procesoma nastanejo različne naključne nesimetrije. Vendar pa je nesimetričnost pogosto zanemarljiva, zato EN 1991-4 (CEN, 2006a) dovoljuje, da se (v večini primerov) pritiske obravnava kot osno-simetrične. V tem poglavju se bomo ukvarjali z osno-simetričnimi pritiski. To, kdaj in kako je treba določiti nesimetrične pritiske, pa bo povedano v 3. poglavju.

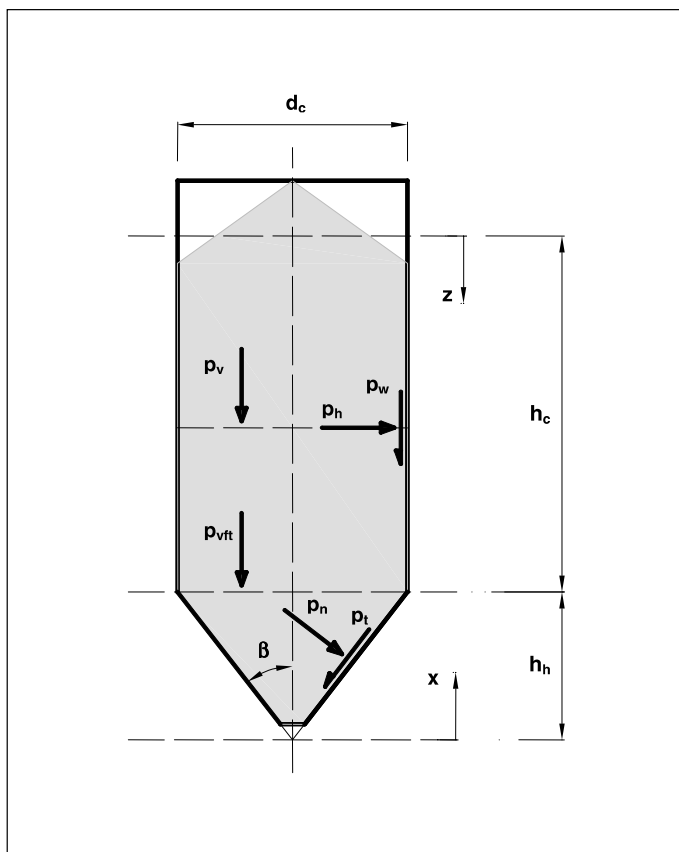
Oso-simetrično obtežbo zaradi polnjenja in praznjenja sipkega materiala predstavljajo (slika 2): (a) pritisk p_n na steno cilindra, (b) pritisk p_l na steno lijaka, (c) trenje p_w ob steni cilindra in (č) trenje p_t ob steni lijaka. V nadaljevanju članka ne razlikujemo med pritiskom in trenjem – oboje imenujemo pritisk.

Navpični pritisk v shranjenem materialu označimo s p_v . Ko gre za pritisk pri polnjenju, mu dodamo indeks f , torej p_{vf} . Vrednost tega pritiska na prehodu iz cilindra v lijak označimo s p_{vf} . Z G_c in G_l označimo težo shranjenega materiala v cilindru oziroma lijaku. Smeri delovanja omenjenih pritiskov na material in na steno silosa so prikazane na sliki 3.

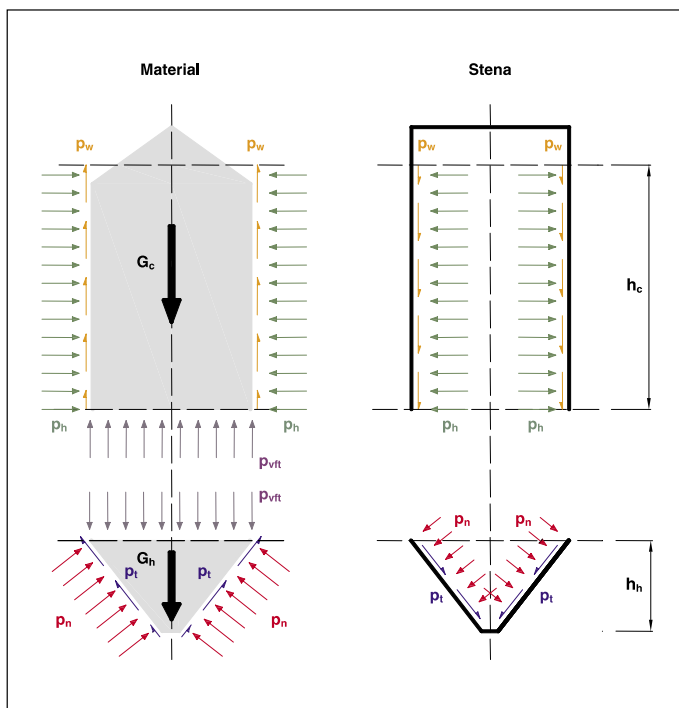
Postopek za določitev pritiskov p_v , p_{vf} , p_w in p_t podajamo v sedmih korakih, ki so navedeni v preglednici 1. Posamezne korake razložimo v nadaljevanju poglavja.

