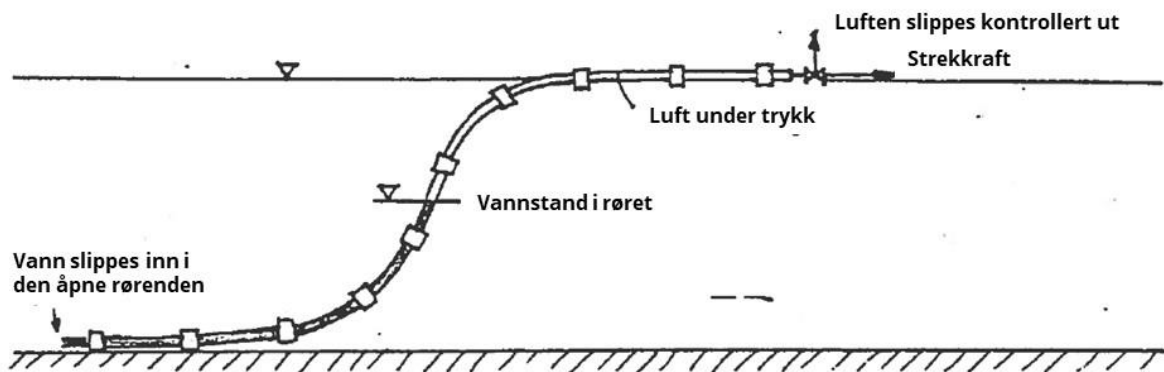


R: Beregninger ved senking av sjøledninger

Under senking av en sjøledning vil den bøyes ved overflaten og når den treffer sjøbunnen – som en S-kurve. Blir bøyen på røret for krapp er det risiko for at røret kollapser. Det vil også oppstå strekkrefter i røret. Derfor må vi regne på dette for å bestemme trekkekraft og riktig senkehastighet slik at vi unngår kollaps og for store strekkrefter over for lang tid.



Hovedprinsipper ved senking av sjøledninger

Men senkeprosessen er kritisk og mer komplisert enn bare å kontrollere bøyeradier og krefter på enkelt vis – spesielt i start- og slutfasen. Vi anbefaler derfor at beregninger i forbindelse med senking av rørledninger utføres og senkeprosedyre utarbeides av kompetente personer. Jo større dimensjon og SDR-klasse, jo mer krevende er det. I praksis brukes det gjerne beregningsprogrammer for dette som ivaretar kompleksiteten ved slike installasjoner. I dette kapitlet tar vi for oss de grunnleggende beregningsprinsippene.

Med bakgrunn i beregninger og andre praktiske forhold skal det utarbeides en senkeinstruks som sikrer riktig senkeprosess. Denne skal også inneholde prosedyrer som sikrer riktige tiltak når uforutsette hendelser oppstår – for eksempel ved loddras eller når senkeprosessen må avbrytes av en eller annen grunn. Se eget kapittel om dette. Senking av sjøledninger er komplisert – spesielt ved store leggedyp, ved store rør eller ved rør med høy SDR-klasse.

Det er hovedsakelig to metoder som benyttes:

- Mest vanlig er gravitasjonsmetoden - der vannet strømmer inn i den åpne rørenden og tilfører vekt som gjør at ledningen synker. Senkehastigheten justeres ved å evakuere luften gjennom en regulerbar ventil på en blindflens.
- En sjelden brukt metode, som ikke omtales nærmere, er å pumpe vann inn i ledningen. Men mange av de samme beregningene brukes. Blindflenser monteres i hver ende med påkoblede ledninger for kontrollert innpumping av vann og evakuering av luft. Metoden er mest aktuell for mindre dimensjoner fordi nødvendig pumpekapasitet da er av en rimelig størrelse. Denne metoden er mer skånsom når den gjøres riktig.

Metodene kan også kombineres – for eksempel når senkingen skal starte på dypt vann. Da pumpes vann inn i startfasen for å få ledningen ned til ønsket dyp. Etter tilkobling går man over til vanlig gravitasjonssenking.

Høye belastningsgrader kompliserer senkeprosessen. Og er rørledningen dimensjonert med loddbelastning for mer enn 100 % luftfylling vil den synke når den er helt luftfylt. I slike tilfeller må ledningen påmonteres oppdriftselementer som fjernes etter at rørledningen er senket – eller ytterligere vekt, i form av flere lodd eller betongmadrasser, ettermonteres. Beregning av loddbelastning er omtalt i et eget kapittel.

