

## R: Loddbelastning av sjøledninger

### *Om loddbelastning av sjøledninger*

Et PE-rør som installeres i vann eller våt og løs myr må belastes slik at det ikke flyter opp. Oftest benyttes betonglodd for å få stor nok vekt. Man må ta hensyn til rørets oppdrift, maksimal andel luft eller annen gass i røret (luftfyllingsgrad, belastningsgrad) samt strøm- og bølgekrefter.

Dimensjonerende luftfyllingsgrad vil variere med mediet i røret og ønsket sikkerhet. Normalt oppstår det lite luft eller gass i sjøledninger. Luft kan tilføres ledningen på grunn av feil utforming av pumpearrangementet. Er hastigheten på mediet stor nok vil gassen rives med fra ansamlinger i høybrekk.

I havnebassenger, i bølgesonen og på steder med mye strøm kan det være nødvendig å belaste røret mye – kanskje for mer enn 100 % luftfylling. Svært stor belastning kompliserer senkeprosessen. Ved mer enn 100 % belastning vil røret synke selv om det er helt luftfylt og midlertidige oppdriftslegemer må benyttes før og under senking. Det er et godt alternativ å tilføre belastning etter senking – ved å ettermontere lodd eller legge betongmadrasser over ledningen.

Det kan også være nødvendig å bruke oppdriftslegemer og/eller fjerne belastning der røret ligger på tvers av forsenkninger på sjøbunnen.

Normalt hentes opplysninger om loddbelastning fra tabeller. I det etterfølgende vil vi se på teorien bak og på beregninger av nødvendig belastning som følge av rørets oppdrift og luftfyllingsgrad. Vi benytter Arkimedes lov om at oppdriften er lik vekten av den fortrenge væskemengde minus vekten av det loddbelasta røret med innhold. Ved luftfylling/belastningsgrad over 90 % bør man utføre mer nøyaktige beregninger – for eksempel kan betongens tyngdetetthet variere og selve loddets tyngdetetthet variere med andelen jern i loddet.

### *Formler*

Vekt av fortrenge væskemengde (oppdrift):

$$M_{\text{sjø}} = \rho_{\text{sjø}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ [kg/m]}$$

$\rho_{\text{sjø}}$ : Sjøvannets tyngdetetthet [kg/m<sup>3</sup>]

- 1 035 kg/m<sup>3</sup> for sjøvann med høyt saltinnhold (åpent hav)
- 1 025 kg/m<sup>3</sup> for sjøvann med lavt saltinnhold (inne i en lang fjord)
- 1 000 kg/m<sup>3</sup> for ferskvann

D: Rørets utvendige diameter [m]

Vekt av rør:

$$m_{\text{rør}} = \rho_{\text{rør}} \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \text{ [kg/m]}$$

$\rho_{\text{rør}}$ : Rørmaterialets tyngdetetthet – 950 til 960 kg/m<sup>3</sup> for PE 100

d: Rørets innvendige diameter [m]

Vekt av rør med innhold:

$$M_{\text{rør}} = m_{\text{rør}} + a \cdot m_{\text{luft}} + \rho_{\text{vann}} \cdot (1 - a) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ [kg/m]}$$

$m_{\text{luft}}$ : Vekten av luften i røret er neglisjerbar og kan settes lik null

$\rho_{\text{vann}}$ : Vannets tyngdetetthet – 1 000 kg/m<sup>3</sup> for ferskvann

a: Luftfyllingsgrad\*. Oppgis i prosent, men settes inn som desimaltall: 30 % => 0,3

Normale luftfyllingsgrader:

- Vannledninger og inntaksledninger: 20 - 40 % (a: 0,2 - 0,4)
- Utslippsledninger: 30 - 50 % (a: 0,3 - 0,5)
- Spillvann med jevn belastning, kort oppholdstid: 30 - 70 % (a: 0,3 - 0,7)
- Spillvann med ujevn belastning, lang oppholdstid: Må vurderes i hvert enkelt tilfelle

d: Rørets innvendige diameter [m]

- \* Valg av luftfyllingsgrad er avhengig av blant annet maksimum mengde luft i røret, strømkrefter og bølgekrefter og må vurderes nøye. I spesielle tilfeller må man belaste ledningen for mer enn 100 % luftfylling.