Korak	Opis koraka	Mesto v standardu EN 1991-4
1	Shranjeni material	Preglednica E.1
2	Geometrija silosa	Slika 1.1a
3	Tip silosa in lijaka	Poglavje 5.1(2)P in 6.1.1(2)P
4	Razred obremenitve	Preglednica 2.1
5	Kombinacije materialnih parametrov	Preglednica 3.1
6	Pritiski na cilindar	Poglavje 5
7	Pritiski na lijak	Poglavje 6

Preglednica 1 • Določitev osno-simetrične obtežbe zaradi polnjenja in praznjenja silosa po EN 1991-4 (CEN, 2006a)



Slika 2 • Oznake za osno-simetrične pritiske v silosu



Slika 3 • Smeri delovanja osno-simetričnih pritiskov po shranjenem materialu in po steni silosa

1. korak: Shranjeni material

Shranjeni material se opiše z nekaj parametri, ki so zbrani v preglednici 2. Indeksi $_{min}$ $_{max}$ in $_m$ označujejo njihove minimalne, maksimalne in srednje vrednosti (v nadaljevanju uporabljamo tudi oznake MIN, MAX in MEAN). Številčne vrednosti omenjenih parametrov za mnoge tipične sipke materiale so podane v prilogi E standarda EN 1991-4 (CEN, 2006a).

Materialni parameter	Opis
γ_{min}	specifična teža (minimalna in maksimalna)
γ_{max}	
ϕ_r	kot deponiranja materiala (slika 4)
$\phi_{i,min} = \phi_{im} / a_\phi$	kot notranjega trenja oz. strižni kot materiala (minimalni, srednji in maksimalni)
ϕ_{im}	
$\phi_{i,max} = \phi_{im} \cdot a_\phi$	
$K_{min} = K_m / a_K$	koeficient bočnega pritiska (minimalni, srednji in maksimalni)
K_m	
$K_{max} = K_m \cdot a_K$	
$\mu_{min} = \mu_m / a_\mu$	koeficient trenja med steno in materialom (minimalni, srednji in maksimalni)
μ_m	
$\mu_{max} = \mu_m \cdot a_\mu$	
C_{op}	referenčni faktor za nesimetrično obtežbo

Preglednica 2 • Parametri, ki opisujejo shranjeni material

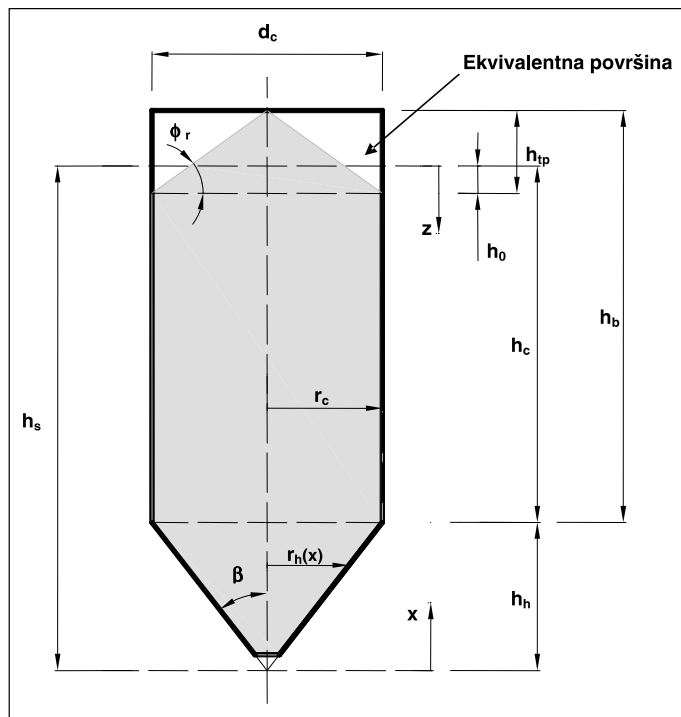
Izmed parametrov v preglednici 2 je nekoliko zahtevnejše določiti srednje vrednosti koeficienta trenja med steno in materialom (μ_m). Ta koeficient je odvisen od kategorije stene, ki jo določata tip jekla in njegova površinska obdelava (preglednica 3). Če je kategorija stene enaka D4, potem se vrednost koeficienta μ_m določi po prilogi D v standardu EN 1991-4 (CEN, 2006a), sicer pa po prilogi E istega standarda.

Kategorija	Trenje	Material
D1	Nizko	Hladno oblikovano nerjavno jeklo, polirano nerjavno jeklo, površina je zaščiten s premazom.
D2	Srednje	Gladko jeklo z visoko vsebnostjo ogljika, nepolirano nerjavno jeklo, galvanizirano jeklo.
D3	Visoko	Postarano (korodirano) jeklo, jeklo, odporno na abrazijo.
D4	Neenakomerno	Vodoravno nagubane stene, profilirana pločevina, nestandardne oblike sten.

Preglednica 3 • Kategorija stene cilindra za določitev μ_m

2. korak: Geometrija silosa

Geometrijski parametri osno-simetričnega jeklenega silosa, ki jih potrebujemo pri določitvi obtežbe, so razvidni iz slike 4 in preglednice 4.



