

## STATISK BEREGNING AF STÅLTANK EFTER EN 14015

Programrevision  
august 2020

### Indhold:

1. Partialkoefficienter
  2. Karakteristiske laster
  3. Tilladelige spændinger
  4. Tanksvøb
  5. Foldning af svøb, afstivningsringe
  6. Tag
  7. Bund
  8. Egenvægt, snelast og vindlast
  9. Fundamentslaster
- Bilag nr. 1 :       Principskitse af tagkonstruktion på tanke med understøttet kugleskal, samt skitse af gitre og kronring.
- Bilag nr. 2 :       Tagkonstruktion for tank med selv bærende kugleskal.
- Bilag nr. 3 :       Vindlast på tag.

---

Projekt: Halsnæs Varme  
Ordre nr.: 13636  
Dok. nr.: ST13636            rev. -  
Beregnet af: mp  
Dato: 10/2-2021

---

Nominel volumen:    4.468 m<sup>3</sup>  
Oplagret medium:    vand  
Tankdiameter:       15,90 m  
Svøbshøjde:         22,50 m

### Beregningsgrundlag:

- EN 14015            Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above.  
November 2004.
- EN 1993-4-2        Eurocode 3 - Stålkonstruktioner - Del 4-2: Tanke  
1. udgave 29-05-2007.
- DS/EN 10025-2     Varmvalsede produkter af konstruktionsstål - Del 2: Tekniske leveringsbetingelser for ulegerede konstruktionsstål. 1. udgave 22-11-2004.
- DS/EN 1993-1-1    Eurocode 3: Stålkonstruktioner - Del 1-1: Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner. 2. udgave 24-07-2007
- DS/EN 1991-1-4    Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-4: Generelle laster - Vindlast  
2. udgave 22-06-2007.

---

Steeltank A/S  
H.E. Bluhmes Vej 79  
6700 Esbjerg  
tlf 75 45 08 11  
e-mail: [steeltank@steeltank.dk](mailto:steeltank@steeltank.dk)  
[www.steeltank.dk](http://www.steeltank.dk)

## 1. Partialkoefficienter: (kun vedr. beregning af tagkonstruktion)

Konsekvensklasse CC2:  $K_{FI} = 1,0$

Last [EN 1990:2007]	symbol	værdi
Egenvægt af ståledele	$\gamma_{Gj,sup}$	1,1
Egenvægt af isolering, beklædning etc.	$\gamma_{Gj,sup}$	1,1
Undertryk over væskeoverfladen	$\gamma_{Q1,sup}$	1,0
Vindlast	$\gamma_{Q1,sup}$	1,5
Snelast	$\gamma_{Q1,sup}$	1,5
Faktor, andre variable laster end hovedlast	$\psi_0$	0,6
Modstandsegenskaber [EN 1993-1-1:2007]		
Bæreevne, spær	$\gamma_{M1}$	1,2

## 2. Karakteristiske laster:

Last	symbol	værdi	enhed
Rumvægt af oplagret væske	W	1,00	kg/l
Isolering og beklædning på tag	G2c	125	N/m <sup>2</sup>
Designtryk	p	30,0	mbar
Prøvetryk	pt	33,0	mbar
Undertryk over væskeoverfladen	Puc	5,0	mbar
Vindlast, terrænklasse Z0 = 0,05, Vb = 24 m/s (peak)	qp	1.044	N/m <sup>2</sup>
Snelast (sk = 0,9 kN/m <sup>2</sup> , μ3 = 0,8, Ce = Ct = 1,0)	Psc	720	N/m <sup>2</sup>
Tillægslast på tag	Ppc	-	N/m <sup>2</sup>

## 3: Tilladelige spændinger:

Designtemperatur for bærende ståledele:	T =	98 °C
S235JRG2 (EN 10025)		
flydespænding ved 20°C		235 N/mm <sup>2</sup>
tilladelig designspænding ved 98 °C	S =	156,7 N/mm <sup>2</sup>
tilladelig testspænding ved 98 °C	St =	176,3 N/mm <sup>2</sup>
flydespænding ved 98 °C (tagberegning)	fy =	190 N/mm <sup>2</sup>
S355J2G3 (EN 10025)		
flydespænding ved 20°C		355 N/mm <sup>2</sup>
tilladelig designspænding ved 98 °C	S =	236,7 N/mm <sup>2</sup>
tilladelig testspænding ved 98 °C	St =	260,0 N/mm <sup>2</sup>
E-modul	E =	210.000 N/mm <sup>2</sup>
E-modul ved 98°C	Et =	210.000 N/mm <sup>2</sup>

## 4: Tanksvøb:

Forudsætninger:

Diameter ..... D = 15,90 m  
 Svøbshøjde ..... H = 22,50 m  
 Hydraulisk trykhøjde over tankbund ..... Hd = 22,50 m

## Pladetykkelse i svøb:

Rangene nummereres i = 1, 2, 3...N fra neden.

