

LEKKASJE I Ø600MM OG Ø700MM DUKTILE STØPEJERNsledninger C40

STATISKE BEREGNINGER OG KONTROLL AV GEOMETRI I KURVER

INNHOOLD

1	Innledning	1
2	Krefter	2
3	Beregning av krefter	3
3.1	Trykkraft, resultantkraft:	3
3.2	Terniske krefter i strekkfaste rør, resultantkraft	5
3.3	Tverrkontraksjonskraft i et strekkfast system, resultantkraft	6
4	Belastning på parallelle rør i kurver	7
5	Strekkapasitet på røret	9
6	Vinkelendring ved parallelle rør i kurver	14
7	Konklusjon	14
8	Referanser	15

1 Innledning

I forbindelse med bygging av nytt høydebasseng P-9038 Nordtromsøya er det installert strekkfaste duktile støpejernsrør Ø600mm og Ø700mm i grøft på strekningen fra sjøen og opp mot bassenget. Ved trykkprøving av disse ledningene har det vist seg at det er større lekkasjer enn det standarden tillater. Saken har vært under utredning i ca. ett år.

Det etterfølgende notatet er utarbeidet for å kontrollere om faglige påstander i

OPDRAGSNR. DOKUMENTNR.
A041938-140 01

VERSION UTGIVELSESDATO BESKRIVELSE UTARBEIDET KONTROLLERT GODKJENT
01 20.01.2017 Kontrollnotat Tom A. Karlsen Jon Simon Laaby Anders Krosby

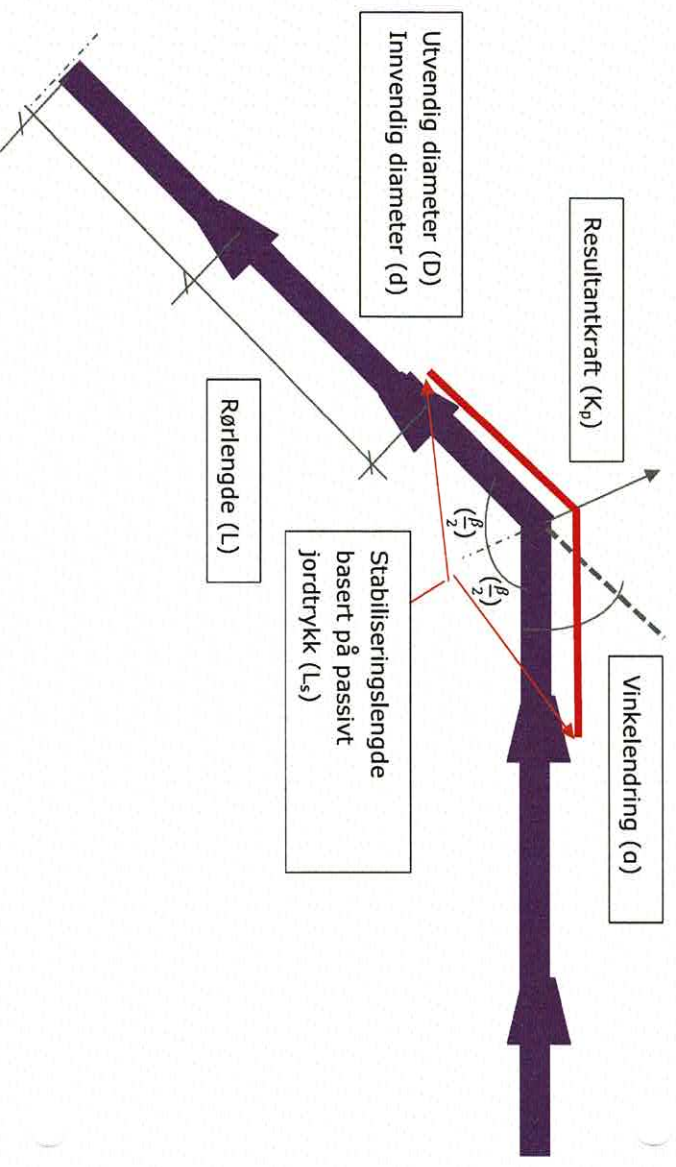
dokumenter utarbeidet i saken fra Norconsult og Sweco medfører riktighet.

I disse dokumentene har det fremkommet påstander om feilprosjektering fra COWI AS side.

2 Krefter

Det tas utgangspunkt i et bend med vinkel (α) og innvendig diameter i rørene lik (d). Rørene ligger nedgravd i grøft. På hver side av bendet er det rør med strekkfaste skjøter.

Situasjonen er vist i figur 1 i prinsipp.