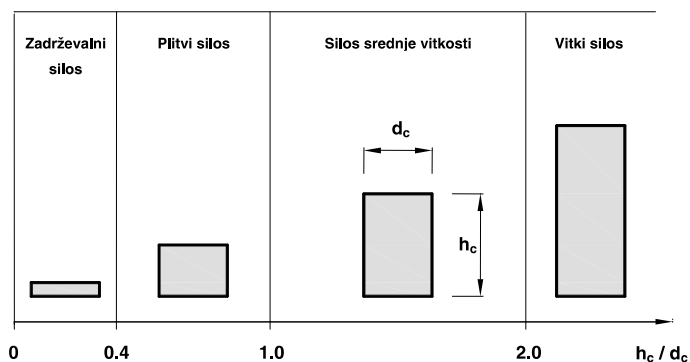
Slika 4 • Geometrijski parametri osno-simetričnega silosa

Neodvisni parametri	
Višina cilindra	h_b
Notranji polmer cilindra	r_c
Naklon lijaka glede na simetrijsko os	β
Odvisni parametri	
Notranji polmer lijaka (v odvisnosti od x)	$r_h(x) = x \cdot \tan \beta$
Višina lijaka	$h_h = \frac{r_c}{\tan \beta}$
Višina zgornjega kupa	$h_{tp} = r_c \cdot \tan \phi_r$
Globina pod ekvivalentno površino	$h_0 = \frac{1}{3} \cdot h_{tp}$
Nadomestna višina cilindra	$h_c = h_b - h_{tp} + h_0$
Nadomestna višina shranjenega materiala	$h_s = h_h + h_c < 100m$
Notranji premer cilindra	$d_c = 2 \cdot r_c < 60m$
Dodatna geometrijska omejitev	$h_s / d_c < 10$
Notranji obseg cilindra	$U = \pi \cdot d_c$
Notranja površina prečnega prereza cilindra	$A = \pi \cdot \frac{d_c^2}{4}$
Volumen shranjenega materiala	$V_m = A \cdot \left(h_c - h_0 + \frac{1}{3} (h_h + h_{tp}) \right)$
Teža shranjenega materiala	$G_m = \gamma_{max} \cdot V_m$

Preglednica 4 • Geometrijski parametri osno-simetričnega silosa

3. korak: Tip cilindra in lijaka

Oсно-simetrični jekleni silos je sestavljen iz cilindra in lijaka. Cilindri in lijaki se delijo na več tipov. Tip cilindra določa razmerje h_c/d_c (slika 5). Velja, da je tip silosa enak tipu cilindra. Lijaki se delijo na tri tipe, glede na kot β , minimalni koeficient bočnega pritiska K_{min} in minimalni koeficient trenja μ_{min} (preglednica 5).

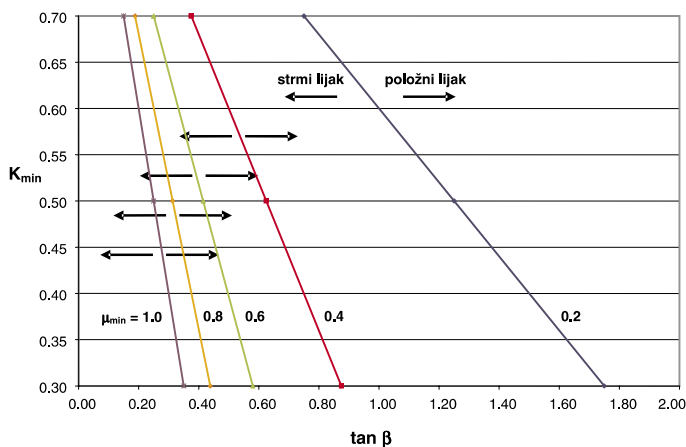


Slika 5 • Tipi cilindrov oziroma silosov

Tip lijaka	Pogoj	
Strmi lijak	$K_{min} <$	$1 - 2\mu_{min} \tan \beta$ (slika 6)
Položni lijak	$K_{min} \geq$	
Z ravnim dnom	$\beta \geq 85^\circ$	

Preglednica 5 • Tipi lijakov

Tip lijaka (strmi ali položni) lahko določimo tudi s pomočjo slike 6. Glede na minimalni koeficient trenja med steno in materialom (μ_{min}) izberemo ustrezno premico. Če leži točka, ki jo določata K_{min} in $\tan \beta$, levo od izbrane premice, je lijak strmi, v nasprotnem primeru je položni.



Slika 6 • Tipi lijakov

Opomba: Izrazi na sliki 5, sliki 6 in preglednici 5 so prevodi naslednjih angleških izrazov: zadrževalni silos – »retaining silo«, plitvi silos – »squat silo«, silos srednje vitkosti – »intermediate slenderness silo«, vitki silos – »slender silo«, strmi lijak – »steep hopper«, položni lijak – »shallow hopper«, lijak z ravnim dnom – »flat bottom«.

4. korak: Razred obremenitve

Glede na svojo kapaciteto (maso shranjenega materiala $m_{solid} = G_m/g \cong 0.1 \cdot G_m$, kjer je G_m definiran v preglednici 4) se silosi delijo v tri razrede obremenitve. Pri silosih z majhno kapaciteto veljajo nekatere poenostavitve, ki so razvidne v nadaljevanju članka. Razred obremenitve AAC (ang. »Action Assessment Class«) se določi po preglednici 6.

Razred obremenitve (AAC)	m_{solid}
1	pod 100 ton
2	med 100 in 10 000 tonami
3	več kot 10 000 ton

Preglednica 6 • Definicija razredov obremenitve pri silosih

5. korak: Kombinacije materialnih parametrov

Pritiski na stene silosa so odvisni od vrste shranjenega materiala, ki ga opisujejo parametri iz preglednice 2. Maksimalne vrednosti pritiskov dobimo s kombiniranjem minimalnih (MIN), maksimalnih (MAX) in srednjih (MEAN) vrednosti parametrov μ , K in ϕ , shranjenega materiala. Za specifično težo vedno vzamemo γ_{max} . Za izračun maksimalnih pritiskov na steno cilindra (p_n in p_w) se upošteva kombinacije iz preglednice 7. Za izračun maksimalnih pritiskov (p_n in p_l) na steno lijaka se upošteva kombinaciji iz preglednice 8.