Balansetrykk og drivende trykk

Senkehastigheten justeres ved å slippe luften ut kontrollert slik at vannet fyller røret og den vannfylte delen av røret med belastningslodd synker. Det skal være et visst lufttrykk i røret for at forholdet mellom tyngde (neddrift) og oppdrift er riktig og rørledningen senkes kontrollert. Dette lufttrykket øker lineært med sjødybden. Ved balansetrykket er det likevekt mellom neddrift og oppdrift og rørledningen vil stå helt i ro. Det drivende trykket er et lite undertrykk, i forhold til balansetrykket, som tillater at vannet strømmer inn.

Man må også koble til en luftkompressor slik at man kan fylle luft inn i røret ved behov – for eksempel hvis senkeprosessen må avbrytes og røret må heves igjen. Det er viktig at rørledningen beveger seg og står minst mulig i ro. Lufttrykket måles med et manometer. Det er en omfattende manøver å etablere trykket i ledningen for å hindre at vannet fyller ledningen for raskt i startfasen.

Balansetrykk

Nødvendig innvendig overtrykk for å balansere ledningen, balansetrykk:

$$p = a \cdot H \text{ [mVs]}$$

a: Ledningens luftfyllingsgrad (belastningsgrad) []

$$a = \frac{\text{Vekt av lodd i sjø+vekt av ledning i luft}}{\text{oppdrift av luftfylt ledning}}$$

H: Vanndyp [m]

Eksempel:

Hva er balansetrykket for en 500 mm PE 100 SDR 11 rørledning med en belastningsgrad på 30 % når sjødybden er henholdsvis 10 meter, 15 meter og 20 meter?

Ved 10 meter: $p_{10} = a \cdot H = 0,30 \cdot 10 \text{ m} = 3,00 \text{ mVs} = 0,294 \text{ bar}$

Ved 15 meter: $p_{15} = a \cdot H = 0,30 \cdot 15 \text{ m} = 4,50 \text{ mVs} = 0,441 \text{ bar}$

Ved 20 meter: $p_{20} = a \cdot H = 0,30 \cdot 20 \text{ m} = 6,00 \text{ mVs} = 0,588 \text{ bar}$

Drivende trykk

For at vann skal kunne fylle ledningen må lufttrykket være litt lavere enn balansetrykket. Trykkforskjellen (Δh), det drivende trykket, finner vi ut fra tradisjonelle kapasitetsberegninger

med hensyn på vannføring i rør. Jo lengre distanse rørledningen er vannfylt, jo større må trykkforskjellen være for at vannet skal renne like raskt og ledningen synke med jevn hastighet. Også fordi sjødybden ikke er konstant vil nødvendig lufttrykk i ledningen variere under så å si hele senkeprosessen.

Fordi det er usikkerheter forbundet med alle beregninger og fordi det er krevende å kontrollere lufttrykket under senkeprosessen, er løpende måling av senkehastigheten best for å kontrollere prosessen – se eget avsnitt. I starten er det drivende trykket svært lite. I praksis starter man senkingen med liten hastighet og opparbeider riktig hastighet gradvis.

I denne forbindelsen er det to forhold som man også må tenke på. Det ene er rørets evne til å motstå undertrykket. Blir undertrykket for stort kan rørledningen kollapse. Det andre er at bevegelsesenergien kan bli stor – spesielt for store rør. Oppstår det for eksempel en blokkering av innløpet kan det oppstå store trykkslag med store undertrykk som kan føre til kollaps av rør med høy SDR-verdi – tynnvegga rør. En lavere senkehastighet er gunstig med tanke på slik uønskede hendelser.

Beregningsprogrammer brukes naturligvis i praksis. Men for å se sammenhengen mellom trykkforskjell (drivende trykk, Δh), hastighet, lengde og diameter kan vi ta utgangspunkt i den enkle Darcy-Weisbachs formel:

$$\Delta h = f_D \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + k_s \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

- f_D : Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor fra Moodys diagram []
- L: Vannfylt rørlengde [m]
- d: Rørets innvendige diameter [m]
- v: Vannhastigheten [m/s]
- g: Tyngdeakselerasjonen – 9,81 m/s²
- k_s : Singulærtapskoeffisient []

Eksempel:

Hva er de drivende trykkene og de totale lufttrykkene for en 500 mm PE 100 SDR 11 rørledning som skal senkes med en hastighet på 0,3 m/s når sjødybden er henholdsvis 10 meter etter 500 m rørlengde, 15 meter etter 1000 m rørlengde og 20 meter etter 1500 m rørlengde?