Figur 1. Prinsipptegning av duktilt støpejernsbend med strekkfaste rør på hver side

Bendet og rørene vil bli utsatt for følgende krefter:

- 1) Trykkrefter (K_p)
- 2) Termiske krefter ($K_{\Delta t}$)
- 3) Tverrkontraksjonskrefter (K_v)

3 Beregning av krefter

3.1 Trykkraft, resultantkraft:

$$K_p = \frac{p \pi d^2}{2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

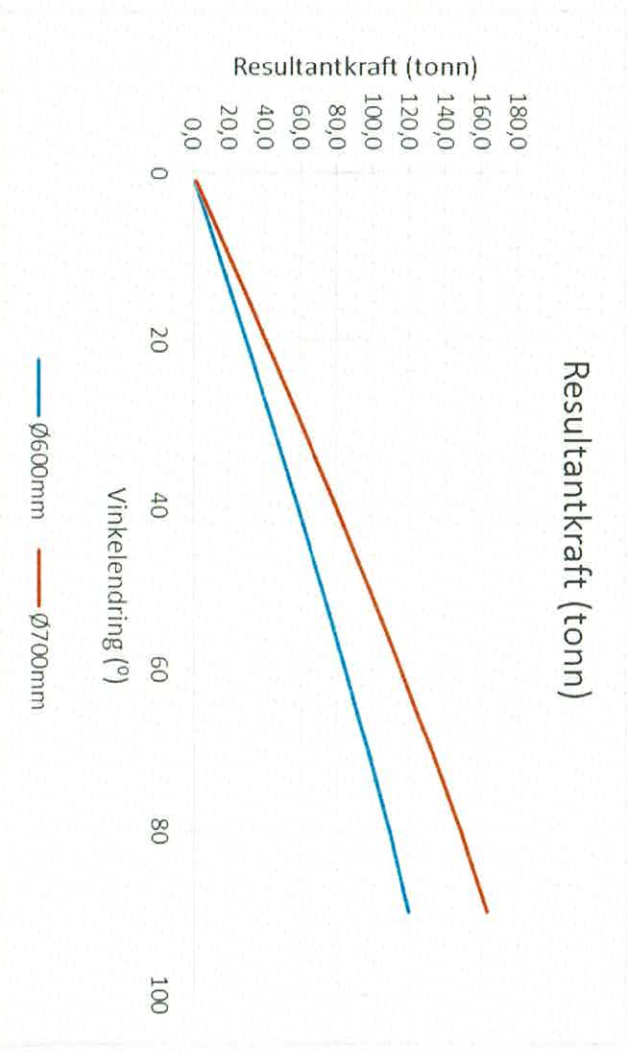
1)

p = trykk (N/m²)

d = innvendig diameter (m)

α = vinkelending (°)

Et prøvetrykk på 30 bar tilsvarer = $3 \cdot 10^6$ N/m² = 3 MPa. Figur 2 nedenfor viser trykkreftene som oppstår i bended som funksjon av vinkelen (α) for henholdsvis innvendige diametere på 600mm og 700mm.



Figur 2. Resultantkraft som funksjon av vinkel og innvendig diameter for et prøvetrykk på 30 bar

I tabell 1 har vi oppgitt de eksakte verdiene som funksjon av vinkelen.

For at røret skal være stabilt i horisontal retning i grøfta, må det etableres et passivt jordtrykk mot rørvæggen, eventuelt mot en støpt forankring.

Tar man utgangspunkt i VA Miljøblad 96 "Forankring av trykkledninger", kan man minst forvente et passivt jordtrykk på 10 tonn/m². Den nødvendige lengden for stabilitet (L_s) slik den er vist i figur 1, kan da beregnes for henholdsvis 600mm og 700mm som funksjon av vinkelendingen. Resultatet er vist i tabell 2.

Vinkel (°)	Resultantkraft (tonn)	
	600mm	700mm
1	1,5	2,0
2	3,0	4,0
3	4,4	6,0
4	5,9	8,1
5	7,4	10,1
6	8,9	12,1
7	10,3	14,1
8	11,8	16,1
9	13,3	18,1
10	14,8	20,1
11	16,2	22,1
12	17,7	24,1
20	29,4	40,1
22,5	33,1	45,0
30	43,9	59,7
40	58,0	78,9
50	71,6	97,5
60	84,7	115,3
70	97,2	132,3
80	108,9	148,3
90	119,8	163,1

Tabell 1. Resultantkraft for rør med innvendige diametere 600mm og 700mm som funksjon av vinkelendring

Vi ser av tabell 2 at for vinkler opp til ca. 22,5°, vil **mindre enn halve rørlengden** på hver side av bended gi tilstrekkelig areal for horisontal stabilitet basert på et passivt jordtrykk på 10 tonn/m². Vi kan slå fast at den **horisontale stabiliteten i grøftene er ivaretatt i alle kurver i prosjektet** og med stor sannsynlighet opp til vinkelendringer på 22,5° selv om de strekkfaste skjøtene ikke skulle være aktivert.