Kombinacija	AAC	Namen	μ	K	ϕ
1	1	maksimalni pritisk (p_n) in maksimalno trenje (p_w)	MEAN	MEAN	MEAN
2	2 in 3	maksimalni pritisk (p_n)	MIN	MAX	MIN
3		maksimalno trenje (p_w)	MAX	MAX	MIN

Preglednica 7 • Kombinacije materialnih parametrov za določitev maksimalnih pritiskov na steno cilindra

Kombinacija	AAC	Velja za	Namen	μ	K	ϕ
4	1, 2 in 3	vertikalni pritisk v cilindru	maksimalni vertikalni pritisk na stiku cilindra in lijaka (p_v)	MIN	MIN	MAX
		steno lijaka	maksimalni pritisk (p_n) in maksimalno trenje (p_l) ob polnjenju	MIN	MIN	MIN
5	1, 2 in 3	vertikalni pritisk v cilindru	maksimalni vertikalni pritisk na stiku cilindra in lijaka (p_v)	MIN	MIN	MAX
		steno lijaka	maksimalni pritisk (p_n) in maksimalno trenje (p_l) ob praznjenju	MIN	MAX	MAX

Preglednica 8 • Kombinacije materialnih parametrov za določitev maksimalnih pritiskov na steno lijaka

6. korak: Pritiski na cilindar

Pritiske na steno cilindra se določi po diagramu 1 za vsako od kombinacij materialnih parametrov iz preglednice 7. Iz preglednice 7 je razvidno, da je za silose v razredu obremenitve 1 potrebno opraviti izračun samo za kombinacijo 1, za silose v razredu obremenitve 2 ali 3 pa je potrebno opraviti dva izračuna: za kombinacijo 2 (za določitev maksimalnega normalnega pritiska p_n) in za kombinacijo 3 (za določitev maksimalnega trenja p_w).

V diagramih 1.1, 1.2 in 1.3 je pritiskom pri polnjenju dodan indeks f , pritiskom pri praznjenju pa indeks e . Oznake na desni strani enačb so pojasnjene v preglednicah 2 in 4 in na sliki 4.

Iz diagramov 1.1, 1.2 in 1.3 je očitno, da so pritiski pri praznjenju vedno večji ali enaki pritiskom pri polnjenju. Prav tako je očitno, da je oblika pritiskov po višini cilindra enaka pri praznjenju in pri polnjenju.