Vi setter friksjonsfaktoren f_D til 0,025 og singulærtapskoeffisienten k_s ved innløpet til 1,5. Innvendig diameter for 500 mm SDR 11 rør er cirka 409 mm.

Drivende trykk:

$$\Delta h_{500} = f_D \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + k_s \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0,025 \cdot \frac{500 \text{ m}}{0,409 \text{ m}} \cdot \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} + 1,5 \cdot \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$\Delta h_{500} = 0,147 \text{ mVs} = 0,014 \text{ bar}$$

$$\Delta h_{1000} = 0,025 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{0,409 \text{ m}} \cdot \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} + 1,5 \cdot \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,287 \text{ mVs} = 0,028 \text{ bar}$$

$$\Delta h_{1500} = 0,025 \cdot \frac{1500 \text{ m}}{0,409 \text{ m}} \cdot \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} + 1,5 \cdot \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,427 \text{ mVs} = 0,042 \text{ bar}$$

Vi henter balansetrykkene fra forrige eksempel og finner totalt lufttrykk ved de angitte lengdene ved å trekke det drivende trykket fra det aktuelle balansetrykket:

$$p_{10} - \Delta h_{500} = 0,294 \text{ bar} - 0,014 \text{ bar} = 0,280 \text{ bar}$$

$$p_{15} - \Delta h_{1000} = 0,441 \text{ bar} - 0,028 \text{ bar} = 0,413 \text{ bar}$$

$$p_{20} - \Delta h_{1500} = 0,588 \text{ bar} - 0,042 \text{ bar} = 0,546 \text{ bar}$$

Når sjøbunnen har jevn helning vil trykket øke lineært.

Minimum bøyeradius under senking

Når røret bryter overflaten og når det treffer sjøbunnen vil det bøye seg. Hvis det bøyer seg for mye vil røret kollapse. Men ved å trekke i røret med riktig kraft vil vi ha kontroll på rørets bøyeradius. Vi må derfor beregne tillatt bøyeradius og nødvendig strekkraft for å kontrollere denne for det aktuelle røret. For store rør vil nødvendig trekkekraft bli for stor for vanlige taubåter og belastningsgrad, sjødybde og senkehastighet blir avgjørende for bøyeradien.

Praktiske forsøk viser at rør med høy SDR-klasse kollapser når deformasjonen er cirka 8 %. For mer tykkvegga rør er materialspenning i rørveggen dimensjonerende for bøyeradius. Avstivningsringer i form av betonglodd og innvendig støttetrykk bidrar positivt. Normalt tar vi ikke hensyn til effekten av støtten fra stive ringer og innvendig overtrykk – og beregner tillatt bøyeradius med en sikkerhetsfaktor på 2,0. Grunnen til dette er at det kan oppstå problemer som fører til en midlertidig stans under senkingen og at det vil oppstå planlagt stans under start- og sluttfasen. Slik stans er en tilleggsbelastning for et viskoelastisk materiale der spenning og tøyning er tidsavhengig. Stans under senkeprosessen må derfor tidsbegrenses.

Rørmaterialets temperatur er også en faktor. En sjøledning på overflaten en soldag kan bli temmelig varm på oversiden. Men normalt vil sikkerhetsfaktoren ved beregning av bøyeradius, stive avstivningsringer i form av betonglodd og innvendig støttetrykk samlet gi tilfredsstillende sikkerhet. Beregningene forutsetter derfor maksimum 20°C i rørveggen.

For rør med høy SDR-klasse (slanke rør – SDR 17 og høyere) er deformasjonen som oppstår ved bøying bestemmende for bøyeradius. Forsøk viser at rør kollapser ved cirka 8 % deformasjon. Vi beregner tillatt bøyeradius med en sikkerhetsfaktor 2,0 – altså ved 4 % deformasjon.

For rør med lav SDR-klasse (tykkvegga rør – SDR 17 og lavere) er tøyningen i aksial retning dimensjonerende. Tillatt tøyning for PE er 5 % – og her benytter vi fortsatt en sikkerhetsfaktor på 2,0 og beregner bøyeradius ved 2,5 % tøyning.