Vinkel (°)	Forankringslengde (m)	
	600mm	700mm
1	0,2	0,3
2	0,5	0,6
3	0,7	0,9
4	1,0	1,2
5	1,2	1,4
6	1,5	1,7
7	1,7	2,0
8	2,0	2,3
9	2,2	2,6
10	2,5	2,9
11	2,7	3,2
12	3,0	3,4
20	4,9	5,7
22,5	5,5	6,4
30	7,3	8,5
40	9,7	11,3
50	11,9	13,9
60	14,1	16,5
70	16,2	18,9
80	18,2	21,2
90	20,0	23,3

Tabell 2. Nødvendig stabiliseringslengde for at passivt jordtrykk mellom rør og omkringliggende masser skal være i balanse ved trykkprøving på 30 bar.

3.2 Termiske krefter i strekkfaste rør, resultantkraft

Kraften virker langs samme halveringslinje for vinkelen β som vist i figur 1.

Den termiske resultantkraften kan beregnes av formelen:

$$K_{\Delta T} = \frac{E\varphi\Delta T\pi(D^2-d^2)}{2} \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad 2)$$

E = materialets elastisitetsmodul (167000 MPa)

φ = termisk utvidelseskoeffisient ($10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

ΔT = temperaturendring fra installasjonstemperatur

D = ytre diameter (m)

d = indre diameter (m)

Dersom røret avkjøles, vil kraften (bevegelsen) virke i motsatt retning av den hydrauliske trykkraften. Varmes røret opp, vil den termiske kraften ha samme retning som trykkraften.

For å få en antydning på størrelsen på den termiske kraften, antas en temperaturendring på $\pm 10^\circ\text{C}$ regnet fra installasjonstidspunktet.

Innsettes aktuelle verdier i formel 3 for henholdsvis Ø600mm og Ø700mm, får man som eksempel for et 22,5° bend:

$$K_{\Delta T \text{Ø600}} = \pm \frac{167000 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot \pi (0,835^2 - 0,617^2)}{2} \cdot \sin\left(\frac{22,5}{2}\right) \text{N} = \pm 114 \text{ kN} \approx \pm 11,4 \text{ tonn}$$

$$K_{\Delta T \text{Ø600}} = \pm \frac{167000 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot \pi (0,738^2 - 0,717^2)}{2} \cdot \sin\left(\frac{22,5}{2}\right) \text{N} = \pm 154 \text{ kN} \approx \pm 15,4 \text{ tonn}$$

Sammenlikner man med trykkraftene på henholdsvis 33,1 tonn og 45,0 tonn, ser vi at tilleggskraften som følge av en temperendring på 10°C vil utgjøre ca. 34 %.

Bevegelsen (ΔL) av en rørlengde på $L = 6\text{m}$ kan beregnes ut fra formelen:

$$\Delta L = \varphi \cdot L \cdot \Delta T \quad 3)$$

$$\Delta L = 10^{-5} \cdot 6000 \cdot 10 \text{ mm} = \underline{\underline{0,6 \text{ mm}}}$$

Vi ser at den frie bevegelsen uten hensyn til friksjon mellom rør og omliggende masser vil utgjøre kun 0,6mm.

I praksis vil man alltid ha tilgjengelig en slik bevegelse i en strekkfast muffeskjøt selv om den er aktivert.

Med denne bakgrunn vil vi mene at temperaturendringer ikke vil medføre noen kritiske belastninger på muffeskjøter eller bend.

Temperaturspenningen ($\sigma_{\Delta T}$) som oppstår i rørvæggen dersom røret holdes fullstendig fiksert (uten mulighet til å bevege seg), kan beregnes av formelen:

$$\sigma_{\Delta T} = \varphi \cdot E \cdot \Delta T = 10^{-5} \cdot 167000 \cdot 10 \text{ MPa} = \underline{\underline{16,7 \text{ MPa}}} \quad 4)$$

Med en strekkfasthet på ca. 500 MPa for duktilt støpejern, vil denne tilleggsspenningen kun utgjøre ca. 3% av materialets bruddspenning og således være neglisjerbar.

3.3 Tverrkontraksjonskraft i et strekkfast system, resultatantkraft

Tverrkontraksjonskraften oppstår i et strekkfast rørsystem som følge av at et trykksatt rør, **som fastholdes**, ønsker å utvide seg i radiell retningen. I dette

tilfellet oppstår en strekkspenning i lengderetningen, som ønsker å forkorte røret.

Resultanten i dette tilfellet vil virke i motsatt retning av trykkraften.

$$K_V = \frac{v p \pi (SDR-1)(D^2-d^2)}{4} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad 5)$$

v = Poisson's tall (= 0,3)

$$SDR = \frac{\text{Midlere diameter}}{\text{godstykkelse}} \quad (= 70 \text{ for } \varnothing 600\text{mm og } \varnothing 700\text{mm})$$

Insettes aktuelle verdier for henholdsvis Ø600mm og Ø700mm, får man:

$$K_{V\varnothing 600} = \frac{0,3 \cdot 3,0 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot (70-1) \cdot (0,635^2 - 0,6172^2)}{4} \cdot \sin\left(\frac{22,5}{2}\right) \quad N = 212 \text{ kN} \approx \underline{21,2 \text{ tonn}}$$

$$K_{V\varnothing 700} = \frac{0,3 \cdot 3,0 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot (70-1) \cdot (0,738^2 - 0,7172^2)}{4} \cdot \sin\left(\frac{22,5}{2}\right) \quad N = 288 \text{ kN} \approx \underline{28,2 \text{ tonn}}$$

Vi ser at tværrkontraksjonskreftene er større enn temperaturkreftene. I praksis vil de, i et strekkfast system, bidra til å redusere bevegelsen i bended som følge av trykkreftene. Bevegelsen er dog liten og i **størrelsesorden 1mm pr. rørlengde**.