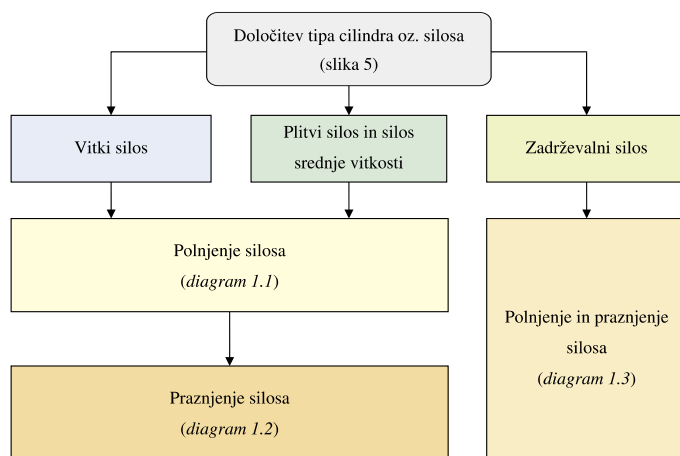


Diagram 1 • Določitev pritiskov na steno cilindra

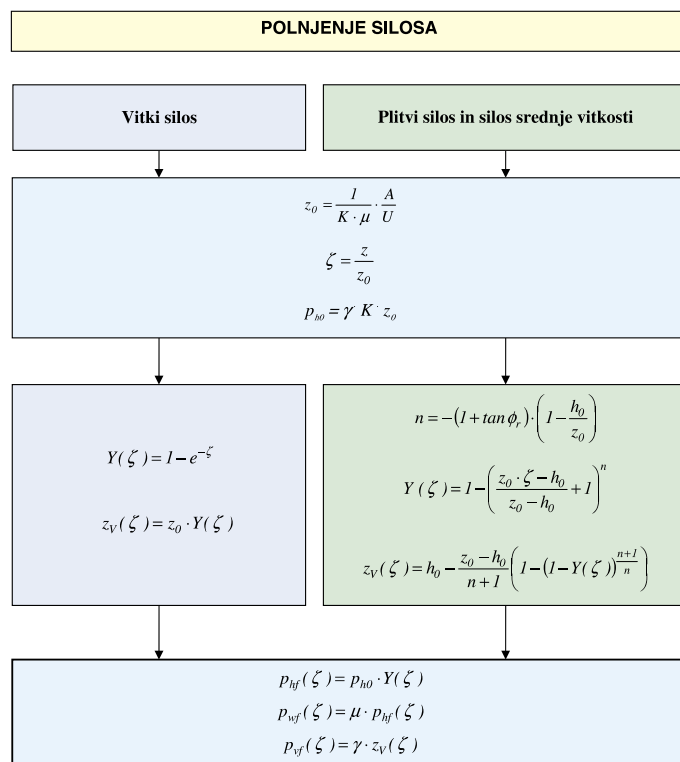


Diagram 1.1

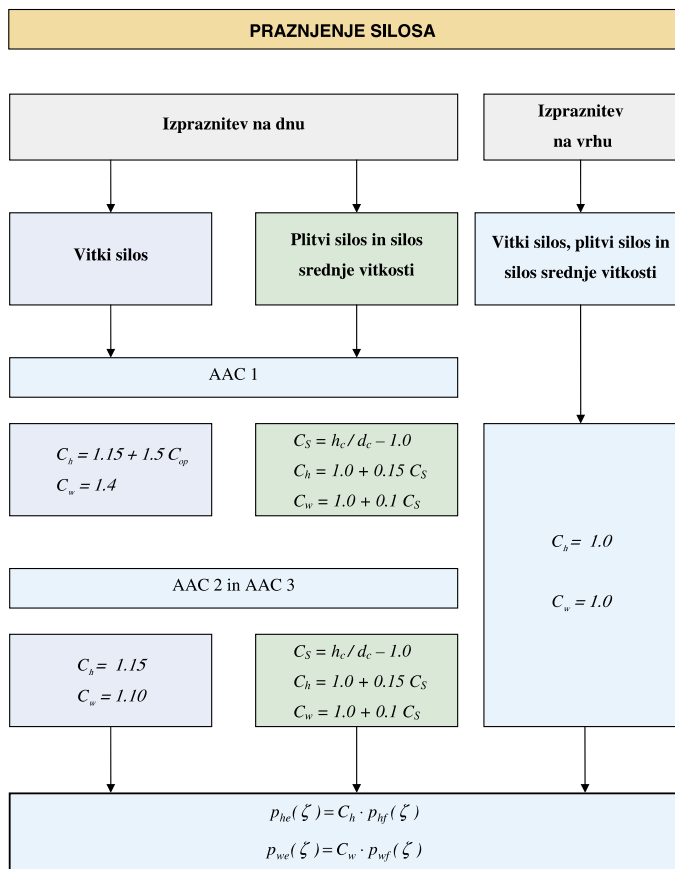


Diagram 1.2

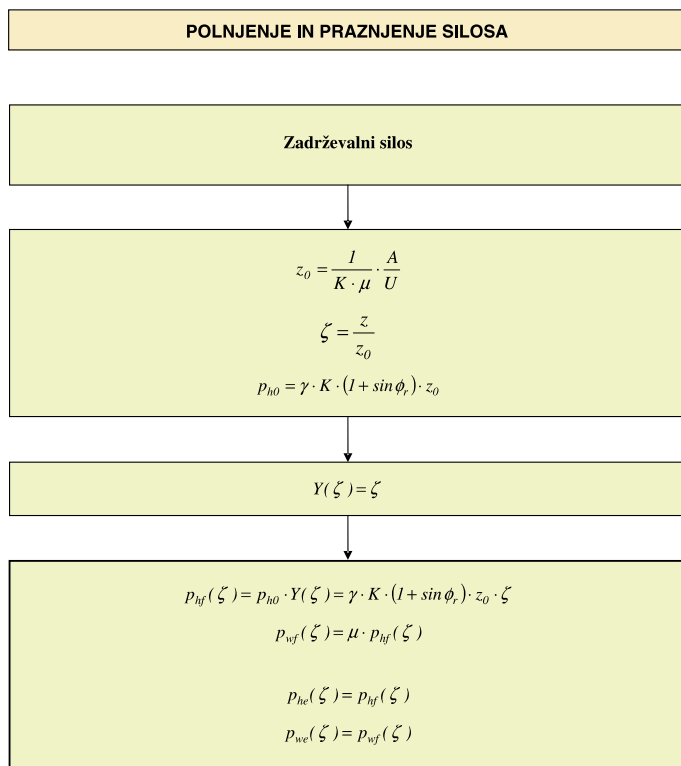


Diagram 1.3

7. korak: Pritiski na lijak

Pritiske na steno lijaka se določi po diagramu 2 za obe kombinaciji materialnih parametrov iz preglednice 8: kombinacija 4 se nanaša na določitev maksimalnega pritiska p_n in maksimalnega trenja p_t pri polnjenju, kombinacija 5 pa na določitev teh dveh količin pri praznjenju. Preden se lotimo izračuna maksimalnega pritiska p_n in maksimalnega trenja p_t za polnjenje in za praznjenje, moramo določiti maksimalni vertikalni pritisk v materialu pri polnjenju cilindra p_{vf} , saj sta p_n in p_t odvisna od njega. Določimo ga po diagramu 1.1 za kombinacijo materialnih parametrov, ki je podana v preglednici 8. Računamo njegovo vrednost na mestu prehoda iz cilindra v lijak, tj. pri $\xi = h_c/z_0$. Pri dotekanju materiala v silos in pri iztekanju materiala iz silosa so pritiski na stene lijaka večji, kot so, če material miruje. To dejstvo se upošteva s faktorjem povečave pritiska C_b (preglednica 9), s katerim se poveča maksimalni vertikalni pritisk v materialu pri polnjenju cilindra p_{vf} (glej diagram 2). Dinamična verzija faktorja C_b se uporabi, kadar obstaja velika verjetnost, da bo pri shranjevanju prišlo do dinamičnih učinkov. Ti se lahko pojavijo, če v vitkem silosu shranjujemo materiale, ki nimajo nizke kohezije (za več o tem glej EN 1991-4, poglavje 1.5.24 (CEN, 2006a)), ali če shranjujemo material, katerega zrna se lahko mehansko zaklinijo (npr. cementni klinker).

