Politechnika Wrocławska

Projektowanie przewodów w technologii mikrotunelowania i przecisku hydraulicznego z użyciem standardu DWA-A 161

Przykład

(za Madryas C., Kuliczkowski A., Tunele wieloprzewodowe. Dawniej i obecnie. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2014)

Bogdan Przybyła

Katedra Mechaniki Budowli i Inżynierii Miejskiej Politechniki Wrocławskiej

Kolejność obliczeń mikrotunelu dla rury z kompozytu GRP

(na podstawie przykładu w (Kuliczkowski A., Madrysa C.)

- przyjęcie parametrów gruntu w strefie ułożenia przewodu,
- przyjęcie parametrów i charakterystyk rury i złączek,
- zebranie obciążeń mechanicznych:
    - obciążenie gruntem,
    - obciążenie od taboru samochodowego,
    - obciążenie od taboru tramwajowego,

- Sprawdzenie warunków nośności, stateczności i deformacji w płaszczyźnie przekroju poprzecznego przewodu – **etap realizacji,**
    - ustalenie wielkości oddziaływań na rurę,
    - wyznaczenie wartości sił wewnętrznych,
    - warunek nośności przekroju,
    - warunek deformacji względnej przekroju poprzecznego,
    - warunek stateczności,
- Sprawdzenie warunków nośności rury w kierunku podłużnym,
    - określenie dopuszczalnej siły przeciskającej dla odcinka o kształcie łuku
    - oszacowanie maksymalnej siły przeciskającej mikrotunel (cały układ),

    } niezależne od wytycznej

    - warunku nośności przekroju (uwaga – w przykładzie warunek ma postać „ukrytą”

Kolejność obliczeń mikrotunelu dla rury z kompozytu GRP c.d.

- Sprawdzenie warunków nośności, stateczności i deformacji w płaszczyźnie przekroju poprzecznego przewodu – **etap eksploatacji**
    - ustalenie wielkości oddziaływań na rurę,
    - wyznaczenie wartości sił wewnętrznych,
    - warunek nośności przekroju,
    - warunek deformacji względnej przekroju poprzecznego,
    - warunek stateczności,

- ***Obliczenia statyczno – wytrzymałościowe komory startowej,***
    - założenia i profil geotechniczny,
    - wyznaczenie parć czynnych i biernych,
    - rozwiązanie ścianki szczelnej przy założeniu przegubowego podparcia w gruncie,
        - głębokość projektowanej ścianki,
        - wyznaczenie reakcji w podporze,
        - wskaźnik wytrzymałości na zginanie,
        - obliczenia statyczno wytrzymałościowe rozparć,
- Obliczenia bloku oporowego,
    - założenia co do konstrukcji bloku,
    - wyznaczenie sztywności podłoża gruntowego za ścianką szczelną,
    - wymiarowanie bloku oporowego,
    - sprawdzenie nośności podłoża gruntowego za blokiem oporowym,
- Obliczenia odwodnienia wykopu

❖ ***Parametry mechaniczne gruntu w strefie posadowienia przewodu***

W obszarze posadowienia tunelu występuje grunt typu G4 o następujących parametrach:

- wskaźnik zagęszczenia gruntu według Proctora $D_{Pr} = 90\%$
- kąt tarcia wewnętrznego $\varnothing' = 20°$

przyjmowane domyślnie 92%
o ile nie ma innych danych, wtedy
tabela gr. gruntu, kol. dla E_B

- współczynnik parcia bocznego $K_1 = 0,5$
- ciężar objętościowy gruntu $\gamma_B = 20\,\mathrm{kN/m^3}$
- ciężar objętościowy pod poziomem zwierciadła wody gruntowej $\gamma_B' = 10\,\mathrm{kN/m^3}$
- moduł odkształcenia gruntu w strefie posadowienia wyznaczony ze wzoru:

$$E_B = \frac{40}{G} \cdot e^{-0,188(100-D_{Pr})}\,\mathrm{MPa} = \frac{40}{4} \cdot e^{-0,188(100-90)}\,\mathrm{MPa} = 1,5\,\mathrm{MPa} \qquad (4.1)$$

Wg.ATV A 127

G – numer grupy gruntu wg ATV A 127

Maksymalna wysokość przekrycia tunelu wynosi $h = 5,4$ m, a maksymalny poziom wody gruntowej powyżej klucza przewodu $h_w = 2,0\,\mathrm{m}$.