4 Belastning på parallelle rør i kurver

Det er fremsatt påstand om at hydrauliske krefter fra parallelle rør lagt i kurver med en avvikling i skjøtene på 2° vil påvirke naborøret negativt og medføre at man ikke oppnår tilstrekkelig forankring. I tillegg til de 2 støpejernsrørene Ø600mm og Ø700mm ligger det et Ø500mm PE100 SDR26 rør i grøfta.

Av tabellene 1 og 2 fremgår det at bendkreftene ved en avvikling på 2° i skjøtene, er henholdsvis 3 tonn for Ø600mm og 4 tonn for Ø700mm med respektive stabilitetslengder på 0,5m og 0,6m.

Antar man at disse kreftene blir overført som laster på naborøret med intensiteter tilsvarende det aktiveerte passive jordtrykket på q = 10 t/m²,

$$\varnothing 600\text{mm} \quad = \frac{3}{0,5 \cdot 0,6} \text{ t/m} = 10 \text{ t/m}^2$$

$$\varnothing 700\text{mm} \quad = \frac{4}{0,6 \cdot 0,7} \text{ t/m} = 10 \text{ t/m}^2$$

kan man beregne hvilken deformasjon (δ) naborøret vil få.

Først beregnes systemets stivhetsfaktor (S).

$$S = \frac{2E \left(\frac{D}{2}\right)^3}{3E_S'} \quad 6)$$

E = rørets elastisitetsmodul (MPa)

S = rørets godstykkelse (mm)

D = rørets utvendige diameter (mm)

E_{S'} = omfyllingsmassenes elastisitetsmodul (MPa)

Siden det påstås at komprimeringen av omfyllingsmassene har vært vanskelig, velges en komprimeringsgrad på kun 75% modifisert Proctor, hvilket for et grøftedyp på 2m gir en verdi $E_s' = 0,6$ MPa. Tilsvarende verdier av E-modulen for duktilt støpejern og PE100 er henholdsvis 167000 MPa og 200 MPa (50 års verdi basert på relaksasjon).

Vi får følgende stivhetsfaktorer:

$$\text{Ø600mm duktilt støpejern} \quad S_{600} = \frac{2 \cdot 167000 \cdot \left(\frac{8,9}{535}\right)^3}{3 \cdot 0,6} = \underline{\underline{0,51}}$$

$$\text{Ø700mm duktilt støpejern} \quad S_{700} = \frac{2 \cdot 167000 \cdot \left(\frac{10,4}{728}\right)^3}{3 \cdot 0,6} = \underline{\underline{0,51}}$$

$$\text{Ø500mm PE100 SDR 26} \quad S_{500} = \frac{2 \cdot 200 \cdot \left(\frac{19,2}{500}\right)^3}{3 \cdot 0,6} = \underline{\underline{0,013}}$$

Dimensjonerende moment (M) i rørveggen beregnes av formelen:

$$M = qr^2 \cdot \frac{0,25S+0,003}{S+0,122} \quad 7)$$

$$r = \text{rørets utvendige radius} = \frac{D}{2}$$

Vi får følgende momenter:

$$\text{Ø600mm duktilt støpejern} \quad M_{600} = 100000 \cdot 0,3175^2 \cdot \frac{0,25 \cdot 0,51 + 0,003}{0,51 + 0,122} \text{ Nm} = \underline{\underline{2082 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Ø700mm duktilt støpejern} \quad M_{700} = 100000 \cdot 0,3692^2 \cdot \frac{0,25 \cdot 0,51 + 0,003}{0,51 + 0,122} \text{ Nm} = \underline{\underline{2812 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Ø500mm PE100 SDR17} \quad M_{500} = 100000 \cdot 0,25^2 \cdot \frac{0,25 \cdot 0,013 + 0,003}{0,013 + 0,122} \text{ Nm} = \underline{\underline{289 \text{ Nm}}}$$