Bøyeradien er avhengig av rørdimensjonen og for PE-rør med homogen rørvegg er dette forholdet konstant for hver SDR-verdi. Denne konstanten kaller vi bøyetall (k).

$$k = \frac{R}{D} [\quad]$$

R: Bøyeradius [m]

D: Utvendig diameter [m]

Så, for å finne bøyeradius når bøyetall og rørdimensjon er kjent:

$$R = k \cdot D [m]$$

Anbefalte bøyetall for PE trykrør ved inntrekking av rør via trekkegrop og ved senking av sjøledninger:

Rørklasse	SDR 33	SDR 26	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 9	SDR 7,4
Bøyetall, $k = \frac{R}{D} [\quad]$	40	31	25	20	20	20	20	20

I andre sammenhenger anbefaler vi bøyetallet 30 for trykløse rørledninger og rørledninger under installasjon og bøyetallet 60 for rør med innvendig trykk. For SDR 21 og høyere bør man ifølge tabellen bruke høyere bøyetall. Vi kan tillate lavere bøyetall i forbindelse med inntrekking og senking fordi bøypåkjenningen er kortvarig.

Eksempel:

Hva er maksimum bøyeradius for et 250 mm PE 100 SDR 17 rør ved senking av sjøledninger?

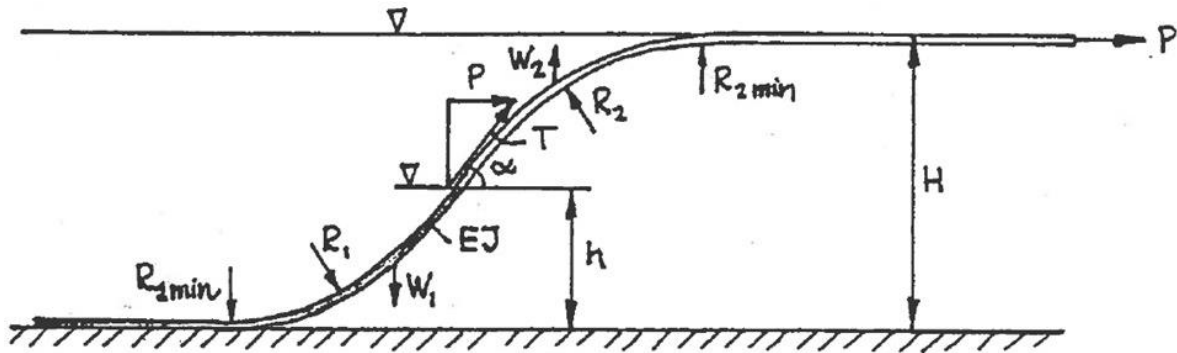
Bøyetallet for SDR 17 rør er 20: $k = \frac{R}{D} = 20$

Vi løser formelen med hensyn på R og regner ut:

$$R = k \cdot D = 20 \cdot 0,250 \text{ m} = 5 \text{ m}$$

Strekkefter, materialspenninger m.m. under senking

For å forhindre at bøyeradiene blir for krappe trekker vi i rørledningen med en strekkraft. Bøyeradiene ved overflaten og ved sjøbunnen vil være ulike og den minste vil være dimensjonerende.



Faktorer som bestemmer bøyeradier og krefter

- H: Sjødybde [m]
- h: Vannstanden i røret [m]
- W₁: Vekt av vannfylt rør i sjø [N/m]
- W₂: Oppdrift av luftfylt rør i sjø [N/m]
- R: Bøyeradier [m]
- T: Aksiell strekkraft i vendepunktet [N]
- P: Horisontal strekkraft [N]
- α: Rørets vinkel i vendepunktet [°]
- EJ: Rørets stivhet

Som sagt er dette kompliserte beregninger. Det er utarbeidet en enkel metode som vi gjengir her for å vise prinsippene. Metoden kan brukes ved enkle senkeprosesser ved dimensjoner opp til cirka 500 mm.

Formeloversikt, enkel metode:

Horisontal strekkraft ved gitt minimum tillatt bøyeradius ved sjøbunnen: $P = R_{1min} \cdot W_1$ [N]

Horisontal strekkraft ved gitt minimum tillatt bøyeradius ved overflaten: $P = R_{2min} \cdot W_2$ [N]

Hvis rørledningen er dimensjonert for en belastningsgrad mindre enn 50 % vil oppdriften (W₂) være større enn «neddriften» (W₁) og minimum bøyeradius vil oppstå ved overflaten – og denne strekkraften (P) blir den største.