	AAC	Cb
Statičen (standarden)	1	1.3
	2 in 3	1.0
Dinamičen	1	1.6
	2 in 3	1.2

Preglednica 9 • Faktor povečave pritiska (C_b)

V diagramih 2.1, 2.2 in 2.3 je pritisku in trenju pri polnjenju dodan indeks f , pritisku in trenju pri praznjenju pa indeks e . Oznake na desni strani enačb so pojasnjene v preglednicah 2, 4 in na sliki 4.

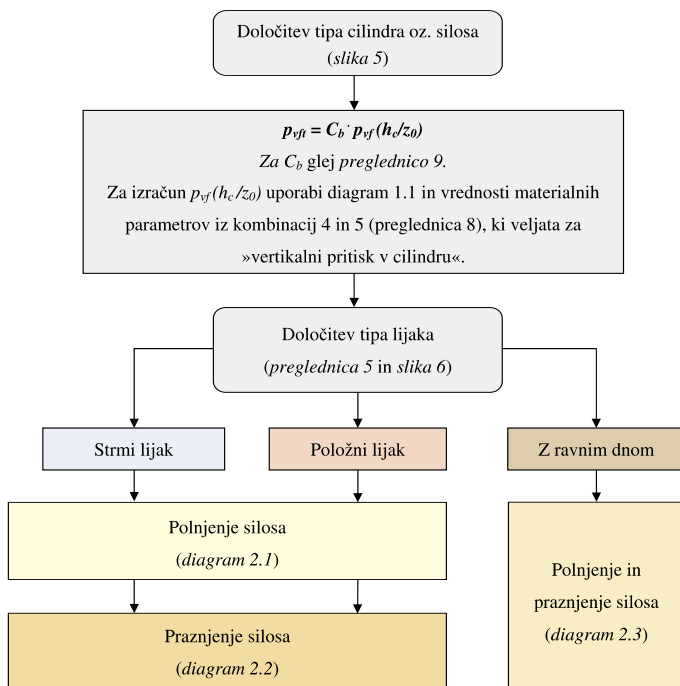


Diagram 2 • Določitev pritiska na steno lijaka

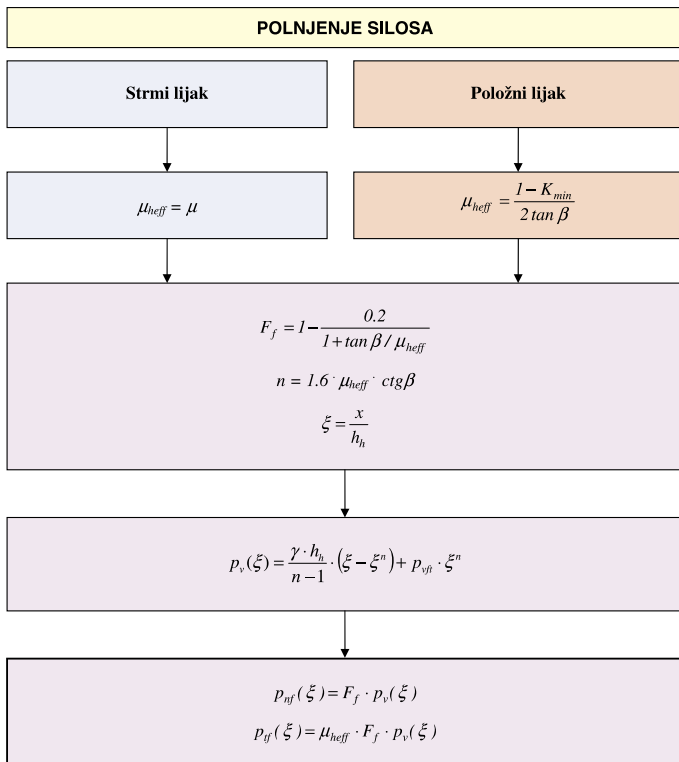


Diagram 2.1

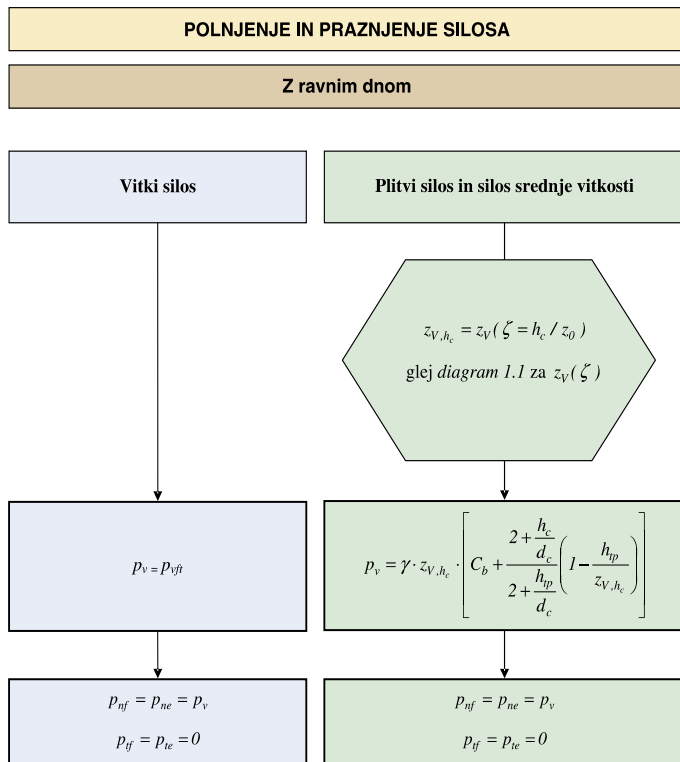


Diagram 2.3