Når momentet er kjent, kan tilleggsspenningen (σ) i rørveggen i rørveggen som følge av belastningen fra nærliggende rør beregnes av formelen:

$$\sigma = \frac{6M}{s^2} \quad 8)$$

Innsettes aktuelle verdier, får man:

$$\text{Ø600mm duktilt støpejern} \quad \sigma_{600} = \frac{6 \cdot 2082 \cdot 10^{-6}}{0,00892^2} \text{ MPa} = \underline{\underline{158 \text{ MPa}}}$$

$$\text{Ø700mm duktilt støpejern} \quad \sigma_{700} = \frac{6 \cdot 2812 \cdot 10^{-6}}{0,01042^2} \text{ MPa} = \underline{\underline{156 \text{ MPa}}}$$

$$\text{Ø500mm PE100 SDR17} \quad \sigma_{500} = \frac{6 \cdot 289 \cdot 10^{-6}}{0,0192^2} \text{ MPa} = \underline{\underline{4,7 \text{ MPa}}}$$

For vannledningenes del vil denne tilleggsspenningen delvis oppheves av det innvendige trykket med en spenning på ca. 100 MPa. Restspenningen som vil medføre deformasjon av røret vil følgelig forårsakes av en spenning på ca. **60MPa**, det vil si ca. 40% av momentene beregnet foran.

De beregnede tilleggsspenningene for de duktile støpejernsrørene skal holdes opp mot materialets bruddspenning på 500 MPa, hvilket tilsier en meget god sikkerhet.

PE100 ledningen er en tømmeledning og har ikke noe innvendig vanntrykk. Imidlertid er tilleggsstressningen på 4,7 MPa langt under bruddspenningen på 10MPa (sikkerhetsfaktor $\frac{10}{4,7} = 2,1$).

PE100 ledningens levetid på minimum 100 år vil derfor ikke påvirkes av kreftene fra vannledningene i grøfta. Etter NS12201 skal sikkerhetsfaktoren være 1,6.

Tøyningen (ϵ) i rørveggen kan beregnes av formelen:

$$\epsilon = \frac{6M}{E \cdot S^2} \quad 9)$$

Med reduserte momenter på 60% for støpejernsrørene når de er trykksatt, får man følgende tøyninger:

$$\text{Ø600mm duktilt støpejern} \quad \epsilon_{600} = \frac{6 \cdot 0,4 \cdot 2082 \cdot 10^{-6}}{167000 \cdot 0,0089^2} \cdot 100 \% = \underline{\underline{0,04\%}}$$

$$\text{Ø700mm duktilt støpejern} \quad \epsilon_{700} = \frac{6 \cdot 0,4 \cdot 2812 \cdot 10^{-6}}{167000 \cdot 0,0104^2} \cdot 100 \% = \underline{\underline{0,04\%}}$$

$$\text{Ø500mm PE100 SDR17} \quad \epsilon_{500} = \frac{6 \cdot 289 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 0,0192^2} \cdot 100 \% = \underline{\underline{2,3\%}}$$

Alle disse tøyningene ligger langt innenfor akseptgrensene.

Når tøyningene er kjent, kan man beregne den fysiske radielle deformasjonen(δ) av røret via formelen:

$$\delta = \frac{eD^2}{6s} \quad 10)$$

$$\text{Ø600mm duktilt støpejern} \quad \delta_{600} = \frac{0,0004 \cdot 0,635^2}{6 \cdot 0,0089} \quad m = 0,003m = 3mm \quad \frac{\delta}{D} = \underline{\underline{0,5\%}}$$

$$\text{Ø700mm duktilt støpejern} \quad \delta_{700} = \frac{0,0004 \cdot 0,738^2}{6 \cdot 0,0104} \quad m = 0,0035m = 3,5mm \quad \frac{\delta}{D} = \underline{\underline{0,5\%}}$$

$$\text{Ø500mm PE100 SDR 11} \quad \delta_{500} = \frac{0,023 \cdot 0,5^2}{6 \cdot 0,0192} \quad m = 0,05m = 50mm \quad \frac{\delta}{D} = \underline{\underline{10\%}}$$

Alle disse deformasjonene ligger innenfor akseptgrensene. En lokal defleksjon på 10% for tømmeledningen vil gi en reduksjon i tverrsnittarealet på 1,43% og er således neglisjerbart.

Tilleggsdeformasjonen for de duktile støpejernsrørene på 0,5% skal sammenliknes med en tillatt deformasjon på 3,5% i henhold til NS545.

5 Strekkapasitet på røret

I anbudsbeskrivelsen er kravet at de duktile støpejernsrørene skal ha en strekkapasitet i de strekkfaste skjøtene tilsvarende et trykk på 30 bar for Ø600mm og 27 bar for Ø700mm. Det er nå brakt på det rene ved sertifikater fra produsenten at de leverte rør ikke tilfredsstillter spesifikasjonen i anbudet og er levert med en strekkapasitet på 16 bar.

Hva denne mangelen i leveransen betyr i praksis, er beregnet i det etterfølgende.