Jako obudowę tunelu przyjęto rurę z kompozytu GRP o średnicy nominalnej DN3000 i sztywności obwodowej SN 80000 N/m^2. Długość pojedynczego segmentu tunelu (rury) wynosi 3,0 m. Poniżej zestawiono parametry rury niezbędne do wykonania obliczeń statyczno-wytrzymałościowych niezbędnych do weryfikacji poprawności przyjętego typu rury.

Parametry geometryczne:

- średnica zewnętrzna rury DN3000 $d_a = 3000\,\text{mm}$
- średnica wewnętrzna rury DN3000 $d_i = 2746\,\text{mm}$
- uśredniony promień rury DN3000 $r_m = 1436{,}5\,\text{mm}$
- promień wewnętrzny rury DN3000 $r_i = 1373\,\text{mm}$
- grubość ścianki rury $s = 127\,\text{mm}$
- średnia średnica rury

$$d_m = \frac{d_i + d_a}{2} = 2873\ \text{mm}$$

- jednostkowy wskaźnik zginania przekroju ścianki

$$W = \frac{1\,\text{mm} \cdot s^2}{6 \cdot 1\,\text{mm}} = 2688{,}17\,\frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}$$

- jednostkowy moment bezwładności ścianki przewodu

$$I = \frac{1\,\text{mm} \cdot s^3}{12 \cdot 1\,\text{mm}} = 170698{,}58\,\frac{\text{mm}^4}{\text{mm}}$$

- jednostkowe pole powierzchni przekroju ścianki

$$A = \frac{1\,\text{mm} \cdot s}{1\,\text{mm}} = 127\,\frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

uwaga na jednostki, problem definicji DN

Parametry wytrzymałościowe:

– moduł sprężystości przy zginaniu obwodowym (wartość krótkookresowa)

$$E_R = \frac{12 \cdot S_0 \cdot d_m^3}{s^3} = \frac{12 \cdot \left(80000 \cdot 10^{-6}\right) \mathrm{N/m^2} \cdot \left(2873\ \mathrm{mm}\right)^3}{\left(127\ \mathrm{mm}\right)^3} = 11113{,}9\ \mathrm{MPa} \quad (4.6)$$

– moduł sprężystości przy zginaniu obwodowym (wartość długookresowa)

$$E_{RL} = 0{,}4 \cdot E_R = 4445{,}56\ \mathrm{MPa} \quad (4.7)$$

obliczone na podstawie S_o producenta i podstawowych wzorów

Tabela 2, załączni A nowa wersja wytycznej, materiały producenta

– moduł sprężystości przy ściskaniu wzdłuż osi rury (wartość krótkookresowa)	$E_{RD} = 18{,}0$ GPa
– moduł sprężystości przy ściskaniu wzdłuż osi rury (wartość długookresowa)	$E_{RDL} = 10{,}0$ GPa
– wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż osi rury (wartość krótkookresowa)	$\beta_z = 8{,}4$ MPa
– wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż osi rury (wartość długookresowa)	$\beta_{zL} = 1{,}1$ MPa

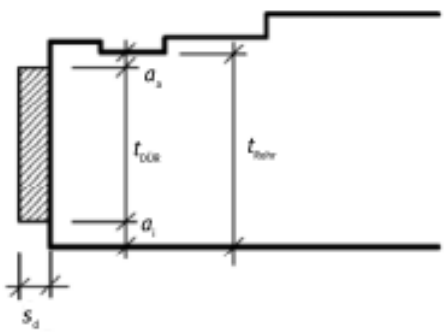
- wytrzymałość na ściskanie wzdłuż osi rury (wartość krótkookresowa) $\beta_{LD} = 85$ MPa
- wytrzymałość na ściskanie wzdłuż osi rury (wartość długookresowa) $\beta_{LDL} = 20{,}4$ MPa
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w kierunku obwodowym (wartość krótkookresowa) $\beta_{RBZ} = 120$ MPa
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w kierunku obwodowym (wartość długookresowa) $\beta_{RBZL} = 38{,}4$ MPa
- ciężar objętościowy materiału rury $\gamma_f = 20$ kN/m^3