Min. pladetykkelse udregnes som den største af følgende værdier

$$e_c = \frac{D}{20S} \{98W(H_c - 0,3) + p\} + c + c_1 \geq \min e \quad *)$$

$$e_t = \frac{D}{20S_t} \{98W_t(H_c - 0,3) + p_t\} + c_1 \geq \min e \quad *)$$

hvor:

H<sub>c</sub> = højde i [m] fra underkant rang til væskeoverfladen.

W = max. densitet af oplagret væske [kg/l]

W<sub>t</sub> = max. densitet af testmedium = 1,0 kg/l (vand)

c = korrosionstillæg på 0 mm

c<sub>1</sub> = minustolerance på pladetykkelsen i h.t. EN 10029 kl. A \*\*)

min e = minimumspladetykkelsen på 6 mm efter EN 14015.

i	Højde mm	H <sub>c</sub> mm	mm	Stål	St N/mm <sup>2</sup>	S N/mm <sup>2</sup>	e <sub>t</sub> mm	e <sub>c</sub> mm	e, valgt mm
1	-	22.500	2000	S355J2+N	260,0	236,7	7,25	7,91	8,0
2	2.000	20.500	2000	S355J2+N	260,0	236,7	6,55	7,15	8,0
3	4.000	18.500	2000	S355J2+N	260,0	236,7	5,95	6,49	8,0
4	6.000	16.500	2000	S355J2+N	260,0	236,7	5,36	5,83	6,0
5	8.000	14.500	2000	S355J2+N	260,0	236,7	4,76	5,18	6,0
6	10.000	12.500	2000	S355J2+N	260,0	236,7	4,16	4,52	6,0
7	12.000	10.500	2000	S235JR	176,3	156,7	5,19	5,77	6,0
8	14.000	8.500	2000	S235JR	176,3	156,7	4,17	4,63	6,0
9	16.000	6.500	2000	S235JR	176,3	156,7	3,29	3,64	6,0
10	18.000	4.500	2000	S235JR	176,3	156,7	2,41	2,64	6,0
11	20.000	2.500	2000	S235JR	176,3	156,7	1,52	1,65	6,0
12	22.000	500	500	S235JR	176,3	156,7	0,64	0,65	6,0
	22.500	-							

\*) Hvor 2 tilstødende range er udført i materialer med forskellig flydspænding, som beskrevet i EN 14015 9.2.3, anvendes højden H<sub>c</sub> i stedet for (H<sub>c</sub>-0,3) i beregningen af den øvre rang.

\*\*) EN 10029 kl. A

t = 5: -0,4    t = 6: -0,4    t = 8: -0,5    t = 10: -0,5    t = 12: -0,5    t = 15: -0,6

## 5: Foldning af svøb:

Max. Undertryk .....  $p_v = 5,0$  mbar  
 Karakteristisk vindtryk .....  $V_w = 45$  m/s

Ækvivalent stabil højde af hver rang ved min. pladetykkelse,  $e_{min}$ :

$$H_e = h \left( \frac{e_{min}}{e} \right)^{5/2}$$

i	e mm	h m	He m	Σ He m
1	8,0	2,000	0,974	0,974
2	8,0	2,000	0,974	1,949
3	8,0	2,000	0,974	2,923
4	6,0	2,000	2,000	4,923
5	6,0	2,000	2,000	6,923
6	6,0	2,000	2,000	8,923
7	6,0	2,000	2,000	10,923
8	6,0	2,000	2,000	12,923
9	6,0	2,000	2,000	14,923
10	6,0	2,000	2,000	16,923
11	6,0	2,000	2,000	18,923
12	6,0	0,500	0,500	19,423

Ækvivalent fuld stabil højde ved  $e_{min}$ :  $HE = \Sigma He = 19,423$  m

Faktor  $K = \frac{95000}{3,563V_w^2 + 580p_v} = 9,392$

Maks. tilladelig afstand mellem afstivningsringe på højden HE:  $H_p = K \left( \frac{e_{min}^5}{D^3} \right)^{1/2} = 13,063$  m

Antal afstivningsringe 1

## 5.1: Afstivningsringe:

Placering af afstivningsring:

Ringen placeres således, at den ækvivalente afstand fra tankbund til ring er mindre end  $H_p = 13,063$  m.