Tillatt strekkraft (K_S) i lengderetningen beregnes av formelen:

$$K_S = p \frac{\pi d^2}{4} \quad (11)$$

For 16 bar (1,6MPa), 27 bar (2,7 MPa) og 30 bar (3,0 MPa) blir resultatet for henholdsvis Ø600mm og Ø700mm:

$$K_{S,16\text{bar},600} = 1,6 \cdot 10^6 \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} \text{ N} = \mathbf{452 \text{ kN} \approx 46 \text{ tonn}}$$

$$K_{S,16\text{bar},700} = 1,6 \cdot 10^6 \frac{\pi \cdot 0,7^2}{4} \text{ N} = \mathbf{615 \text{ kN} \approx 63 \text{ tonn}}$$

$$K_{S,30\text{bar},600} = 3,0 \cdot 10^6 \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} \text{ N} = \mathbf{847 \text{ kN} \approx 86 \text{ tonn}}$$

$$K_{S,27\text{bar},700} = 2,7 \cdot 10^6 \frac{\pi \cdot 0,7^2}{4} \text{ N} = \mathbf{1038 \text{ kN} \approx 105 \text{ tonn}}$$

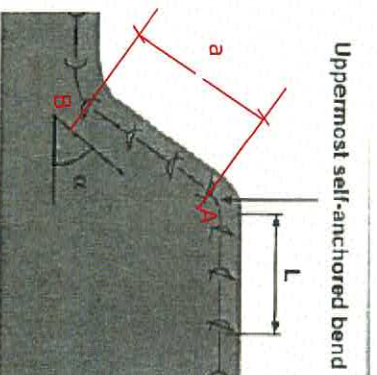
Dette viser at kapasiteten på de strekkfaste koblingene er redusert med 46 % for Ø600mm og 41% for Ø700mm, hvilket er betydelig.

I prosjektet har de strekkfaste koblingene følgende funksjoner:

- 1) Unngå bygging av forankringsklosser ved bend
- 2) Unngå bevegelse av rørene ved bend og i kurver
- 3) Sikre stabilitet i skrånende terreng
- 4) Sikre stabilitet i myrområde med lite mobiliserbart jordtrykk

Der ledningen ligger i skrånende terreng, vil man ifølge referanse [2] få påført strekkrefter i rørets lengderetning fra overfylingsmassene når helningen overskrider $\alpha = 14^\circ$ (tilsvarende $\text{tg}\alpha = \mu = 0,25$).

Situasjonen er vist illustrativt i figur 3.



Figur 3. Prinsipp for forankring av ledningen med strekkfaste skjøter i skrånende terreng

I et slikt tilfelle vil vekten (P) av de overliggende massene, vekten av røret og vekten av vannet gi en kraftkomponent i rørets lengderetning som vist i figur 4.

Denne kraftkomponenten (K_L) kan uttrykkes:

$$K_L = P \cdot \sin \alpha = (\gamma \cdot H \cdot D + W_{rør} + W_{vann}) \cdot \alpha \cdot \sin \alpha \quad (12)$$

γ = egenvekt av gjenfyllingsmasse (kN/m³)

H = overdekningshøyde (m)

D = utvendig diameter (m)

α = lengde av skrånning (m)

α = Skrånningens helningsvinkel (°)

$W_{rør}$ = vekt av rør (kN/m)

W_{vann} = vekt av vann innvendig i rør (kN/m)

Denne kraften K_L vil motvirkes av friksjonskraften F_f som vist i figur 4.

Friksjonskraften F_f kan uttrykkes:

$$F_f = K_L \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \mu + 2 \cdot a \cdot \gamma \cdot [1 - \sin \varphi] \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \text{tg} \varphi \quad (13)$$

μ = friksjonskoeffisient mellom rør og underliggende masser

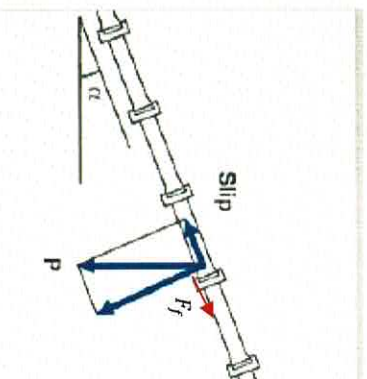
φ = intern friksjonsvinkel i massene

Netto kraften K som vil overføres som strekk i røret, vil være differansen mellom den drivende kraften og friksjonskraften:

$$K = K_L - K_f = a[(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha) \cdot (\gamma \cdot H \cdot D + W_{rør} + W_{vann}) - 2 \cdot \gamma \cdot [1 - \sin \varphi] \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \text{tg} \varphi] \quad (14)$$

Siden det er opplyst at omfyllingsmassene er dårlig komprimert og at man kan forvente at det i perioder med nedbør vil være stor grunnvannstrøm i grøfta, setter vi hviletrykkskoeffisienten $K_0 = (1 - \sin \varphi) = 0$. Dette betyr at det siste leddet i likning 14 kan neglisjeres.

Med bakgrunn i formel 12), 13) og 14) kan man med denne forutsetningen beregne maksimal lengde av skrånningen (a_{maks}) når man setter K lik rørets strekkkapasiteten K_s , beregnet foran.