Parametry geometryczne połączenia:

- wrąb (grubość ścianki po sfrezowaniu) $w = 111$ mm
- pole powierzchni ścianki sfrezowanej wyznaczone ze wzoru

$$A = \pi\left(w \cdot \left(w + 2r_i\right)\right) = \pi \cdot \left(111 \cdot \left(111 + 2 \cdot 1373\right)\right) = 996283{,}9 \text{ mm}^2$$

niezrozumiały wzór



❖ *Obciążenia mechaniczne*

- Wstępnie założono brak potrzeby stosowania pośrednich stacji siłowników

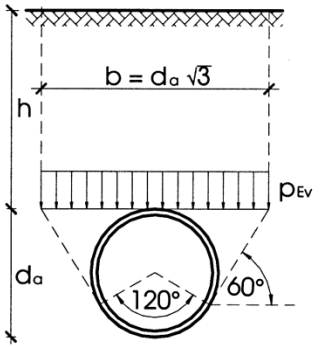
Obciążenia gruntem:

Szerokość bryły gruntu obciążającej przewód

$$b = d_a \cdot \sqrt{3} = 3{,}0 \cdot \sqrt{3} = 5{,}196 \text{ m}$$

Kąt tarcia między bryłą gruntu nad rurą a sąsiadującym gruntem

$$\delta = \frac{\varnothing'}{2} = \frac{20°}{2} = 10°$$



Współczynnik redukcyjny obciążenia pionowego

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2 \cdot K_1 \cdot \frac{h}{b} \cdot \operatorname{tg}(\delta)}}{2 \cdot K_1 \cdot \frac{h}{b} \cdot \operatorname{tg}(\delta)} = \frac{1 - e^{-2 \cdot 0{,}5 \cdot \frac{5{,}4}{5{,}196} \cdot \operatorname{tg}(10°)}}{2 \cdot 0{,}5 \cdot \frac{5{,}4}{5{,}196} \cdot \operatorname{tg}(10°)} = 0{,}914$$

Współczynnik zmniejszający wg Terzagiego (można odczytać z nomogramu)

jest to χ w wytycznej, wzór jest podany – uwaga na zapis - tg dotyczy tylko kąta $\phi/2$ jak tutaj podano

Obciążenia od taboru samochodowego:

Przy założonej klasie obciążeń SLW 60 przyjęto następujące wielkości:

$F_A = 100$ kN,

$F_E = 500$ kN,

$r_A = 0,25$ m,

$r_E = 1,82$ m.

Obciążenia i promienie pomocnicze wg tabeli 5 wytycznej

Wartość a_f obliczono ze wzoru

Współczynnik korekcyjny dla małych wys. przekrycia

$$a_f = 1 - \frac{0,9}{0,9 + \frac{4 \cdot h^2 + h^6}{1,1 \cdot d_m^{2/3}}} = 1 - \frac{0,9}{0,9 + \frac{4 \cdot 5,4^2 + 5,4^6}{1,1 \cdot 2,873^{2/3}}} = 1,00$$

Nomogramy …

Charakterystyczne ciśnienie w gruncie powodowane przez obciążenie komunikacyjne naziomu wyznaczono z zależności

$$p_F = \frac{F_A}{r_A^2 \cdot \pi}\left[1 - \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r_A}{h}\right)^2}\right]^{\frac{3}{2}}\right] + \frac{F_E \cdot 3}{h^2 \cdot 2 \cdot \pi}\left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r_E}{h}\right)^2}\right]^{\frac{5}{2}} = 7,889 \text{ kPa},$$

rozwiązanie wg. teorii Boussinequ'a

$$p = a_f \cdot p_F = 7,889 \text{ kPa}$$

Współczynnik dynamiczny dla obciążenia klasy SLW 60 przyjmuje wartość

$$\varnothing = 1{,}2$$

Obliczeniowe ciśnienie w gruncie od taboru samochodowego naziomu z uwzględnieniem wpływów dynamicznych wynosi

$$p_v = \varnothing \cdot p = 9{,}467 \text{ kPa} \qquad (4.15)$$

Dla przekrycia powyżej 1,5 m zasadniczo pomijalne (wytyczna)
Dla obciążeń od transportu szynowego i samolotów nie