For rang nr. 8 er	$\Sigma H_e =$	12,923	m
Forskel mellem max. $\Sigma h_e$ og $\Sigma h_e$	$dH_e =$	0,140	m
Fysisk højde	$dH = \frac{dH_e}{(e_{\min} / e)^{2,5}} =$	0,140	m

Højde til 1. ring	$H_1 = 8 * 2 + 0,14 =$	16,140	m
-------------------	------------------------	--------	---

Vindafstivningen udføres som et vinkeljernsprofil med min. dimension: 100 x 65 x 8

## 6: Tag:

Taget udføres som en understøttet kugleskal efter EN 1993-4-2, 11.2.2, "Self supporting roof with roof structure" (se fig. 1, 2, og 3 på bilag 1)

Kugleskallens radius	a =	23,850 m
Kuglekalottens højde	h =	1,364 m
Vinkel mellem vandret og tangent ved svøb	$\theta =$	19,47 °
Tagklædningens totale tykkelse	td =	5,0 mm
Heraf korrosionstillæg	tk =	0,0 mm
Antal hovedspær	n =	24
Spærlængde	L =	8.105 mm
Spærprofil		IPE 140
Egenvægt	g =	12,90 kg/m
Areal	A =	1.640 mm <sup>2</sup>
Inertimoment om den stærke akse	I <sub>y</sub> =	5.410.000 mm <sup>4</sup>
Modstandsmoment om den stærke akse	W <sub>y</sub> =	77.300 mm <sup>3</sup>
Inertiradius om den svage akse	i <sub>z</sub> =	16,5 mm
Egentyngde af spær, gitre, etc	P <sub>g</sub> =	176 N/m <sup>2</sup>
Buelængde mellem spær ved svøb	Br =	2,081 m
Antal sekundære spær	N <sub>2</sub> =	3
Antal afstivende gitre	N <sub>3</sub> =	3
Stålkvalitet i tagkonstruktion		S235

### Regningsmæssig last på tag:

Permanent last:

Egenvægt af tagklædning	G <sub>1d</sub> = 1,1 * G <sub>1c</sub> =	577,9 N/m <sup>2</sup>
Egenvægt af iso. + beklædning	G <sub>2d</sub> = 1,1 * G <sub>2c</sub> =	137,5 N/m <sup>2</sup>

---

I alt	G <sub>d</sub> =	715,4 N/m <sup>2</sup>
-------	------------------	------------------------

Variabel last:

Undertryk over væskeoverfladen:	P <sub>ud</sub> = 1,0 * P <sub>uc</sub> =	500 N/m <sup>2</sup>
Snelast:	P <sub>sd</sub> = 1,5 * P <sub>sc</sub> =	1080 N/m <sup>2</sup>
Tillægslast:	P <sub>pd</sub> = 1,0 * P <sub>pc</sub> =	0 N/m <sup>2</sup>

---

I alt:	P <sub>d</sub> =	1580 N/m <sup>2</sup>
--------	------------------	-----------------------

Samlet vertikal belastning:	p <sub>v,Ed</sub> = G <sub>d</sub> + P <sub>d</sub> =	2295,4 N/m <sup>2</sup>	> 1,2 kN/m <sup>2</sup>
-----------------------------	---	-------------------------	-------------------------

### 6.1: Hovedspær:

Vertikal kraft pr. spær:  $P_{Ed} = \beta * r^2 * p_{v,Ed} = \pi / n * (D/2)^2 * p_{v,Ed} =$  18.990 N

Normalkraft pr. spær:  $N_{Ed} = 0,375 * r/h * P_{Ed} = 0,375 * D/2/h * P_{Ed} =$  41.506 N

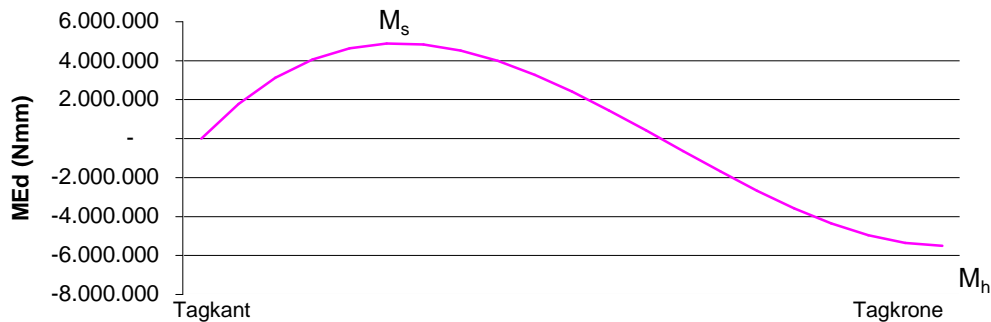
Faktor:  $\varepsilon = N_{Ed} * (0,6 * D / 2)^2 / \pi^2 / E / I_y =$  0,0842

Bøjningsmoment som funktion af afstanden fra tankcenter:

$$M_{Ed} = \frac{1}{3} \left( \frac{r}{1-\varepsilon} \right) \left[ 1 - \left( \frac{x}{r} \right)^3 - 1,10 \left( \frac{y}{h} \right) \right] P_{Ed}$$

, hvor y er kuppelhøjden i afstanden x fra tankcenter.

