

## R: Oppdrift for rørkonstruksjoner i jord

Ved høy grunnvannstand, stort oppdriftsvolum, liten overdekning og gjerne dårlige gjenfyllingsmasser kan tanker, kummer, pumpestasjoner og rør ha så stor oppdrift at de flyter opp. I gode masser og med nok overdekning, som ikke nødvendigvis er så mye, er dette ikke et problem. Og med enkle tiltak kan man sikre at det ikke skjer.

### Oppdriftsvolum og oppdriftskrefter

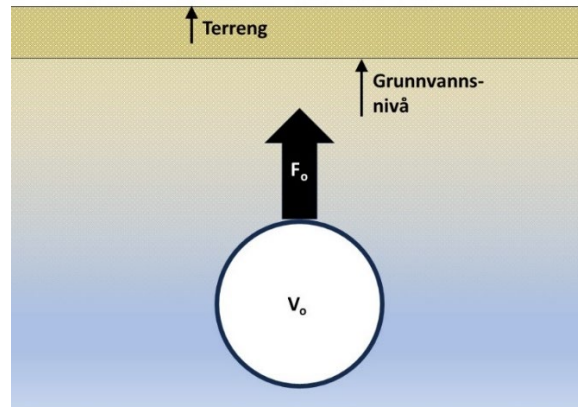
Arkimedesloven sier at oppdriften er lik tyngden av den væskemengden som fortregnes. Og så har rørproduktet en tyngde som motvirker noe av dette. Vi kan regne ut det fortregnte væskevolumet for et produkt med en gitt lengde (eller høyde) eller per meter rør med disse formlene:

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \quad [\text{m}^3]$$

Eller

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad [\text{m}^3/\text{m}]$$

- $V_o$ : Oppdriftsvolum [ $\text{m}^3$  eller  $\text{m}^3/\text{m}$ ]
- $D$ : Rørproduktets utvendige diameter [m]
- $L$ : Rørets lengde – eller høyden av grunnvannsspeilet over kumbunnen [m]



Kraften oppdriften gir må oppveies av tyngden av jordmassene – og vel så det. Oppdriftskraften finner du slik:

$$F_o = \rho_{\text{vann}} \cdot V_o \cdot g \quad [\text{N eller N/m}]$$

Eller

$$F_o = \rho_{\text{vann}} \cdot V_o \quad [\text{kg eller kg/m}]$$

- $F_o$ : Oppdriftskraft [N, N/m, kg eller kg/m]
- $\rho_{\text{vann}}$ : Tyngdetettheten til den fortregnte væsken [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $V_o$ : Oppdriftsvolum = volumet av den fortregnte væsken [ $\text{m}^3$  eller  $\text{m}^3/\text{m}$ ]
- $g$ : Tyngdeakselerasjonen,  $9,81 \text{ m/s}^2$

## Overlagsberegning

Tyngdetettheten til plastmaterialene er ikke så langt unna vannets, så ved et overslag for plastrør med homogen rørvegg kan man velge å bare regne med lysåpningen til produktet. Når grunnvannet står over en luftfylt liggende rørkonstruksjon, så er oppdriftsvolumet når man ser bort fra rørveggen:

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot L \quad [\text{m}^3]$$

Eller

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad [\text{m}^3/\text{m}]$$

d: Rørproduktets innvendige diameter [m]

For et rør med konstruert rørvegg bør man regne med utvendig diameter som en ekstra sikkerhet. Det er hulrom med innestengt luft i rørveggen som vil bidra en god del til oppdrift.

### Eksempel

Vi gjør et overslag over oppdriften for et 800 mm PE 100 SDR 17 luftfylt rør i grunnvann og ser bort fra rørmaterialets tyngde. Røret har en innvendig diameter (d) på 705,2 mm, eller 0,7052 m. Luftvolumet per meter rør blir:

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (0,7052 \text{ m})^2 = 0,391 \text{ m}^3/\text{m}$$

Tyngdetettheten til ferskvann er 1000 kg/m<sup>3</sup>. Oppdriften per meter rør blir:

$$F_o = \rho_{\text{vann}} \cdot V_o \cdot g = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,391 \text{ m}^3/\text{m} \cdot 9,81 \text{ m}/\text{s}^2 = 3836 \text{ N}/\text{m} = 391 \text{ kg}/\text{m}$$

Oppdriften blir 3836 N/m, eller 391 kg/m. Du bør ha minst 391 kg/m motvekt pluss noe sikkerhetsmargin for at rørledningen ikke skal flyte opp.