Obciążenia od taboru tramwajowego:

Przy przekryciu tunelu $h = 5{,}4 \text{ m} < 5{,}5 \text{ m}$ oraz linii dwutorowej obciążenie od taboru tramwajowego p wynosi (co wynika z wykresu dla taboru UIC 71 według wytycznych ATV 127)

Dalej zbierane obciążenia od taboru tramwajowego (kolejowego), jest nomogram,
W nowej wersji wytycznej rozwiązane bardziej szczegółowe.

Obliczeniowe ciśnienie w gruncie od taboru tramwajowego naziomu wynosi

$$p_v = \varnothing \cdot p = 1{,}0 \cdot 26{,}473 \text{ kPa} = 26{,}473 \text{ kPa} \qquad (4.17)$$

Jako bardziej niekorzystny wariant obciążeń do dalszych obliczeń przyjęto większe obciążenie tunelu, tzn. taborem tramwajowym.

SPRAWDZENIE WARUNKÓW NOŚNOŚCI, STATECZNOŚCI I DEFORMACJI W PŁASZCZYŹNIE PRZEKROJU POPRZECZNEGO PRZEWODU – etap realizacji

Wielkości oddziaływań na rurę:

Współczynnik parcia bocznego w strefie posadowienia rury $K_2 = 0,3$

Tab.1. grupy gruntów

Pionowe ciśnienie w gruncie na poziomie sklepienia rury

$$p_{Ev} = \kappa \cdot \left[\gamma'_B \cdot h_w + \gamma_B \cdot (h - h_w) \right] =$$

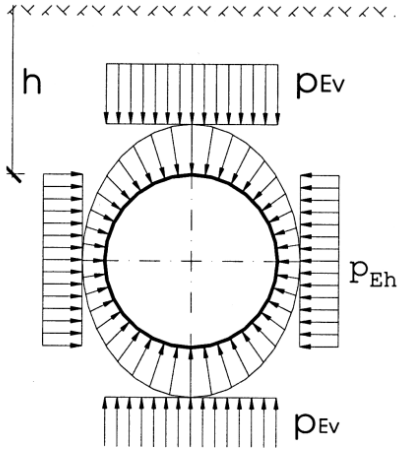
$$= 0,914 \cdot \left[10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 2,0\,\text{m} + 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot (5,4\,\text{m} - 2,0\,\text{m}) \right] = 80,432\ \text{kPa}$$

bez efektu deformacji rury

Poziome ciśnienie w gruncie na poziomie osi podłużnej rury

$$p_{Eh} = K_2 \cdot \left(p_{Ev} + \frac{d_a}{2} \cdot \gamma_B \right) = 0,3 \cdot \left(80,432\,\text{kPa} + \frac{3,0\,\text{m}}{2} \cdot 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) =$$

$$= 33,130\,\text{kPa}$$



Schemat obciążenia gruntem rury przeciskowej

tu bez ciśnienia bocznego wody - jest przyjmowane niezależnie

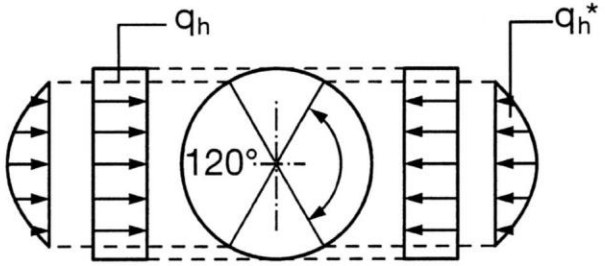
dla ujęcia efektu deformacji rury

Wskaźnik sztywności układu rura–grunt oblicza się ze wzoru

$$V_{RB} = 0{,}14 \cdot \frac{E_R}{E_B} \cdot \left(\frac{s}{r_m}\right)^3 = 0{,}14 \cdot \frac{11113{,}91\,\text{MPa}}{1{,}5\,\text{MPa}} \cdot \left(\frac{127\,\text{mm}}{1436{,}5\,\text{mm}}\right)^3 = 0{,}717 \qquad (4.20)$$