## Regningsmæssigt bøjningsmoment (Nmm)



$$M_h = -5.495.254 \text{ Nmm} \quad M_s = 4.884.101 \text{ Nmm}$$

Kritisk normalkraft  $N_{cr} = \pi^2 * E * I_y / (0,7 * l)^2 = 348.339 \text{ N}$

Det relative slankhedsforhold  $\lambda = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = 0,946$

Imperfektionsfaktor Søjletilfælde a:  $\alpha = 0,21$

Faktor  $\phi = 0,5 * (1 + \alpha * (\lambda - 0,2) + \lambda^2) = 1,026$

Søjlereduktionsfaktor  $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0,703$

Regningsmæssig bæreevne af centralpåvirket med sikkerhedsfaktor  $\gamma_{M1} = 1,20$   $N_{b,R} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = 182.588 \text{ N}$

Momentforhold  $\alpha_s = M_s / M_h = -0,889$

Forhold mellem momenter i spærender  $\psi = 0,000$   
 Momentfordelingsfaktor  $C_{my} = 0,1 * (1 - \psi) - 0,8 * \alpha_s = 0,811 \geq 0,4$

Faktor  $n_y = N_{Ed} / N_{b,Rd} = 0,227$

Interaktionsfaktor  $k_{yy} = C_{my} * (1 + 0,6 * \lambda_y * n_y) = 0,916$   
 $< k_{yy} = C_{my} * (1 + 0,6 * n_y) = 0,922$   
 $\Rightarrow k_{yy} = 0,916$

Kontrol af bæreevne  $\frac{N_{Ed}}{\chi * A * f_y} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed}}{W_y * f_y} = 0,64 < 1$

Kontrol af min. inertimoment  $I_y \geq \frac{N_{Ed} * R^2}{\pi^2 * E_t} = 1.265.695 \text{ mm}^4 \quad \text{OK}$

## 6.2: Sekundære spær:

Afstanden fra svøb til 1. sekundære spær:  $a_1 = 1809 \text{ mm}$

Øvrige sekundære spær fordeles ligeligt med afstanden:  $a_2 = 1782 \text{ mm}$

Spæret udføres af et vinkelprofil  $50 * 50 * 5$ , der påsvejses undersiden af hovedspærrets øverste flange. (Se fig. 1, bilag 1)

## 6.3: Afstivende gitre:

Gitrene udføres af 2 vinkelprofiler  $50 * 50 * 5$ , der påsvejses hovedspærrets øverste og underste flanger. Vinkelprofilerne sammensvejses med fladstål så udbøjning sker om y-aksen. Der monteres gitre i 3 fag:  $N_3 = 3$ . (Se bilag 1)

## 6.4: Kronering:

Kroneringen er vist på fig. 2, bilag 1

Kroneringens radius	$r =$	795 mm
Bredde af øvre og nedre plade	$b_K =$	300 mm ( $> 2 * h_K$ )
Tykkelse af plader (krop - flanger)	$t_K =$	8 mm
Afstand mellem øvre og nedre plade	$h_K =$	148 mm

Areal af nedre og øvre plade  $A_1 = A_2 = t_K * b_K = 2.400 \text{ mm}^2$

Kontrol af bærevne

$$h_K^2 * \left( \frac{A_1 * A_2}{A_1 + A_2} \right) \geq \frac{I_y}{2 * (\pi/n)}$$

$$\Leftrightarrow 26.284.800 > 20.664.678 \text{ OK}$$

## 6.5: Kantring:

Langs svøbets overkant påsvejses et profil til at optage tagkonstruktionens vandrette reaktioner.

Nødvendigt kompressionsareal i h.t. EN 14015, 10.5.2  $A = \frac{50 * p_c * R^2}{S_c * \tan \theta} = 1.937 \text{ mm}^2$

, hvor den tilladelige spænding  $S_c = 120 \text{ N/mm}^2$  og  $p_c$  er designtrykket modregnet vægt af tagplader.

Der vælges et UNP 160 profil med areal  $2400 \text{ mm}^2$ .

## 7. Tankbund

Udføres med ringformede bundkantplader under tanksvøbet.

Bundkantplade (EN 14015, 8.3.1)  $e_a = 3,0 + e_1/3 + c$ , min. 6 mm  $\Rightarrow e_a = 6,0 \text{ mm}$

Bund i øvrigt  $6,0 \text{ mm}$



## 8. Egenvægt, snelast og vindlast

Tanken isoleres med 300 mm på svøb og tag. Vægt af isolering på tag og svøb er 25 kg/m<sup>3</sup>.  
Tanken beklædes med plader på svøb med en profilhøjde på k=20 mm og med en vægt på 5 kg/m<sup>2</sup>.