Figur 4. Kraftkomponenter fra overdekningmasser i skrånende terreng ($\alpha > 14^\circ$)

$$a_{maks} = \frac{K_s}{(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha) \cdot (\gamma \cdot H \cdot D + W_{rør} + W_{vann})} \quad (15)$$

Innsattes aktuelle verdier i formel 15) for den mest kritiske strekkningen (kfr. figur 5) med helning 17,2° og lengde 74m, får man:

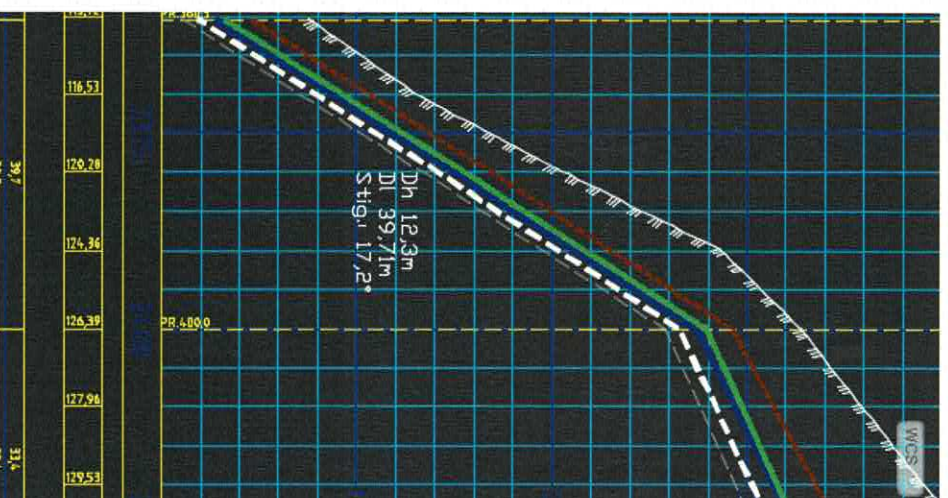
$$Q_{maksØ600} = \frac{452}{(\sin 17,2 - 0,25 \cdot \cos 17,2) \cdot (1,6 \cdot 1,6 - 0,635 + 1,82 + 3,1)} \text{ m} = \mathbf{375 \text{ m}}$$
$$Q_{maksØ700} = \frac{615}{(\sin 17,2 - 0,25 \cdot \cos 17,2) \cdot (1,6 \cdot 1,6 - 0,738 + 2,14 + 4,2)} \text{ m} = \mathbf{428 \text{ m}}$$

Dette betyr i praksis at sikkerhetsfaktoren mot brudd i lengeretningen er henholdsvis $\frac{375}{74} = 5,1$ for Ø600mm og $\frac{428}{74} = 5,8$ for Ø700mm.

Dette er en meget tilfredsstillende sikkerhet, hvilket betyr at det leverte rør med 16 bar strekkapasitet ikke vil være i noen kritisk tilstand i bratt terreng.

I tillegg til kraften fra overfyllingsmassene vil man i mer eller mindre grad kunne få krefter fra temperaturendringer og tverrkontraksjon avhengig av hvordan spissene er plassert i muffene.

Ved et aktivert rørsystem vil den største påkjenningen på låseringen komme i muffen i punkt A på figur 3 som en strekkraft, mens den ved et "stابت system" (spissenden maksimalt inn i muffa) vil komme i punkt B som en trykkraft.



Figur 5. Kritisk strekking for beregning av sikkerhet i strekkfaste muffe

Den aksiale strekk kapasiteten i muffeskjøtene vil også ha betydning i forbindelse med forankring av vertikale bend.

I et 100% aktivert system vil strekkkraften (K_L) i rørets lengderetning ved en vinkelendring α i et bend, kunne uttrykkes:

$$K_L = p \frac{\pi d^2}{4} (1 - \cos \alpha) \quad (16)$$

Vi ser at denne kraften ved et 90° bend vil være lik den dimensjonerende strekk kapasiteten beregnet tidligere med formel 11. Det beskrivne rørproduktet i anbudsdokumentet skal tåle strekket som oppstår i låseringene i muffene for henholdsvis 30 bar for Ø600mm og 27 bar for Ø600mm. Hvilken vinkel de leverte rørene med 16 bar strekk kapasitet vil tåle, kan beregnes av formelen:

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{D_{\text{bevert}}}{P_{\text{strekkefest}}} \right) \quad (17)$$

Vi får følgende resultat for henholdsvis Ø600mm og Ø700mm:

$$\alpha_{600} = \arccos \left(1 - \frac{16}{30} \right) = \mathbf{62^\circ}$$

$$\alpha_{700} = \arccos \left(1 - \frac{16}{27} \right) = \mathbf{66^\circ}$$

Vi ser at reduksjonen i strekk kapasitet på de leverte rør, forutsatt full aktivering, tilsvarer at de vil kunne tåle prøvetrykket så lenge bendvinklene er mindre enn henholdsvis 62° og 66°. Dette er i utgangspunktet tilstrekkelig for det aktuelle prosjektet.