Współczynnik parcia bocznego od reakcji posadowienia wyraża zależność

$$K^* = \frac{0{,}0833}{V_{RB} + 0{,}066} = \frac{0{,}0833}{0{,}717 + 0{,}066} = 0{,}106$$



Poziome parcie od reakcji posadowienia wywołane deformacją rury pod obciąże-
niem komunikacyjnym oblicza się z równania

$$q^*_{hv} = p_v \cdot K^* = 26{,}473\,\text{kPa} \cdot 0{,}106 = 2{,}806\,\text{kPa} \qquad (4.22)$$

Poziome parcie od reakcji posadowienia wywołane deformacją rury od pionowego parcia gruntu oblicza się ze wzoru

$$q^*_{hE} = K^* \cdot \left(p_{Ev} - p_{Eh}\right) = 0{,}106 \cdot \left(80{,}432 - 33{,}130\right)\text{kPa} = 5{,}014\,\text{kPa} \qquad (4.23)$$

Wartości sił wewnętrznych:

Wartości sił wewnętrznych od działania siły przeciskającej:

- moment zginający w sklepieniu rury

$$M_{Nk} = 33 \cdot r_m{}^2 = 33 \cdot 1,4365^2 = 68,097 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- moment zginający w wezgłowiach rury

$$M_{Nw} = -33 \cdot r_m{}^2 = 33 \cdot 1,4365^2 = -68,097 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- moment zginający w dnie rury

$$M_{Nd} = 33 \cdot r_m{}^2 = 33 \cdot 1,4365^2 = 68,097 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w sklepieniu rury

$$N_{Nk} = -100 \cdot r_m = -100 \cdot 1,4365 = -143,650 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w wezgłowiach rury

$$N_{Nw} = -200 \cdot r_m = -200 \cdot 1,4365 = -287,300 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w dnie rury

$$N_{Nd} = -100 \cdot r_m = -100 \cdot 1,4365 = -143,650 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Wartości sił wewnętrznych od ciężaru własnego rury:

- moment zginający w sklepieniu rury

$$M_{Gk} = 0,345 \cdot s \cdot \gamma_r \cdot r_m{}^2 = 0,345 \cdot 0,127 \cdot 20 \cdot 1,4365^2 = 1,808 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- moment zginający w wezgłowiach rury

$$M_{Gw} = -0,393 \cdot s \cdot \gamma_r \cdot r_m{}^2 = -0,393 \cdot 0,127 \cdot 20 \cdot 1,4365^2 = -2,060 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- moment zginający w dnie rury

$$M_{Gd} = 0,411 \cdot s \cdot \gamma_r \cdot r_m{}^2 = 0,411 \cdot 0,127 \cdot 20 \cdot 1,4365^2 = 2,311 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w sklepieniu rury

$$N_{Gk} = 0,167 \cdot s \cdot \gamma_r \cdot r_m = 0,167 \cdot 0,127 \cdot 20 \cdot 1,4365 = 0,609 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w wezgłowiach rury

$$N_{Gw} = -1,571 \cdot s \cdot \gamma_r \cdot r_m = -1,571 \cdot 0,127 \cdot 20 \cdot 1,4365 = -5,732 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w dnie rury

$$N_{Gd} = -1,737 \cdot s \cdot \gamma_r \cdot r_m = -1,737 \cdot 0,127 \cdot 20 \cdot 1,4365 = -6,338 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Wartości sił wewnętrznych od parcia gruntu:

- moment zginający w sklepieniu rury

$$M_{Ek} = 0,1636 \cdot p_{Ev} \cdot {r_m}^2 = 0,1636 \cdot 80,432 \cdot 1,4365^2 = 27,153 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- moment zginający w wezgłowiach rury

$$M_{Ew} = -0,1636 \cdot p_{Ev} \cdot {r_m}^2 = -0,1636 \cdot 80,432 \cdot 1,4365^2 = -27,153 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- moment zginający w dnie rury

$$M_{Ed} = 0,1636 \cdot p_{Ev} \cdot {r_m}^2 = 0,1636 \cdot 80,432 \cdot 1,4365^2 = 27,153 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w sklepieniu (kluczu) rury

$$N_{Ek} = -0,4978 \cdot p_{Ev} \cdot r_m = -0,4978 \cdot 80,432 \cdot 1,4365 = -57,516 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w wezgłowiach rury

$$N_{Ew} = -1 \cdot p_{Ev} \cdot r_m = -1 \cdot 80,432 \cdot 1,4365 = -115,541 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w dnie rury

$$N_{Ed} = -0,4978 \cdot p_{Ev} \cdot r_m = -0,4978 \cdot 80,432 \cdot 1,4365 = -57,516 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Wartości sił wewnętrznych od obciążenia komunikacyjnego:

- moment zginający w sklepieniu rury

$$M_{Pk} = 0,25 \cdot p_v \cdot r_m{}^2 = 0,25 \cdot 26,473 \cdot 1,4365^2 = 13,657 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- moment zginający w wezgłowiach rury

$$M_{Pw} = -0,25 \cdot p_v \cdot r_m{}^2 = -0,25 \cdot 26,473 \cdot 1,4365^2 = -13,657 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- moment zginający w dnie rury

$$M_{Pd} = 0,25 \cdot p_v \cdot r_m{}^2 = 0,25 \cdot 26,473 \cdot 1,4365^2 = 13,657 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w sklepieniu rury

$$N_{Pk} = -0,25 \cdot p_v \cdot r_m = -0,25 \cdot 26,473 \cdot 1,4365 = -9,507 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w wezgłowiach rury

$$N_{Pw} = -1 \cdot p_v \cdot r_m = -1 \cdot 26,473 \cdot 1,4365 = -38,028 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- siła osiowa w dnie rury

$$N_{Pd} = -0,25 \cdot p_v \cdot r_m = -0,25 \cdot 26,473 \cdot 1,4365 = -9,507 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Wartości sił wewnętrznych od ciśnienia wody gruntowej:

- ciężar objętościowy wody $\gamma_w = 10\ \text{kN/m}^3$
- ciśnienie obwodowe od działania wody gruntowej

$$p_w = (h_w + r_a) \cdot \gamma_w = (2{,}0 + 1{,}5) \cdot 10 = 35\,\text{kPa} \qquad (4.49)$$

bierze się pod uwagę słup wody od połowy wys. rury do poziomu ponad jej górną krawędzią w gruncie, oddzielnie bierze się wodę do poziomu sklepienia uwzględniając wtedy efekt wyporu wody na rurę i grunt – 6.2.5 i 6.2.7 wytycznej.

W wytycznej p_a

- współczynnik pomocniczy

$$c = \frac{1}{2} - \frac{r_a \cdot r_i}{(r_a)^2 - (r_i)^2} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1{,}500 \cdot 1{,}373}{(1{,}500)^2 - (1{,}373)^2} \cdot \ln\left(\frac{1{,}500}{1{,}373}\right) =$$
$$= 0{,}00065$$

- wartości momentów zginających w sklepieniu, wezgłowiu i dnie rury są identyczne i wynoszą

Momenty są zazwyczaj pomijalnie małe

$$M_{pwk} = M_{pww} = M_{pwd} = -p_w \cdot c \cdot r_a \cdot r_i =$$
$$= -35 \cdot 0{,}00065 \cdot 1{,}500 \cdot 1{,}373 = -0{,}05\,\frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \qquad (4.50)$$

- wartości sił osiowych w sklepieniu, wezgłowiu i dnie rury są identyczne i wynoszą

$$N_{pwk} = N_{pww} = N_{pwd} = -p_w \cdot r_i = -35 \cdot 1{,}373 = -48{,}06\,\frac{\text{kN}}{\text{m}} \qquad (4.51)$$

Wartości sił wewnętrznych od reakcji posadowienia:

Zgodnie z rysunkiem wyjściowym dla rur podatnych !