### Rørets vekt inkluderes i beregningen

Alternativt kan selve røret tas med i en mer nøyaktig beregning. Det er tross alt forskjell på tyngdetettheten til vann og rørmaterialene. For et rørprodukt med konstruert rørvegg blir det nødvendigvis litt komplisert med tanke på innestengt luft i konstruksjonen. Men det vil uansett være usikkerheter i beregningene som må ivaretas med en sikkerhetsfaktor.

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad [\text{m}^3/\text{m}]$$

D: Rørets utvendige diameter [m]

$$F_o = (\rho_{\text{vann}} \cdot V_o - M_{\text{rør}}) \cdot L \cdot g \quad [\text{N}]$$

$M_{\text{rør}}$ : Rørets vekt [kg/m]

### Eksempel

Vi tar utgangspunkt i forrige eksempel og tar med rørets vekt i beregningen. Men denne gangen må volumet av den fortrenkte væsken regnes ut fra rørets utvendige diameter. Et 800 mm PE 100 SDR 17 rør veier cirka 115 kg/m. Utvendig diameter (D) er 800 mm, eller 0,8 m.

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (0,800 \text{ m})^2 = 0,503 \text{ m}^3/\text{m}$$

Tyngdetettheten til ferskvann er 1000 kg/m<sup>3</sup>. Oppdriften per meter rør blir:

$$\begin{aligned} F_o &= (\rho_{\text{vann}} \cdot V_o - M_{\text{rør}}) \cdot g \\ &= (1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,503 \text{ m}^3/\text{m} - 115 \text{ kg}/\text{m}) \cdot 9,81 \text{ m}/\text{s}^2 = 3806 \text{ N}/\text{m} = 388 \text{ kg}/\text{m} \end{aligned}$$

Oppdriften blir 3806 N/m, eller 388 kg/m. For PE-rør med homogen rørvegg blir forskjellen på å regne med eller uten rørvekten marginal fordi rørmaterialets tyngdetetthet er så nær vannets.

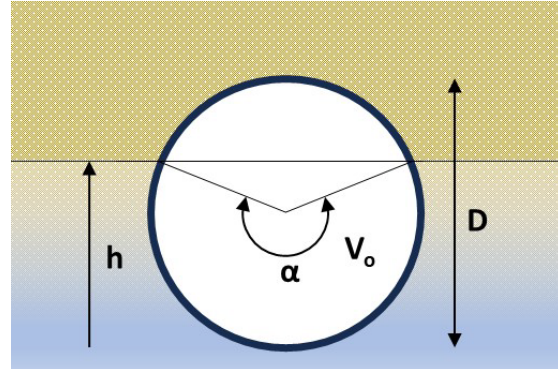
## Delvis neddykket rørkonstruksjon

Er en liggende rørkonstruksjon delvis neddykket i grunnvann, så blir regnestykket litt mer komplisert.

$$V_o = \frac{1}{8} \cdot D^2 \cdot \left( \pi \cdot \frac{\alpha}{180} - \sin \alpha \right) \cdot L \quad [\text{m}^3]$$

Grunnvannshøyden (h) over bunn ut- eller innvendig rør, avhengig av hvilket volum vi vil beregne, er kjent. Ut fra denne kan vi regne ut vinkelen som inngår i formelen – se figuren.

$$\alpha = 2 \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2h}{D} \right) \quad [^\circ]$$



### Eksempel

Et DN/ID 1400 Pragma Infra rørmagasin som er 24 meter langt har grunnvann 0,9 meter over bunn utvendig rør. Utvendig diameter er 1583 mm. Først finner vi vinkelen  $\alpha$ :

$$\alpha = 2 \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2h}{D} \right) = 2 \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2 \cdot 0,9 \text{ m}}{1,583 \text{ m}} \right) = 196^\circ$$