Svøbshøjde inkl. evt. isolering	Hiso =	22,80 m
Tankdiameter inkl. evt. isolering	Diso =	16,50 m
Tyngde af svøb og tagkonstruktion	Gst =	678.595 N
Tyngde af beklædninger	Gbe =	175.247 N
Egenvægt af tank + beklædning	G = Gbe + Gst =	853.841 N
Linielast på fundament	pl =	17,1 kN/m

Snelast, linielast på fundament  $sl = Psc * Diso^2 / 4 / D = 3,1 \text{ kN/m}$

Vindlast (DS/EN 1991-1-4)

Terrænfaktor	$k_r = 0,19 * (Z0/0,05)^{0,07} =$	0,19
Ruhedsfaktor i højden Hiso	$c_r = k_r * \ln(Hiso/Z0) =$	1,163
Middelvindhastighed	$v_m = c_r * Vb =$	27,9 m/s
Turbulensintensiteten	$I_v = k_r * Vb / v_m =$	0,163
Peakhastighedstryk	$q_p = (1+7 * I_v) * 0,5 * 1,25 * v_m^2 / 1000 =$	1,044 kN/m <sup>2</sup>
Peakvindhastighed	$vp = (2 * q_p * 1000 / 1,25)^{1/2} =$	40,9 m/s
Reynolds tal	$Re = Diso * vp / 0,000015 =$	4,50E+07
omstrømning	$c_{f,0} = 1,2 + 0,18 * \log(10 * k / Diso / 1000) / (1 + 0,4 * \log(Re / 1E5)) =$	0,99
Slankhed	$\lambda = Hiso / Diso =$	1,382
Endestrømsfaktor	$\Psi_\lambda =$	0,610
Kraftformfaktor	$c_f = c_{f,0} * \Psi_\lambda =$	0,61
Referencehøjde	zs	13,68 m
Turbulensintensitet	Iv(zs)	0,178
Længdeskala	(B.1) L(zs)	74,32 m
Baggrundsfaktor	(C.2) B <sup>2</sup>	0,634
Konstruktionsfaktor	(6.3) cs	0,89
Konstruktionsfaktor	cd	1,00
Formfaktor for friktion på tagflade, DS EN 1991-1-4 tabel 7.10	c <sub>fr</sub> =	0,04

Sug på tagets overside er fastlagt i DS/EN 1991-1-4 fig. 7.12. Tilnærmet og på den sikre side anvendes i stedet DS 410, annek C.5.2 (se bilag 3).

Mål a	$0,2 < Hiso / Diso = 1,38 < 2 \Rightarrow a = 0,15 * Hiso + 0,2 * Diso =$	6,72 m
Vinklen V er	V =	158,62 °
Arealet A1	$A1 = \pi / 4 * Diso * 0,2 * a =$	17,42 m <sup>2</sup>
Arealerne A1+A2	$A1+A2 = Diso^2 / 8 * (V * \pi / 180 - \sin V) =$	81,81 m <sup>2</sup>
Arealet A = A1+A2+A3	$A = \pi / 4 * Diso^2 =$	213,82 m <sup>2</sup>
Excentriciteten e	$e = K * K^2 / (12 * A1 + A2) =$	4,34 m

Sug på tag :

Kraften Pc1	$Pc1 = 0,5 * q_p * A1 =$	9.093 N
Kraften Pc2	$Pc2 = 0,5 * q_p * (A1 + A2) =$	42.712 N
Kraften Pc3	$Pc3 = 0,5 * q_p * A =$	111.630 N
Samlet sug på tag:		163,4 kN

Tangentiel vindkraft på tag

Tangentiel vindkraft på tag	$F_{fr} = c_{fr} * q_p * \pi / 4 * Diso^2 =$	8.930 N
Vindlast på svøb	$F_w = c_s * c_d * c_f * q_p * Hiso * Diso =$	210.886 N
Tværkraft ved fod ved maks. vindlast på hele højden	$Q_v = F_w + F_{fr} =$	219,8 kN
Moment om tankmidte	$M = Pc1 * Diso / 2 + Pc2 * e + F_{fr} * Hiso + F_w * Hiso / 2 =$	2.868,2 kNm

Ved iteration over tankens højde fås følgende reducerede, faktiske vindlaster:

Qv =	168,0 kN
M =	2.588,9 kNm

## 9. Fundamentslaster

Fladelast hidrørende fra det oplagrede medies egenvægt:  $p_f = 225,0 \text{ kN/m}^2$

Linielasten hidrørende fra egenvægt af stål og evt. beklædning:  $p_l = 17,1 \text{ kN/m}$