- od obciążeń komunikacyjnych
  - moment zginający w sklepieniu rury

$$M^*_{ghvk} = -0{,}181 \cdot q^*_{hv} \cdot r_m{}^2 = -0{,}181 \cdot 2{,}806 \cdot 1{,}4365^2 = -1{,}048 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \qquad (4.52)$$

  - moment zginający w wezgłowiach rury

$$M^*_{ghvw} = 0{,}208 \cdot q^*_{hv} \cdot r_m{}^2 = 0{,}208 \cdot 2{,}806 \cdot 1{,}4365^2 = 1{,}204 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \qquad (4.53)$$

  - moment zginający w dnie rury

$$M^*_{ghvd} = -0{,}181 \cdot q^*_{hv} \cdot r_m{}^2 = -0{,}181 \cdot 2{,}806 \cdot 1{,}4365^2 = -1{,}048 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \qquad (4.54)$$

  - siła osiowa w sklepieniu rury

$$N^*_{ghvk} = -0{,}577 \cdot q^*_{hv} \cdot r_m = -0{,}577 \cdot 2{,}806 \cdot 1{,}4365 = -2{,}326 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \qquad (4.55)$$

  - wartość siły osiowej w wezgłowiach rury jest równa 0, co wynika ze wzoru

$$N^*_{ghvw} = 0 \cdot q^*_{hv} \cdot r_m \qquad (4.56)$$

  - siła osiowa w dnie rury

$$N^*_{ghvd} = -0{,}577 \cdot q^*_{hv} \cdot r_m = -0{,}577 \cdot 2{,}806 \cdot 1{,}4365 = -2{,}326 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

ν - komunikacyjne
E – od gruntu

- od ciężaru i parcia gruntu
  - moment zginający w sklepieniu rury

$$M^*_{ghEk} = -0,181 \cdot q^*_{hE} \cdot r_m{}^2 = -0,181 \cdot 5,014 \cdot 1,4365^2 = -1,873 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

  - moment zginający w wezgłowiach rury

$$M^*_{ghEw} = 0,208 \cdot q^*_{hE} \cdot r_m{}^2 = 0,208 \cdot 5,014 \cdot 1,4365^2 = 2,152 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

  - moment zginający w dnie rury

$$M^*_{ghEd} = -0,181 \cdot q^*_{hE} \cdot r_m{}^2 = -0,181 \cdot 5,014 \cdot 1,4365^2 = -1,873 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

  - siła osiowa w sklepieniu rury

$$N^*_{ghEk} = -0,577 \cdot q^*_{hE} \cdot r_m = -0,577 \cdot 5,014 \cdot 1,4365 = -4,156 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

  - wartość siły osiowej w wezgłowiach rury wynosi 0, co wynika ze wz

$$N^*_{ghEw} = 0 \cdot q^*_{hE} \cdot r_m$$

  - siła osiowa w dnie rury

$$N^*_{ghEd} = -0,577 \cdot q^*_{hE} \cdot r_m = -0,577 \cdot 5,014 \cdot 1,4365 = -4,156 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sumaryczne wartości sił wewnętrznych:

- moment zginający w sklepieniu rury

$$M_{totk} = M_{N_k} + M_{G_k} + M_{E_k} + M_{P_k} + M_{pw_k} + M^{*}_{ghv_k} + M^{*}_{ghE_k} =$$
$$= 68,097 + 1,808 + 27,153 + 13,657 - 0,050 - 1,048 - 1,873 =$$
$$= 107,744 \frac{\mathrm{kN \cdot m}}{\mathrm{m}}$$

- moment zginający w wezgłowiach rury

$$M_{totw} = M_{N_w} + M_{G_w} + M_{E_w} + M_{P_w} + M_{pw_w} + M^{*}_{ghv_w} + M^{*}_{ghE_w}$$
$$= -68,097 - 2,060 - 27,153 - 13,657 - 0,050 + 1,204 + 2,152 =$$
$$= -107,661 \frac{\mathrm{kN \cdot m}}{\mathrm{m}}$$