Nødvendig belastning pr meter rør (vekt i luft):

$$M_{\text{belastning}} = f \cdot (M_{\text{sjø}} - M_{\text{rør}}) \text{ [kg/m]}$$

f: Omregningsfaktor fra betongvekt i vann til vekt i luft [ ]

- 1,75 for sjøvann
- 1,71 for ferskvann

$$f = \frac{\text{Tetthet betong}}{\text{Tetthet betong} - \text{Tetthet sjø}} \text{ [ ]}$$

Vi antar her at tyngdetetthet til betong er 2400 kg/m<sup>3</sup> – som er en vanlig verdi. Men denne kan variere. Loddets tyngdetetthet påvirkes også av innholdet av metall i armering og bolter og bør undersøkes nærmere i kritiske tilfeller.

Senteravstand mellom loddene (c-c):

$$c - c = \frac{M_{\text{lodd}}}{M_{\text{belastning}}} \text{ [m]}$$

Senteravstanden bør normalt være mellom 2,0 og 8,0 meter avhengig av blant annet dimensjon og belastningsgrad - minst på de minste dimensjonene. I enkelte tilfeller må dette vurderes nærmere.

For krav til betonglodd, samt alternative utforminger, se «BLF-norm for belastningslodd av betong til undervannsledninger».

**Eksempel:**

Loddbelastning pr meter av 315 mm PE 100 SDR 11 rør med 30 % luftfylling i sjø med tetthet 1030 kg/m<sup>3</sup>.

Vekten av den fortrenkte væske (oppdriften):

$$M_{\text{sjø}} = \rho_{\text{sjø}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1030 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\pi \cdot (0,315 \text{ m})^2}{4} = 80,3 \text{ kg/m}$$

Vekten av rør med innhold:

$m_{\text{rør}}$  beregnes ved å regne ut plastvolum for 1,0 meter rør og multiplisere dette med rørmaterialets tyngdetetthet – vi antar 955 kg/m<sup>3</sup> for PE 100. Dette rørets innvendige diameter (d) er 257,8 mm. Innvendig diameter kan også regnes ut ved hjelp av formelen  $d = D - 2 \cdot \frac{D}{\text{SDR}}$

$$m_{\text{rør}} = \rho_{\text{rør}} \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = 955 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\pi \cdot ((0,315 \text{ m})^2 - (0,2578 \text{ m})^2)}{4} = 24,6 \text{ kg/m}$$

$m_{\text{luft}}$  settes lik null. Luftfyllingsgraden 30 % settes inn som desimaltallet 0,30. Tettheten for vannet inne i røret er 1 000 kg/m<sup>3</sup>.

$$M_{\text{rør}} = m_{\text{rør}} + a \cdot m_{\text{luft}} + \rho_{\text{vann}} \cdot (1 - a) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$= 24,6 \text{ kg/m} + 0,30 \cdot 0 \text{ kg/m} + 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (1 - 0,30) \cdot \frac{\pi \cdot (0,2578 \text{ m})^2}{4} = 61,1 \text{ kg/m}$$

Nødvendig belastning (vekt i luft):

Nødvendig vektbelastning må da være større eller lik oppdriften ( $M_{\text{sjø}}$ ) minus vekt av rør med innhold ( $M_{\text{rør}}$ ). Og så må vi ta hensyn til oppdriften av betongloddet: Når betongen har tetthet 2 400 kg/m<sup>3</sup> og sjøvannet har tetthet 1 030 kg/m<sup>3</sup>, blir forholdstallet  $f = 1,75$ .

$$M_{\text{belastning}} = f \cdot (M_{\text{sjø}} - M_{\text{rør}}) = 1,75 \cdot (80,3 \text{ kg/m} - 61,1 \text{ kg/m}) = 33,6 \text{ kg/m}$$

Senteravstand c-c:

Et standard lodd med vekt 115 kg velges. Senteravstand mellom loddene blir:

$$c - c = \frac{M_{\text{lodd}}}{M_{\text{belastning}}} = \frac{115 \text{ kg}}{33,6 \text{ kg/m}} = 3,4 \text{ m}$$

### Tabeller loddbelastning

Loddbelastning for PE 100 rørledninger med ferskvann i åpen sjø:

D [mm]	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 7,4
32			0,06+a·1,08		0,06+a·0,93	
40			0,09+a·1,70		0,10+a·1,46	
50			0,14+a·2,66		0,15+a·2,29	
63			0,22+a·4,22		0,25+a·3,63	
75			0,31+a·5,99		0,35+a·5,18	
90			0,45+a·8,62		0,50+a·7,45	
110	0,61+a·14,2	0,64+a·13,6	0,67+a·12,9	0,70+a·12,1	0,75+a·11,1	0,75+a·11,0
125	0,79+a·18,3	0,82+a·17,6	0,86+a·16,7	0,91+a·15,6	0,96+a·14,4	0,99+a·13,9
140	0,99+a·22,9	1,03+a·22,0	1,08+a·20,9	1,14+a·19,6	1,21+a·18,1	1,27+a·16,6
160	1,29+a·29,9	1,35+a·28,7	1,41+a·27,3	1,49+a·25,6	1,58+a·23,5	1,66+a·21,8
180	1,63+a·38,0	1,70+a·36,4	1,78+a·34,6	1,88+a·32,3	2,00+a·29,8	2,10+a·27,6
200	2,02+a·46,8	2,10+a·44,9	2,20+a·42,7	2,32+a·40,0	2,47+a·36,8	2,61+a·33,5
225	2,55+a·59,3	2,66+a·56,9	2,79+a·54,0	2,94+a·50,6	3,12+a·46,5	3,31+a·42,5
250	3,15+a·73,2	3,28+a·70,3	3,44+a·66,8	3,63+a·62,5	3,85+a·57,5	4,09+a·52,4
280	3,95+a·91,9	4,12+a·88,1	4,31+a·83,7	4,55+a·78,4	4,83+a·72,2	5,13+a·65,6
315	5,00+a·116	5,20+a·112	5,46+a·106	5,77+a·99,2	6,12+a·91,3	6,47+a·83,6
355	6,35+a·148	6,61+a·142	6,94+a·134	7,32+a·126	7,77+a·116	8,20+a·107
400	8,05+a·188	8,40+a·180	8,80+a·171	9,29+a·160	9,86+a·147	10,4+a·135
450	10,2+a·237	10,6+a·228	11,1+a·216	11,8+a·202	12,5+a·186	13,2+a·171
500	12,6+a·293	13,1+a·281	13,8+a·267	14,5+a·250	15,4+a·230	
560	15,8+a·368	16,5+a·353	17,3+a·335	18,2+a·314	19,3+a·289	
600	18,1+a·422	18,9+a·405	19,8+a·384	20,9+a·360	22,2+a·331	
630	20,0+a·465	20,8+a·447	21,8+a·424	23,1+a·397	24,5+a·365	
710	25,4+a·591	26,5+a·567	27,7+a·538	29,3+a·504	31,1+a·464	
800	32,2+a·750	33,6+a·720	35,2+a·684	37,2+a·640	39,5+a·589	
900	40,8+a·950	42,5+a·911	44,6+a·865	47,0+a·810	49,9+a·746	
1000	50,3+a·1172	52,5+a·1125	55,0+a·1068	58,1+a·1001	61,7+a·921	
1100	61,0+a·1417	63,5+a·1361	66,6+a·1292	70,3+a·1210		
1200	72,5+a·1688	75,5+a·1620	79,2+a·1538	83,6+a·1440		
1400	98,6+a·2298	103+a·2205	108+a·2093	114+a·1960		
1600	129+a·3001	134+a·2880	141+a·2734	149+a·2561		
1800	163+a·3798	170+a·3645	178+a·3461			
2000	201+a·4690	210+a·4500	220+a·4272			
2100	222+a·5170	231+a·4962				
2300	266+a·6202	277+a·5952				
2500	315+a·7328	328+a·7031				
D [mm]	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 7,4

Loddbelastning ( $M_{\text{belastning luftvekt}}$ ) i kg/m ( $\rho_{\text{betong}} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ) for PE 100 sjøledning ( $\rho_{\text{rør}} = 955 \text{ kg/m}^3$ ) i saltvann ( $\rho_{\text{sjø}} = 1030 \text{ kg/m}^3$ ) og med ferskvann ( $\rho_{\text{vann}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) i røret.  $a$  er luftfyllingsgraden.