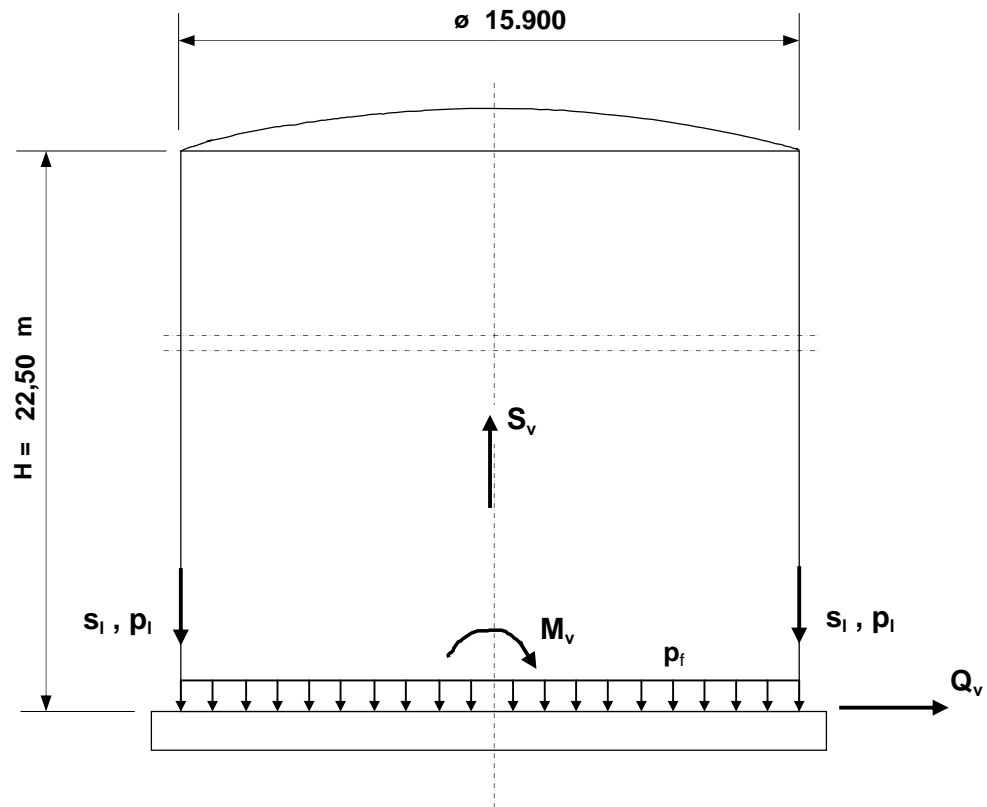
Linielast fra snelast:  $s_l = 3,1 \text{ kN/m}$

Vindlast

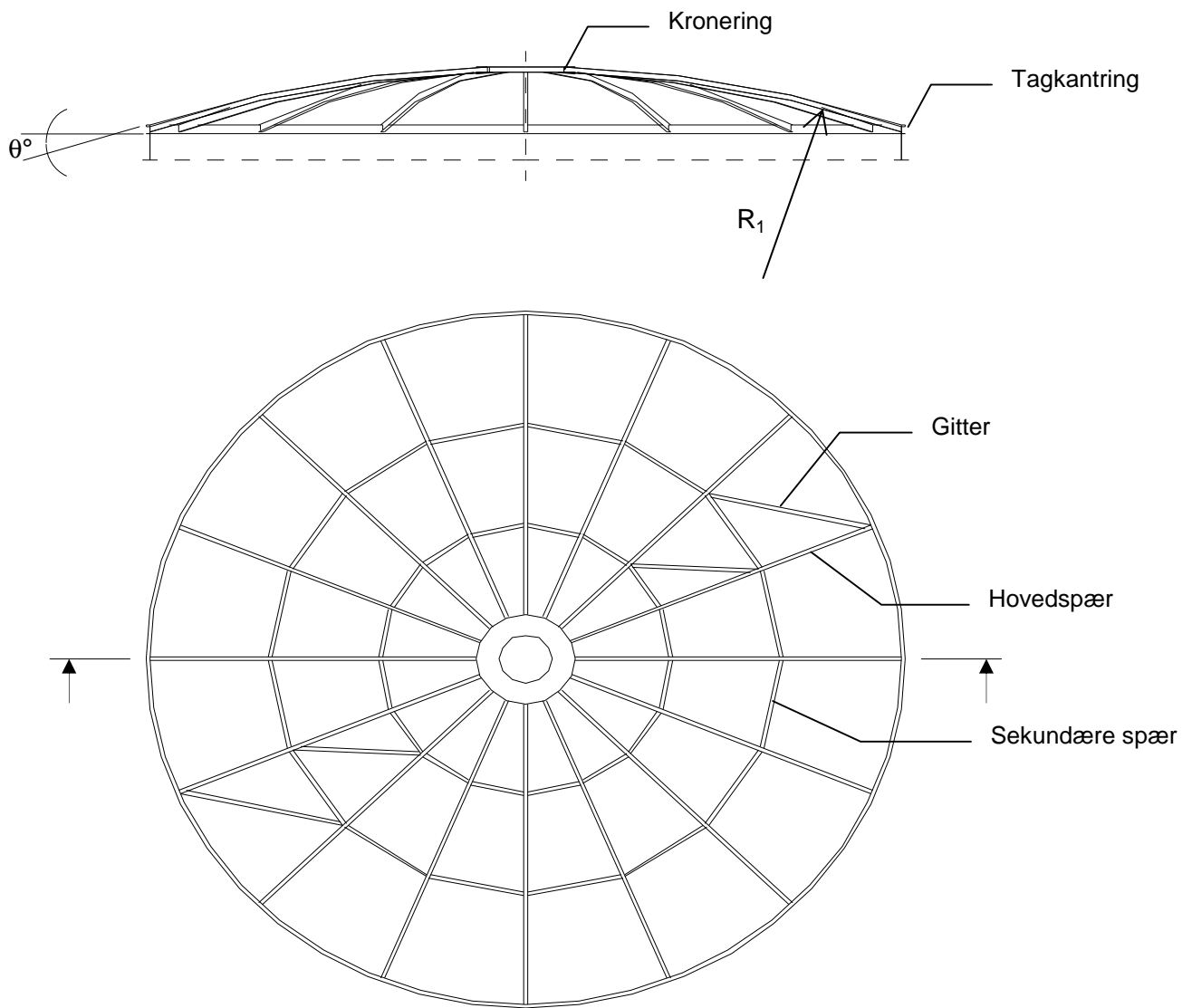
Enkeltkraft p.g.a. sug på tag:  $S_v = 163,4 \text{ kN}$