Oppdriftsvolumet blir:

$$V_o = \frac{1}{8} \cdot D^2 \cdot \left( \pi \cdot \frac{\alpha}{180^\circ} - \sin \alpha \right) \cdot L = \frac{1}{8} \cdot (1,583 \text{ m})^2 \cdot \left( \pi \cdot \frac{196^\circ}{180^\circ} - \sin 196^\circ \right) \cdot 24 \text{ m} = 27,8 \text{ m}^3$$

### Sirkulær kum

En rund kum kan vi på enkleste måte anse som en stående sylinder. Oppdriftsvolumet blir da:

$$V_o = \pi \cdot r^2 \cdot h = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \quad [\text{m}^3]$$

r: Kummens radius [m]

D: Kummens diameter [m]

h: Grunnvannets høyde over bunn kum [m]

## Kassettmagasin og firkantet kum

For et kassettmagasin eller en firkantet kum blir oppdriftsvolumet:

$$V_o = B \cdot L \cdot h \quad [\text{m}^3]$$

- B: Magasinets eller kummens bredde [m]  
 L: Magasinets eller kummens lengde [m]  
 h: Grunnvannets høyde over bunn magasin eller kum – eller magasinets høyde hvis grunnvannet står over topp magasin [m]

### Motvekt fra jord

I fast jord vil vekten over et rør, et magasin, en kum e.l. hindre oppdrift. I bløte masser, som løs myr og tilsvarende, må kummer, tanker, magasiner og rør uansett sikres mot oppdrift fordi rørkonstruksjonen kan trenge gjennom massene over. Er vekten av jorden over tilstrekkelig for å motvirke oppdriften?

Det bør benyttes en sikkerhetsfaktor fra 1,3 til 1,6 mot oppdrift avhengig av graden av usikkerhet og konsekvens. I Statens vegvesen sin håndbok N-V220 «Geoteknikk i vegbygging», som ligger på vegvesenets hjemmeside, finner du data om tyngdetettheter og friksjonsvinkler (rasvinkler) for ulike jordarter.

### Overlagsberegning

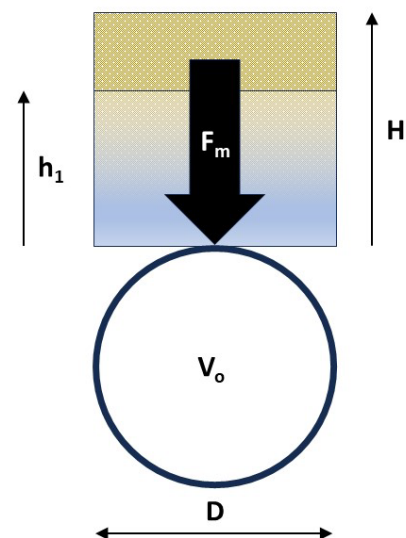
For et enkelt overslag for liggende rørkonstruksjoner kan vi regne på vekten av massene i søylen rett over rørkonstruksjonen.

$$F_m = D \cdot L \cdot g \cdot \left( (\rho_{\text{jord}} - \rho_{\text{vann}}) \cdot h_1 + \rho_{\text{jord}} \cdot (H - h_1) \right) \quad [\text{N}]$$

eller

$$F_m = D \cdot g \cdot \left( (\rho_{\text{jord}} - \rho_{\text{vann}}) \cdot h_1 + \rho_{\text{jord}} \cdot (H - h_1) \right) \quad [\text{N/m}]$$

- $F_m$ : Motvekt [N/m]  
 $D$ : Rørets utvendige diameter [m]  
 $L$ : Rørets lengde [m]  
 $g$ : Tyngdeakselerasjonen, 9,81 m/s<sup>2</sup>  
 $\rho_{\text{jord}}$ : Jordmassenes tyngdetetthet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{\text{vann}}$ : Vannets tyngdetetthet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $h_1$ : Grunnvannshøyde over topp rør [m]  
 $H$ : Total overdekning [m]



Hvis grunnvannet står helt opp til terrengnivå kan formelen forenkles noe:

$$F_m = D \cdot L \cdot g \cdot (\rho_{\text{jord}} - \rho_{\text{vann}}) \cdot H \quad [\text{N/m}]$$