Loddbelastning for PE 100 rørledninger med ferskvann i fjord:

D [mm]	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 7,4
32			0,05+a·1,08		0,06+a·0,93	
40			0,08+a·1,70		0,09+a·1,46	
50			0,12+a·2,66		0,14+a·2,29	
63			0,19+a·4,22		0,22+a·3,63	
75			0,27+a·5,99		0,31+a·5,18	
90			0,39+a·8,62		0,44+a·7,45	
110	0,53+a·14,2	0,55+a·13,6	0,58+a·12,9	0,62+a·12,1	0,66+a·11,1	0,67+a·11,0
125	0,68+a·18,3	0,71+a·17,6	0,75+a·16,7	0,80+a·15,6	0,86+a·14,4	0,88+a·13,9
140	0,85+a·22,9	0,89+a·22,0	0,94+a·20,9	1,00+a·19,6	1,07+a·18,1	1,14+a·16,6
160	1,12+a·29,9	1,17+a·28,7	1,23+a·27,3	1,31+a·25,6	1,40+a·23,5	1,48+a·21,8
180	1,41+a·38,0	1,48+a·36,4	1,56+a·34,6	1,66+a·32,3	1,78+a·29,8	1,88+a·27,6
200	1,74+a·46,8	1,83+a·44,9	1,93+a·42,7	2,05+a·40,0	2,19+a·36,8	2,34+a·33,5
225	2,20+a·59,3	2,31+a·56,9	2,44+a·54,0	2,60+a·50,6	2,78+a·46,5	2,96+a·42,5
250	2,72+a·73,2	2,85+a·70,3	3,01+a·66,8	3,20+a·62,5	3,42+a·57,5	3,66+a·52,4
280	3,41+a·91,9	3,58+a·88,1	3,78+a·83,7	4,02+a·78,4	4,29+a·72,2	4,59+a·65,6
315	4,32+a·116	4,52+a·112	4,78+a·106	5,08+a·99,2	5,44+a·91,3	5,79+a·83,6
355	5,48+a·148	5,74+a·142	6,07+a·134	6,45+a·126	6,90+a·116	7,33+a·107
400	6,95+a·188	7,30+a·180	7,70+a·171	8,19+a·160	8,76+a·147	9,30+a·135
450	8,80+a·237	9,24+a·228	9,75+a·216	10,4+a·202	11,1+a·186	11,8+a·171
500	10,9+a·293	11,4+a·281	12,0+a·267	12,8+a·250	13,7+a·230	
560	13,6+a·368	14,3+a·353	15,1+a·335	16,1+a·314	17,2+a·289	
600	15,7+a·422	16,4+a·405	17,3+a·384	18,4+a·360	19,7+a·331	
630	17,3+a·465	18,1+a·447	19,1+a·424	20,3+a·397	21,7+a·365	
710	21,9+a·591	23,0+a·567	24,3+a·538	25,8+a·504	27,6+a·464	
800	27,8+a·750	29,2+a·720	30,8+a·684	32,8+a·640	35,1+a·589	
900	35,2+a·950	36,9+a·911	39,0+a·865	41,5+a·810	44,4+a·746	
1000	43,5+a·1172	45,6+a·1125	48,2+a·1068	51,2+a·1001	54,8+a·921	
1100	52,6+a·1417	55,2+a·1361	58,3+a·1292	62,0+a·1210		
1200	62,6+a·1688	65,7+a·1620	69,3+a·1538	73,7+a·1440		
1400	85,2+a·2298	89,3+a·2205	94,4+a·2093	100+a·1960		
1600	111+a·3001	117+a·2880	123+a·2734	131+a·2561		
1800	141+a·3798	148+a·3645	156+a·3461			
2000	174+a·4690	182+a·4500	193+a·4272			
2100	192+a·5170	201+a·4962				
2300	230+a·6202	241+a·5952				
2500	272+a·7328	285+a·7031				
D [mm]	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 7,4

Loddbelastning ( $M_{\text{belastning luftvekt}}$ ) i kg/m ( $\rho_{\text{betong}} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ) for PE 100 sjøledning ( $\rho_{\text{rør}} = 955 \text{ kg/m}^3$ ) i saltvann ( $\rho_{\text{sjø}} = 1025 \text{ kg/m}^3$ ) og med ferskvann ( $\rho_{\text{vann}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) i røret.  $a$  er luftfyllingsgraden.

Loddbelastning for PE 100 rørledninger med ferskvann i ferskvann:

D [mm]	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 7,4
32			0,01+a·1,05		0,02+a·0,91	
40			0,02+a·1,66		0,03+a·1,43	
50			0,03+a·2,60		0,05+a·2,24	
63			0,05+a·4,12		0,08+a·3,55	
75			0,08+a·5,85		0,11+a·5,06	
90			0,11+a·8,42		0,16+a·7,28	
110	0,11+a·13,9	0,13+a·13,3	0,16+a·12,6	0,20+a·11,8	0,24+a·10,9	0,25+a·10,7
125	0,14+a·17,9	0,17+a·17,1	0,21+a·16,3	0,26+a·15,3	0,31+a·14,0	0,34+a·13,5
140	0,18+a·22,4	0,22+a·21,5	0,26+a·20,5	0,32+a·19,1	0,39+a·17,6	0,46+a·16,2
160	0,23+a·29,3	0,28+a·28,1	0,35+a·26,7	0,42+a·25,0	0,51+a·23,0	0,59+a·21,3
180	0,29+a·37,1	0,36+a·35,6	0,44+a·33,8	0,54+a·31,6	0,65+a·29,1	0,75+a·26,9
200	0,36+a·45,8	0,44+a·43,9	0,54+a·41,7	0,66+a·39,1	0,80+a·35,9	0,94+a·32,8
225	0,45+a·58,0	0,56+a·55,6	0,69+a·52,8	0,84+a·49,4	1,01+a·45,5	1,19+a·41,5
250	0,56+a·71,5	0,68+a·68,7	0,84+a·65,2	1,03+a·61,0	1,25+a·56,2	1,47+a·51,2
280	0,70+a·59,8	0,86+a·86,1	1,06+a·81,8	1,29+a·76,6	1,56+a·70,6	1,86+a·64,1
315	0,89+a·114	1,09+a·109	1,34+a·103	1,64+a·96,9	1,98+a·89,3	2,32+a·81,7
355	1,12+a·144	1,38+a·139	1,70+a·131	2,08+a·123	2,51+a·113	2,93+a·104
400	1,42+a·183	1,76+a·176	2,16+a·167	2,63+a·156	3,19+a·144	3,72+a·132
450	1,80+a·232	2,23+a·222	2,73+a·211	3,34+a·198	4,04+a·182	4,71+a·167
500	2,22+a·286	2,75+a·275	3,38+a·261	4,12+a·244	4,99+a·225	
560	2,79+a·359	3,44+a·345	4,23+a·327	5,17+a·306	6,25+a·282	
600	3,22+a·412	3,95+a·396	4,86+a·376	5,93+a·352	7,19+a·324	
630	3,53+a·455	4,35+a·436	5,36+a·414	6,53+a·388	7,92+a·357	
710	4,49+a·577	5,54+a·554	6,80+a·526	8,30+a·493	10,1+a·453	
800	5,69+a·733	7,02+a·704	8,62+a·668	10,5+a·625	12,8+a·576	
900	7,20+a·928	8,89+a·890	10,9+a·845	13,3+a·792	16,2+a·729	
1000	8,88+a·1146	11,0+a·1099	13,5+a·1043	16,4+a·978	20,0+a·900	
1100	10,8+a·1385	13,3+a·1330	16,3+a·1263	19,9+a·1182		
1200	12,8+a·1649	15,8+a·1583	19,4+a·1503	23,7+a·1407		
1400	17,4+a·2245	21,5+a·2155	26,4+a·2045	32,3+a·1915		
1600	22,8+a·2932	28,1+a·2814	34,5+a·2672	42,1+a·2502		
1800	28,8+a·3715	35,6+a·3561	43,6+a·3382			
2000	35,5+a·4583	43,9+a·4397	53,9+a·4174			
2100	39,2+a·5052	48,3+a·4848				
2300	47,0+a·6060	58,0+a·5816				
2500	55,5+a·7160	68,6+a·6871				
D [mm]	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 7,4

Loddbelastning ( $M_{\text{belastning luftvekt}}$ ) i kg/m ( $\rho_{\text{betong}} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ) for PE 100 sjøledning ( $\rho_{\text{rør}} = 955 \text{ kg/m}^3$ ) i ferskvann ( $\rho_{\text{sjø}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) og med ferskvann ( $\rho_{\text{vann}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) i røret.  $a$  er luftfyllingsgraden.

**Eksempel:**

Loddbelastning av en 315 mm PE 100 SDR 11 vannledning inne i en fjord med 30 % luftfylling ( $30\% = \frac{30}{100} = 0,30$ ).

Formelen hentes fra tabellen for saltvann med tyngdetetthet  $1025 \text{ kg/m}^3$ .

$$M_{\text{belastning luftvekt}} = 5,44 + (a \cdot 91,3) = 5,44 + (0,30 \cdot 91,3) = 32,8 \text{ kg/m}$$

Vi velger et standard lodd med luftvekt 115 kg.

$$\text{Senteravstand } c-c = \frac{M_{\text{lodd}}}{M_{\text{belastning luftvekt}}} = \frac{115 \text{ kg}}{30,0 \text{ kg/m}} = 3,8 \text{ m}$$