Tværkraft ved fod:  $Q_v = 168,0 \text{ kN}$

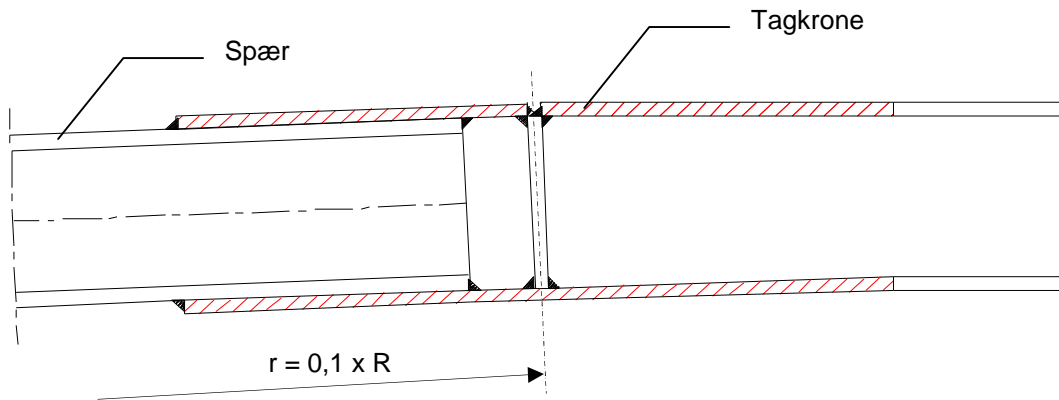
Moment om tankmidte:  $M_v = 2.588,9 \text{ kNm}$



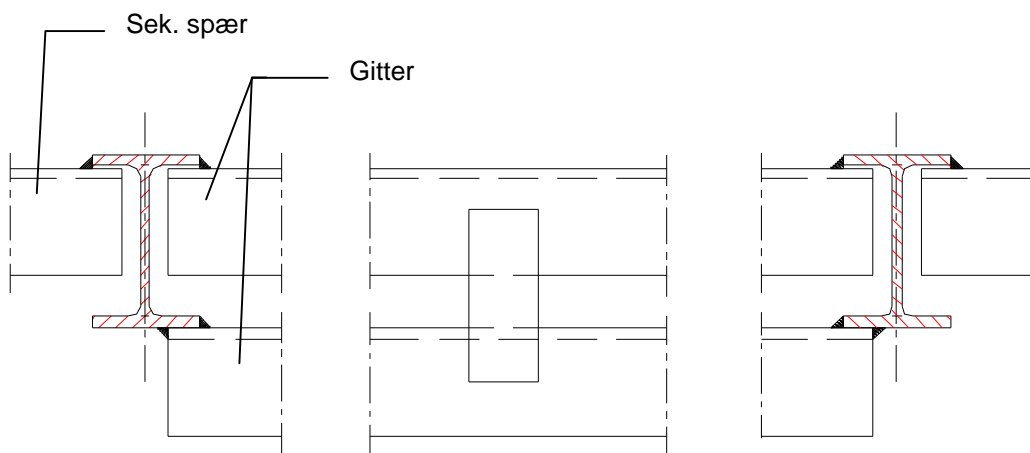
**NB!** Alle laster er karakteristiske.



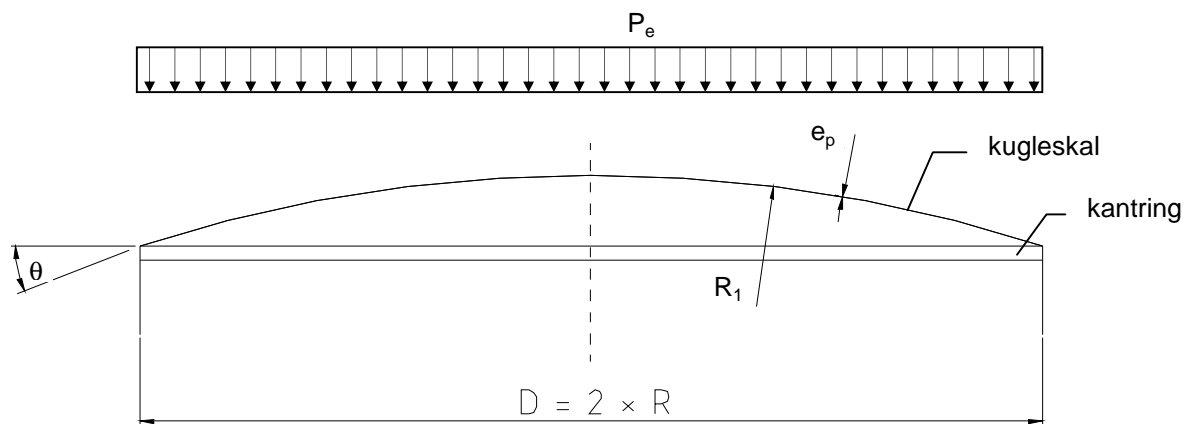
Figur 1.  
Principskitse af tagkonstruktion på tanke med understøttet kugleskal