Vekten («neddriften») av den vannfylte delen av røret (W₁) kan tilnærmet bestemmes av uttrykket:

$$W_1 = a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \varphi_{sjø} \text{ [N/m]}$$

- a: Luftfyllingsgrad []
 D: Rørets utvendige diameter [m]
 $\varphi_{sjø}$: Sjøvannets tyngdetetthet [N/m^3]

Sammenhengen ved likevekt mellom oppdrift og den vannfylte delens «neddrift», når luftfyllingsgraden (a) er større enn 20 %, er:

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{1 - a}{a}$$

Vannstanden i røret ved balansetrykket: $h = (1 - a) \cdot H$ [m]

Strekraft i vendepunktet: $T = P + W_1 \cdot h$ [N]

Strekraften i vendepunktet vil være den største røret blir utsatt for. Denne kraften gir en aksial materialspenning (σ_a). I tillegg vil det oppstå materialspenninger i ringretning (σ_t) på grunn av lufttrykket i røret. Ut fra disse beregner vi den resulterende materialspenningen i rørveggen (σ_{res}) – som ikke må være for stor. Summen av disse sammenholdes med materialets bruddspenning som reduseres med belastningstiden. Se også kapitlet om Hookes lov.

En stans under senkeprosessen vil være kritisk både fordi materialspenningen i rørveggen overskrider kritisk nivå med hensyn på tid og fordi tøyningen i røret reduserer diameteren nok til at loddene kan rase.

Aksial materialspenningen i rørveggen (σ_a) finner vi ved å dividere strekkraften i vendepunktet (T) med rørveggenes tverrsnittareal ($A_{rør}$):

$$\sigma_a = \frac{T}{A_{rør}} = \frac{4 \cdot T}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \text{ [MPa]}$$

- d: Rørets innvendige diameter [m]

I ringretning (tangentiell retning) vil det oppstå spenninger på grunn av innvendig trykk og tverrkontraksjon.

Materialspenning på grunn av innvendig trykk: $\sigma_{t,trykk} = \frac{D}{2} \cdot (SDR - 1)$ [MPa]

- p: Innvendig overtrykk [MPa]

Materialspenning på grunn av tverrkontraksjon: $\sigma_{t,tverrk.} = \frac{\sigma_a}{9}$ [MPa]

- ϑ : Rørmaterialets tverrkontraksjonskoeffisient, Poissons tall []

Summen av materialspenningene i tangentiell retning er: $\sigma_t = \sigma_{t,trykk} + \sigma_{t,tverrk.}$ [MPa]

Resultantspenning for rør i henhold til von Mises teori: $\sigma_{res} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_a^2} - \sigma_t \cdot \sigma_a$ [MPa]

Materialets bruddspenning er avhengig av tid og temperatur. Sjøtemperaturen er normalt under 20°C, så vi ser bort fra denne og konsentrerer oss om tiden. Bruddspenningen ved uendelig lang belastning (MRS) er 10,0 MPa ved 20°C for PE 100. Under senking er tiden røveggen har størst spenning svært kort – forutsatt at senkingen skjer med riktig og jevn hastighet. Vi anbefaler at beregnet resultantspenning under senking ikke overstiger 12,0 MPa.

Rørets vinkel i vendepunktet er gitt ved: $\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{P}{P+W_1 \cdot h} \right) [^\circ]$

Eksempel:

En 315 mm PE 100 SDR 17 sjøledning dimensjonert for 30 % luftfylling (belastningsgrad) skal senkes til 50 meters dybde i sjø. Hva er balansetrykket og minimum bøyeradius? Hvor stor strekkraft i horisontal retning er påkrevet? Hva blir materialspenningen i røveggen? Og hvor stor er rørets maksimale helningsvinkel?

Balansetrykket (p) er:

$$p = a \cdot H = 0,30 \cdot 50 \text{ m} = 15 \text{ mVs} = 1,47 \text{ bar} = 0,15 \text{ MPa}$$

Minste tillatte bøyeradius – med sikkerhetsfaktor 2,0 – under senking er:

$$R = k \cdot D = 20 \cdot 0,315 = 6,3 \text{ m}$$

For å finne nødvendig horisontal strekkraft må vi kjenne tyngden av vannfylt rørledning (W_1) og oppdriften (W_2). Sjøvannets tyngdetetthet settes her til 1025 kg/m³ – altså 10055 N/m³:

$$W_1 = a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \varphi_{\text{sjø}} = 0,30 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,315 \text{ m})^2 \cdot 10055 \text{ N/m}^3 = 235 \text{ N/m}$$