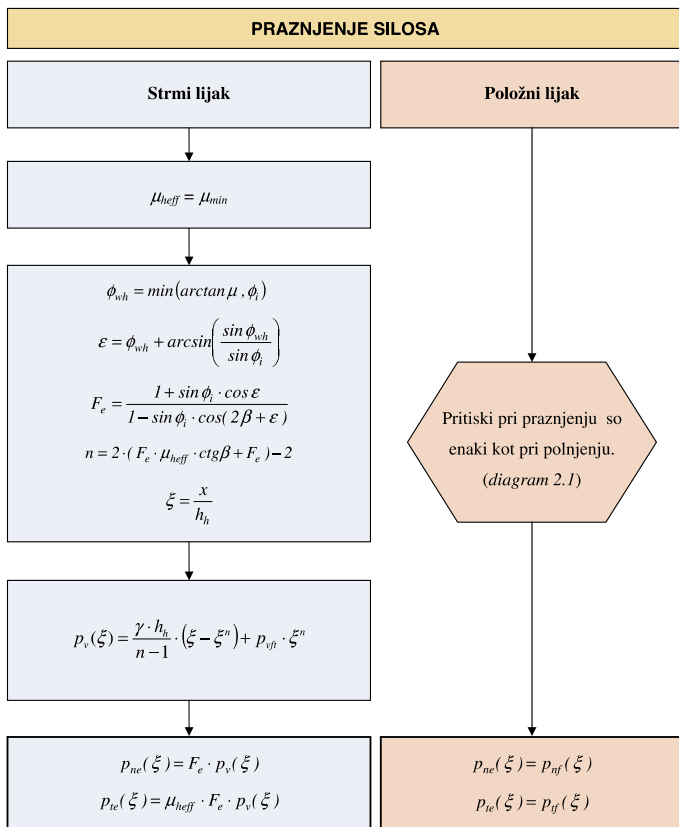


Diagram 2.2

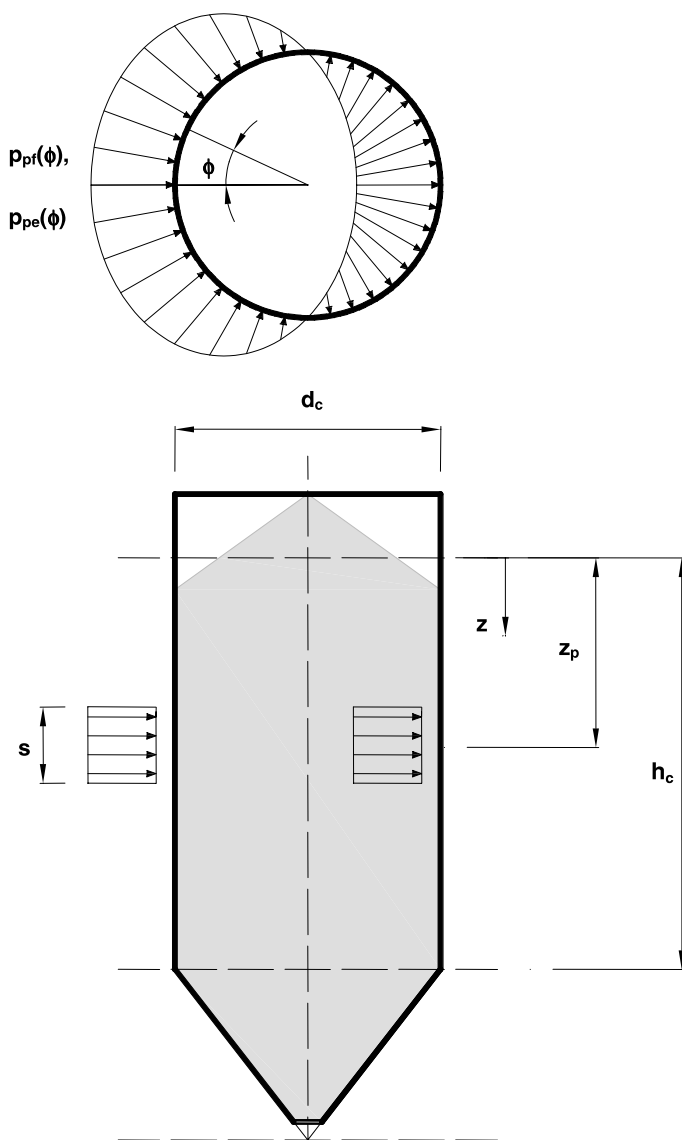
3 • NESIMETRIČNA OBEŽBA ZARADI POLNENJA IN PRAZNIENJA

Naključne, nesimetrične vplive, ki nastanejo pri polnjenju in praznjenju, se po standardu EN 1991-4 (CEN, 2006a) upoštevata z nesimetrično obtežbo, katere vplivi se pojavijo samo v cilindru. Upoštevati jo je treba pri vitkih, srednje vitkih in plitvih silosih, ki pripadajo razredu obremenitve 2 in 3. Pri razredu obremenitve 1 in pri zadrževalnem silosu je ni treba upoštevati.