### Eksempel

Et 800 mm PE 100 SDR 17 luftfylt rør ligger med 0,7 meter overdekning og med 0,5 m grunnvann over topp rør. I et tidligere eksempel har vi funnet ut at oppdriften er 3806 N/m. Jorden har en tyngdetetthet på 1800 kg/m<sup>3</sup> og vannets tyngdetetthet er 1000 kg/m<sup>3</sup>. Jordsøylen over røret veier:

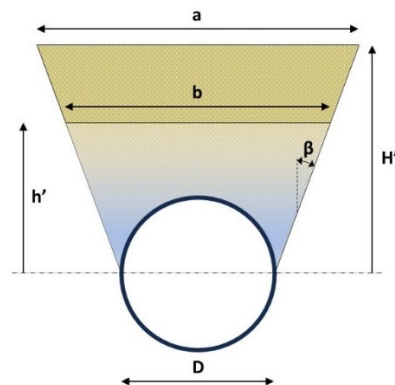
$$\begin{aligned} F_m &= D \cdot g \cdot \left( (\rho_{\text{jord}} - \rho_{\text{vann}}) \cdot h_1 + \rho_{\text{jord}} \cdot (H - h_1) \right) \\ &= 0,8 \text{ m} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \left( (1800 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) \cdot 0,5 \text{ m} + 1800 \text{ kg/m}^3 \cdot (0,7 \text{ m} - 0,5 \text{ m}) \right) \\ &= 5964 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Sikkerhetsfaktoren mot oppdrift er  $\frac{5964 \text{ N/m}}{3806 \text{ N/m}} = 1,57$ , som vi vurderer til å være tilfredsstillende.

### Beregning av reell motvekt

Oppdrift er sjelden en utfordring for rør i grøft. Men for store liggende konstruksjoner, som tanker og rørmagasiner som i tillegg ligger grunt, kan det bli marginalt. Da bør man gjøre en mer avansert beregning. Friksjonsmasser overfører tyngde fra et adskillig større volum enn bare jordsøyla rett over konstruksjonen. Her kan vi ta massenes friksjonsvinkel ( $\beta$ ) med i betraktningen.

Vi begynner med å beregne arealet av trapesen med bunn i senter av rørkonstruksjonen og topp ved grunnvannsspeil, som vi forutsetter befinner seg over topp rør. Her trekker vi fra halve rørarealet. Så må vi finne arealet av trapesen med bunn på grunnvannspeilet og topp ved terreng. Til slutt multipliseres arealene med lengden av rørkonstruksjonen – hvis man ikke skal finne volumet per meter.



Bredden av trapeset ved terreng (a) og ved grunnvannsspeil (b) finner vi på følgende vis:

$$a = D + 2 \cdot H' \cdot \tan \beta \quad [\text{m}]$$

$$b = D + \frac{h'}{H'} \cdot a \quad [\text{m}]$$

Volumet av massene under grunnvannsspeilet som virker mot oppdriften blir:

$$V_{m1} = \left( \frac{(D+b)}{2} \cdot h' - \frac{\pi}{8} D^2 \right) \cdot L \quad [\text{m}^3]$$

Volumet av de tørre massene over grunnvannsspeilet blir:

$$V_{m2} = \frac{(b+a)}{2} \cdot (H' - h') \cdot L \quad [\text{m}^3]$$

- a:     Trapesens bredde ved terrengnivå [m]
- b:     Trapesens bredde ved grunnvannsspeilet [m]
- D:     Rørdiameteren [m]
- h':    Høyden fra senter rør til grunnvannsspeilet [m]
- H':    Høyden fra senter rør til terrengnivå [m]
- β:     Jordmassenes friksjonsvinkel [°]
- L:     Rørkonstruksjonens lengde [m]

Tyngden av massene som virker mot oppdriften blir:

$$F_m = V_{m1} \cdot g \cdot (\rho_{\text{jord}} - \rho_{\text{vann}}) + V_{m2} \cdot g \cdot \rho_{\text{jord}} \quad [\text{N}]$$

- g:     Tyngdeakselerasjonen, 9,81 m/s<sup>2</sup>
- ρ<sub>jord</sub>: Tyngdetettheten til jordmassene [kg/m<sup>3</sup>]
- ρ<sub>vann</sub>: Tyngdetettheten til ferskvann, 1000 kg/m<sup>3</sup>

### Eksempel

Et 6 meter langt DN/ID 1400 Pragma Infra rørmagasin med utvendig diameter 1583 mm skal installeres med 1,0 meter overdekning. Jordmassene har en tyngdetetthet på 1800 kg/m<sup>3</sup> og en friksjonsvinkel på 40°. Grunnvannstanden kan gå helt opp til terrengnivå. Vi slipper med andre ord å dele trapeset over i en sone med grunnvann og en sone uten. Høyden fra senter rør til terreng blir 1,79 meter.