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{1-a}{a} = 235 \text{ N/m} \cdot \frac{1-0,30}{0,30} = 548 \text{ N/m}$$

W_2 er størst og blir dimensjonerende for den horisontale strekkraften:

$$P = R \cdot W_2 = 6,3 \text{ m} \cdot 548 \text{ N/m} = 3452 \text{ N}$$

Strekraften i vendepunktet blir:

$$T = P + W_1 \cdot h = P + W_1 \cdot (1-a) \cdot H = 3452 \text{ N} + 235 \text{ N/m} \cdot (1-0,3) \cdot 50 \text{ m} = 11677 \text{ N}$$

Ut fra dette kan vi beregne materialspenningen i røveggen i aksial retning. Innvendig diameter (d) er 277,6 mm:

$$\sigma_a = \frac{T}{A_{\text{rør}}} = \frac{4 \cdot T}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} = \frac{4 \cdot 11677 \text{ N}}{\pi \cdot ((315 \text{ mm})^2 - (277,6 \text{ mm})^2)} = 0,67 \text{ MPa}$$

Når tverrkontraksjonskoeffisienten (ϑ) settes til 0,45 blir materialspenningen i ringretning:

$$\sigma_t = \sigma_{t,\text{trykk}} + \sigma_{t,\text{tverrk.}} = \frac{p}{2} \cdot (\text{SDR} - 1) + \frac{\sigma_a}{\vartheta} = \frac{0,15 \text{ MPa}}{2} \cdot (17 - 1) + \frac{0,72 \text{ MPa}}{0,45} = 2,80 \text{ MPa}$$

Vi benytter formelen for resultantspenning for å finne den totale materialspenningen. Alle spenninger er strekkspenninger og settes inn med positivt fortegn i formelen:

$$\sigma_{\text{res}} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_a^2 - \sigma_t \cdot \sigma_a} = \sqrt{(2,80 \text{ MPa})^2 + (0,72 \text{ MPa})^2 - 2,80 \text{ MPa} \cdot 0,72 \text{ MPa}} = 2,52 \text{ MPa}$$

Resultantspenningen i dette eksempelet er svært lav og sikkerheten mot rørbrudd stor.

Rørets helningsvinkel i vendepunktet blir:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{P}{P + W_1 \cdot h} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{P}{P + W_1 \cdot (1 - a) \cdot H} \right)$$

$$= \cos^{-1} \left(\frac{3452 \text{ N}}{3452 \text{ N} + 235 \text{ N/m} \cdot (1 - 0,30) \cdot 50 \text{ m}} \right) = 72,8^\circ$$

Senkehastighet

Senkeprosessen bør foregå med jevn hastighet mellom 0,15 m/s og 0,3 m/s – eller 0,5 km/time til 1 km/time. Senkehastigheten reguleres ved å åpne og strupe ventilen som slipper luften ut av ledningen. Senkehastigheten er en viktig kontrollparameter og måles enkelt ved å ta tiden mellom hver gang ett eller et antall betonglodd dukker under vannflaten. Ved å måle tiden mellom flere lodd om gangen blir målingen sikrere.

Formelen for å regne ut tiden mellom lodd som forsvinner når hastigheten er valgt er enkel:

$$t = \frac{x \cdot c - c}{v} \text{ [sekunder]}$$

- x: Antall lodd i løpet av tiden t [stk]
- c-c: Senteravstanden mellom loddene [m/stk]
- v: Hastigheten [m/s]

Eksempel:

Hvor lang tid tar det mellom hvert belastningslodd som forsvinner når senkehastigheten er 0,2 m/s og senteravstanden mellom loddene er 5,5 meter? Og hva er tiden mellom hvert 5. lodd?

$$\text{Mellom hvert lodd er tiden } t = \frac{x-c-c}{v} = \frac{1 \text{ stk} \cdot 5,5 \text{ m} / \text{stk}}{0,2 \text{ m/s}} = 27,5 \text{ sekunder}$$

$$\text{Mellom hvert 5. lodd er tiden } t = \frac{x-c-c}{v} = \frac{5 \text{ stk} \cdot 5,5 \text{ m} / \text{stk}}{0,2 \text{ m/s}} = 137,5 \text{ sekunder} \approx 2 \text{ minutter og } 18 \text{ sekunder}$$