Det største bendedet i prosjektet er et kombinasjonsbend med 45° horisontalt og 12° vertikalt, hvilket utgjør en romvinkel på **46,2°**.

Strekkraften i røret ved dette bendedet blir ved 30 bar på Ø600mm og 27bar på Ø700mm ledningen:

$$K_{L\text{Ø}600,46,2^\circ} = 3,0 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} (1 - \cos 46,2^\circ) \text{N} = \mathbf{261 \text{ kN}}$$

$$K_{L\text{Ø}700,46,2^\circ} = 2,7 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,7^2}{4} (1 - \cos 46,2^\circ) \text{N} = \mathbf{330 \text{ kN}}$$

Dette gir sikkerhetsfaktorene $\frac{452}{261} = 1,73$ for Ø600mm og $\frac{615}{330} = 1,86$ for Ø700mm ledningen.

I NS-EN 545 ligger sikkerhetsfaktorene for trykkinduserte spenninger i området [2,5 – 3,0], hvilket betyr at det leverte røret med 16 bar strekkkapasitet gir en lavere sikkerhetsfaktor enn anbefalt i standarden.

Legger man til grunn en sikkerhetsfaktor på 2,5, vil bend større enn ca. 38° ikke tilfredsstille kravet.

6 Vinkelendring ved parallelle rør i kurver

Det er prosjektert kurver med en vinkelendring på $\alpha = 2^\circ$ for rør i kurver med rørlengder av 6m. Dette gir en kurveradius (R) som kan beregnes av formelen:

$$R = \frac{L}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (18)$$

$$R = \frac{6}{2 \sin \frac{2}{2}} \text{ m} = \underline{\underline{171,9\text{m}}}$$

Når 2 rør ligger parallelt (Ø600mm og Ø700mm) med 250mm lysåpning, vil røret i innersving kunne få en radius på (171,9 – 0,25 – 0,35 – 0,3) m = 171m, dersom stikningslinjen gjelder for røret i ytersvingen. Hva denne reduserte radien betyr i ekstra vinkelendring, kan beregnes.

$$\alpha_{\text{innersving}} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{L}{2R}\right) \quad (19)$$

$$\alpha_{\text{innersving}} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{6}{2 \cdot 171}\right)^\circ = \underline{\underline{2,01^\circ}}$$

Vi ser at en slik vinkelendring bare tilsvarer 0,01°, hvilket i praksis er langt innenfor de toleranser som muffeskjøtene tåler. 0,01° avvik på en **rørlengde på 6m vil utgjøre en siderforskyvning på 1mm.**

7 Konklusjon

-Beregningene viser at den **horisontale stabiliteten** i alle **ledningskurver** i prosjektet **er ivaretatt** selv om de strekkfaste skjøtene ikke er aktivert i henhold til leverandørens leggeanvisning.

-**Temperaturspenninger** i et strekkfast, aktivert rørsystem av duktilt støpejern **er neglisjerbare.**

-**Tverrkontraksjonsspenninger** i et strekkfast, aktivert rørsystem av duktilt støpejern er **neglisjerbare** og i samme størrelsesorden som temperaturspenningene.

-**Tilleggsspenninger** som følge av bevegelse i parallelle **ikke aktive naborør** i grøfta er **innenfor akseptable verdier** for spenninger, tøyninger og deformasjoner med tilstrekkelig grad av sikkerhet.

-De **leverte rør** med strekkapasitet tilsvarende et trykk på **16 bar** har **redusert sikkerhetsfaktoren** i prosjektet **til verdier lavere enn det som anbefales i standarden NS-EN 545** for duktile støpejernsrør ved **forankring av bend større enn 38°**. Største opptredende romvinkel er 46,2°. I bratt terreng er sikkerhetsfaktorene tilfredsstillende.

-**Forskjellen på vinkelendringen for parallelle rør** i innerkurve og yterkurve lagt med vinkelendring i skjøtene på 2° er **neglisjerbare.**

8 Referanser

- [1] Rørbok, ytre førledningar. Gutavsbjerg, November 1975.
- [2] Pont-A-Mousson. Ductile Iron Pipelines. 1992.
- [3] Saint-Gobain. Hydrauliske skyvekretter ved strekkfaste skjøter. Februar 2008.
- [4] VA/Miljøblad 16. Kravspesifikasjon for ductile støpejernsrør. Mars 2012.
- [5] VA/Miljøblad 96. Forankring av trykkledninger. Juni 2010.
- [6] VA/Miljøblad 112. Kumsikkerhet-dimensjonering av prefabrikkert vannkum. 2015.
- [7] Smedby og Kobberstad. Tekniske regnetabeller. 1984.
- [8] Design and Installation of Buried Plastic Pipes. Lars-Eric Jansson and Jan Molin, January 1991
- [9] Aksel Lydersen. Kjemiteknikk. Tapir forlag. 1972.
- [10] Hans Erik Anders Bossel og Mats Breien Haugen. Forankring av rørgater i bratt terreng. NTNU, Juni 2013.