Oppdriftsvolumet er:

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot (1,583 \text{ m})^2 \cdot 6 \text{ m} = 11,8 \text{ m}^3$$

Kraften oppdriften utgjør blir:

$$F_o = \rho_{\text{vann}} \cdot V_o \cdot g = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 11,8 \text{ m}^3 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 115\,758 \text{ N} = 116 \text{ kN} = 11,8 \text{ tonn}$$

Så finner vi bredden på trapeset ved terreng:

$$a = D + 2 \cdot H' \cdot \tan \beta = 1,58 \text{ m} + 2 \cdot 1,79 \text{ m} \cdot \tan 40^\circ = 4,58 \text{ m}$$

Volumet av massene som virker mot rørmagasinet:

$$V_m = \left( \frac{(D + a)}{2} \cdot H' - \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \right) \cdot L = \left( \frac{(1,54 \text{ m} + 4,58 \text{ m})}{2} \cdot 1,79 \text{ m} - \frac{\pi}{8} \cdot (1,54 \text{ m})^2 \right) \cdot 6 \text{ m} = 27,3 \text{ m}^3$$

Kraften som virker fra massene og på rørmagasinet:

$$F_m = V_m \cdot g \cdot (\rho_{\text{jord}} - \rho_{\text{vann}}) = 27,3 \text{ m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (1800 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) = 214\,250 \text{ N} = 214 \text{ kN}$$

$$= 21,8 \text{ tonn}$$

Sikkerheten mot oppflyting er  $\frac{214\,250 \text{ N}}{115\,758 \text{ N}} = 1,85$ , som er mer enn tilstrekkelig.

### Kummer og andre vertikale rørkonstruksjoner i jord

En kum betrakter vi i denne sammenhengen som en stående sylinder. Den øverste delen av kummen blir normalt utsatt for tele og det må brukes ikke-telefarlige masser – ellers kan disse løfte kummen eller uforankra deler av kummen mer og mer for hver vinter. Men nå skal vi vise hvorfor kummer ikke flyter opp når det brukes friksjonsmasser rundt kumkroppen.

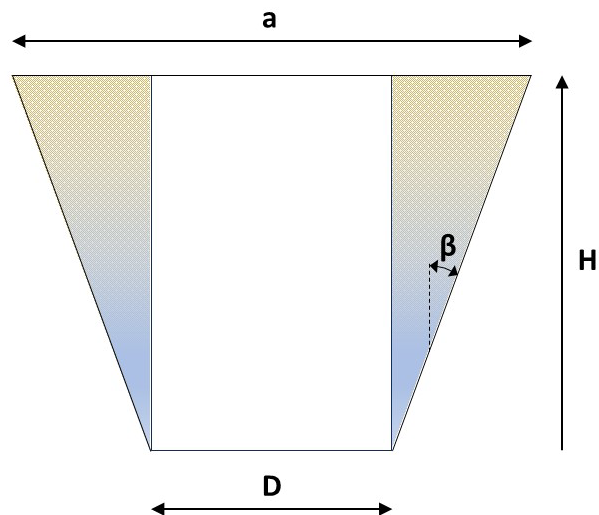
Som for rør overføres vekt fra friksjonsmassene med en vinkel tilsvarende friksjonsvinkelen. Her må vi betrakte formen på volumet av disse massene som en rettavkortet kjegle minus volumet av kumsylinderen. Som foran, så må vi først finne utstrekningen (a) av kjegla med massene ved terrengnivå:

$$a = D + 2 \cdot H \cdot \tan \beta \quad [\text{m}]$$

- a: Diameteren av jordkegla ved terrengnivå [m]
- D: Kummens diameter [m]
- H: Høyde fra kumbunn til terreng [m]
- β: Jordmassenes friksjonsvinkel [°]