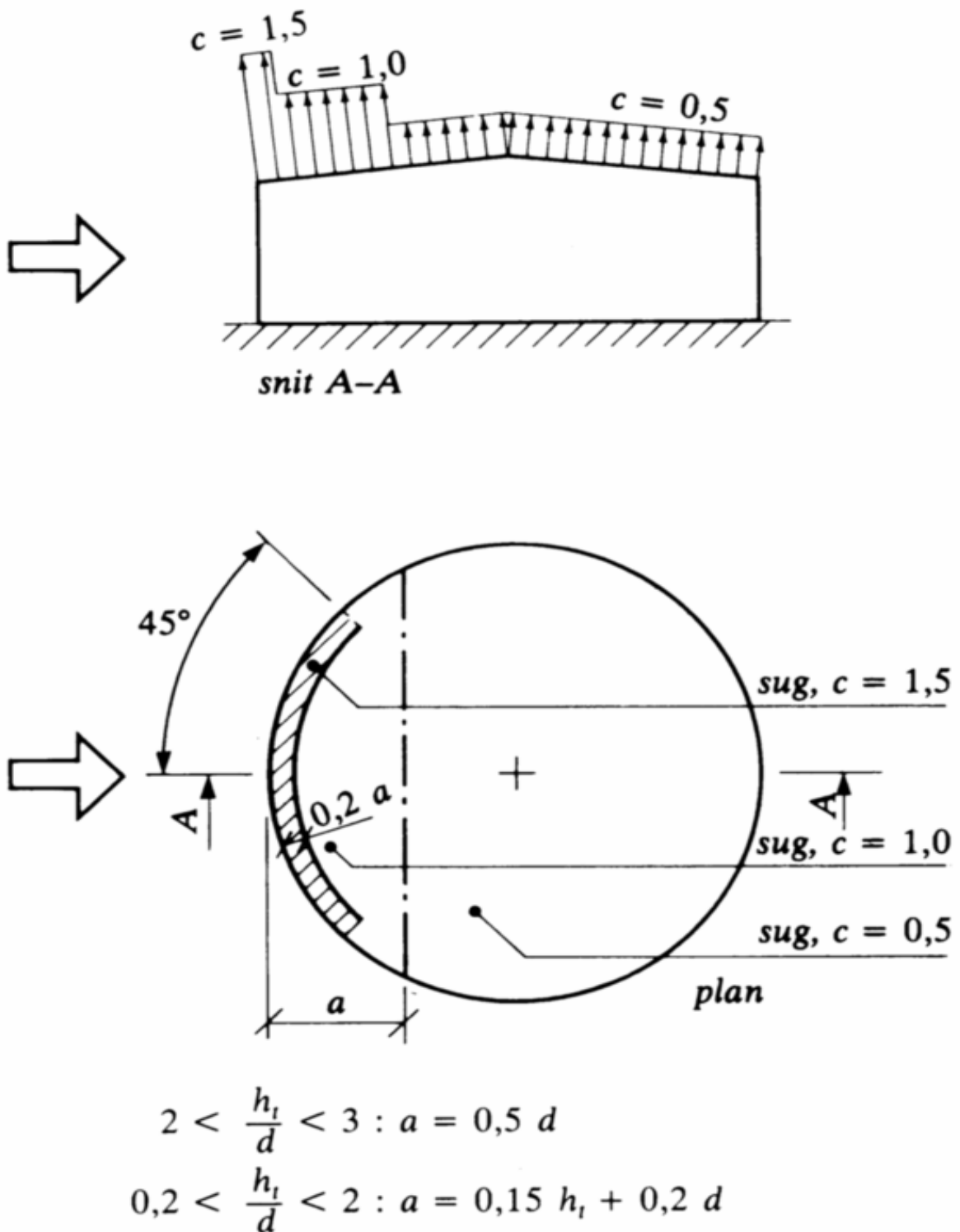
Figur 2.  
Skitse af tagkrone.



Figur 3.  
Påsvejsning af vindgitter og sekundære spær til hovedspær.



Figur 1.  
Tagkonstruktion for tank



Figur 1.  
Vindlast på tag