Kadar spada obravnavani silos v razred obremenitve 2 in kadar je silos na vrhu pokrit s streho (oz. je na dnu in na vrhu dodan ojačitveni obroč), nesimetrijo upoštevamo tako, da povečamo osno-simetrične pritiske iz 2. poglavja. Za silose med procesom polnjenja velja:

$$p_{hf,u}(\zeta) = (1 + 0.5 C_{pf}) \cdot p_{hf}(\zeta) \quad (1)$$

$$p_{wf,u}(\zeta) = (1 + C_{pf}) \cdot p_{wf}(\zeta) \quad (2)$$



Slika 7 • Potek nesimetrične obtežbe pri silosih v razredu obremenitve 3

Za silose med praznjenjem pa velja:

$$p_{he,u}(\zeta) = (1 + 0.5 C_{pe}) \cdot p_{he}(\zeta) \quad (3)$$

$$p_{we,u}(\zeta) = (1 + C_{pe}) \cdot p_{we}(\zeta) \quad (4)$$

Vrednosti koeficientov C_{pf} in C_{pe} se določijo po diagramu 3. Indeks u v enačbah (1) do (4) označuje pritisk, pri katerem so upoštevani nesimetrični vplivi.

Kadar spada obravnavani silos v razred obremenitve 3, se nesimetrične vplive upoštevata z nesimetrično kosinusno obtežbo p_{pf} (polnjenje) oziroma p_{pe} (praznjenje), ki deluje na odseku dolžine s , na globini z_p (slika 7):

$$s = 0.2 \cdot d_c \quad (5)$$

$$z_p = \min(z_0, h_c) \quad (6)$$

Referenčno višino z_0 podaja diagram 1.1. Nesimetrično obtežbo moramo upoštevati skupaj s simetrično. Postopek za njeno določitev je v diagramu 3.

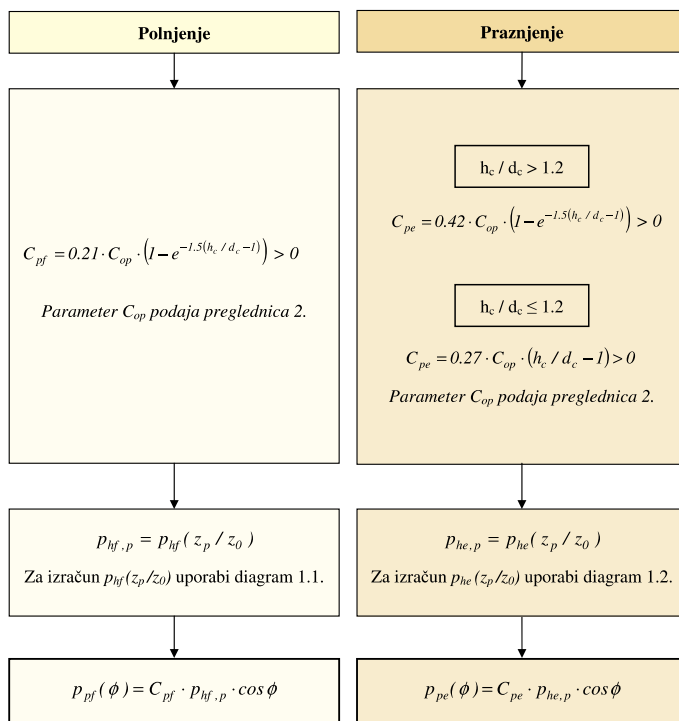


Diagram 3 • Določitev nesimetrične obtežbe pri silosih v razredu obremenitve 3

4 • SKLEP

Članek je mišljen kot pomoč pri projektiranju jeklenih osno-simetričnih silosov po Evrokodih, saj na pregleden način prikazuje postopek določitve pritiskov na stene silosa zaradi polnjenja in praznjenja po EN 1991-4 (CEN, 2006a) za silose različnih kapacitet in tipov. Celoten postopek je prikazan v sedmih zaporednih korakih in nekaj

diagramih, ki so strukturirani tako, da jih je mogoče uporabiti tudi kot algoritem za računalniški program (Petrovčič, 2008). Določitev poteka pripadajočih membranskih sil po posameznih delih silosa ter ilustrativni primer izračuna je podan v spremljajočem članku (Petrovčič et. al., 2009).

5 • LITERATURA

CEN, Eurocode 0, Basis of structural design, EN 1990, European Committee for Standardization, 2000.

CEN, Eurocode 1, Actions on structures – Part 1-4, General actions – Wind actions, EN 1991-1-4, European Committee for Standardization, 2005.

CEN, Eurocode 1, Actions on structures – Part 4, Actions on silos and tanks, EN 1991-4, European Committee for Standardization, 2006a.

CEN, Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance – Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1, European Committee for Standardization, 2004.

CEN, Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance – Part 4, Silos, tanks and pipelines, EN 1998-4, European Committee for Standardization, 2006b.

Guggenberger, W., Wallner, S., Beulbemessung diskret gelagerter dünnwandiger kreiszylindrischer Stahlsilokonstruktionen nach EN 1993-1-6. Stahlbau, 75, 9, 2006.

Petrovčič, S., Analiza in projektiranje tankostenskih cilindričnih silosov v skladu z Evrokod standardi, Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, FGG, 2008.

Petrovčič, S., Guggenberger, W., Brank, B., Jekleni silosi za sipke materiale, 2. del – Membranske sile pri polnjenju in praznjenju, Gradbeni vestnik, poslano v objavo, 2009.