Volumet av massene rundt kummen:

$$V_m = \frac{\pi}{12} \cdot H \cdot (a^2 + a \cdot D - 2 \cdot D^2) \quad [\text{m}^3]$$





### Eksempel

En PRO1000-kum er bare 1 meter høy og det fylles pukk med tyngdetetthet  $1800 \text{ kg/m}^3$  og med en friksjonsvinkel på  $40^\circ$  rundt kummen. Grunnvannet går opp til topp terreng.

Oppdriftsvolum:

$$V_o = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H = \frac{\pi}{4} \cdot (1,0 \text{ m})^2 \cdot 1,0 \text{ m} = 0,785 \text{ m}^3$$

Oppdriftskraft:

$$F_o = V_o \cdot g \cdot \rho_{\text{vann}} = 0,785 \text{ m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 7701 \text{ N} = 7,7 \text{ kN} = 785 \text{ kg}$$

Diameteren ved terrengnivå av den rettavkorta kjegla med masser som virker på kummen:

$$a = D + 2 \cdot H \cdot \tan \beta = 1,0 \text{ m} + 2 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot \tan 40^\circ = 2,68 \text{ m}$$

Volumet av jordmassene som virker med sin vekt mot kummen:

$$V_m = \frac{\pi}{12} \cdot H \cdot (a^2 + a \cdot D - 2 \cdot D^2) = \frac{\pi}{12} \cdot 1 \text{ m} \cdot ((2,68 \text{ m})^2 + 2,68 \text{ m} \cdot 1,0 \text{ m} - 2 \cdot (1,0 \text{ m})^2) = 2,058 \text{ m}^3$$

Tyngden av jordmassene:

$$F_m = V_m \cdot g \cdot (\rho_{\text{jord}} - \rho_{\text{vann}}) = 2,058 \text{ m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (1800 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) = 16 151 \text{ N} = 16,2 \text{ kN} \\ = 1646 \text{ kg}$$

Selv en så «stor» og grunn kum kan ikke flyte opp når det brukes gode masser rundt. Sikkerheten mot oppflyting,  $\frac{16 151 \text{ N}}{7 701 \text{ N}} = 2,1$ , er stor. Når kummen omfylles med friksjonsmasser skal de være temmelig store og/eller svært grunne for at de skal kunne flyte opp.

### NB!

I telesonen må kumringer og stigerør uansett omfylles med jordmasser som ikke er telefarlige. Det vil si masser som drenerer godt slik at det ikke blir stående vann i massene som fryser og utvider seg. Tele kan løfte ganske tunge konstruksjoner.

### *Tiltak ved fare for at rørkonstruksjoner i jord skal flyte opp*

#### **Kort sagt:**

- Tommelfingerregel: Har du en overdekning som består av friksjonsmasser og som minst er lik rørdiameteren på en liggende rørkonstruksjon, så flyter den ikke opp.
- Fyller du inntil en kum med ikke-telefarlige friksjonsmasser, så skal det mye til før den flyter opp.
- Kan rørkonstruksjonen trenge gjennom jordmassene, så gjør den det.

Er oppdriften for stor, så kan det iverksettes mange forskjellige tiltak. Tiltak må være hensiktsmessige og kostnadseffektive.

Eksempler på tiltak for å hindre oppflyting:

- Øke overdekningen over rørkonstruksjonen med en utstrekning som tar hensyn til jordmassenes friksjonsvinkel
- Tilbakefylle jordmasser med større tyngdetetthet og større friksjonsvinkel
- Drenerer hele eller deler av jordmassene som rørkonstruksjonen skal ligge i
- Dekke til konstruksjonen og ut i grøftesidene med geotekstiler eller geonett for å overføre mer last fra jordmassene rundt
- Montere tradisjonelle belastningslodd for bruk i sjø
- Støpe ei plate, som konstruksjonen forankres til, som bidrar med sin egen tyngde samt tyngden til jordmassene som virker mot plata – eventuelt utvide bunnplata på en kum for å overføre mer vekt fra omfyllingsmassene