- moment zginający w dnie rury

$$M_{totd} = M_{N_d} + M_{G_d} + M_{E_d} + M_{P_d} + M_{pw_d} + M^{*}_{ghv_d} + M^{*}_{ghE_d}$$
$$= 68,097 + 2,311 + 27,153 + 13,657 - 0,050 - 1,048 - 1,873 =$$
$$= 108,247 \frac{\mathrm{kN \cdot m}}{\mathrm{m}}$$

– siła osiowa w sklepieniu rury

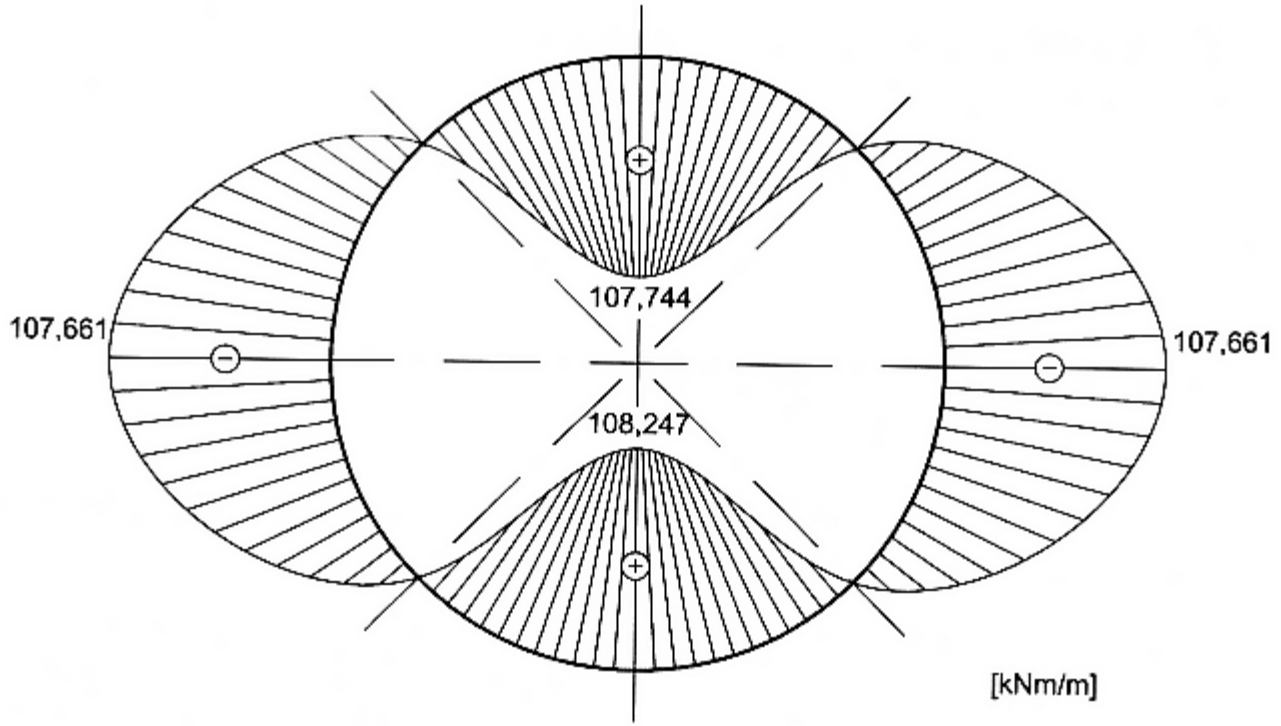
$$N_{totk} = N_{Nk} + N_{Gk} + N_{Ek} + N_{Pk} + N_{pwk} + N^{*}_{ghvk} + N^{*}_{ghEk} =$$
$$= -143,650 + 0,609 - 57,516 - 9,507 - 48,06 - 2,326 - 4,156 =$$
$$= -264,606 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

– siła osiowa w wezgłowiach rury

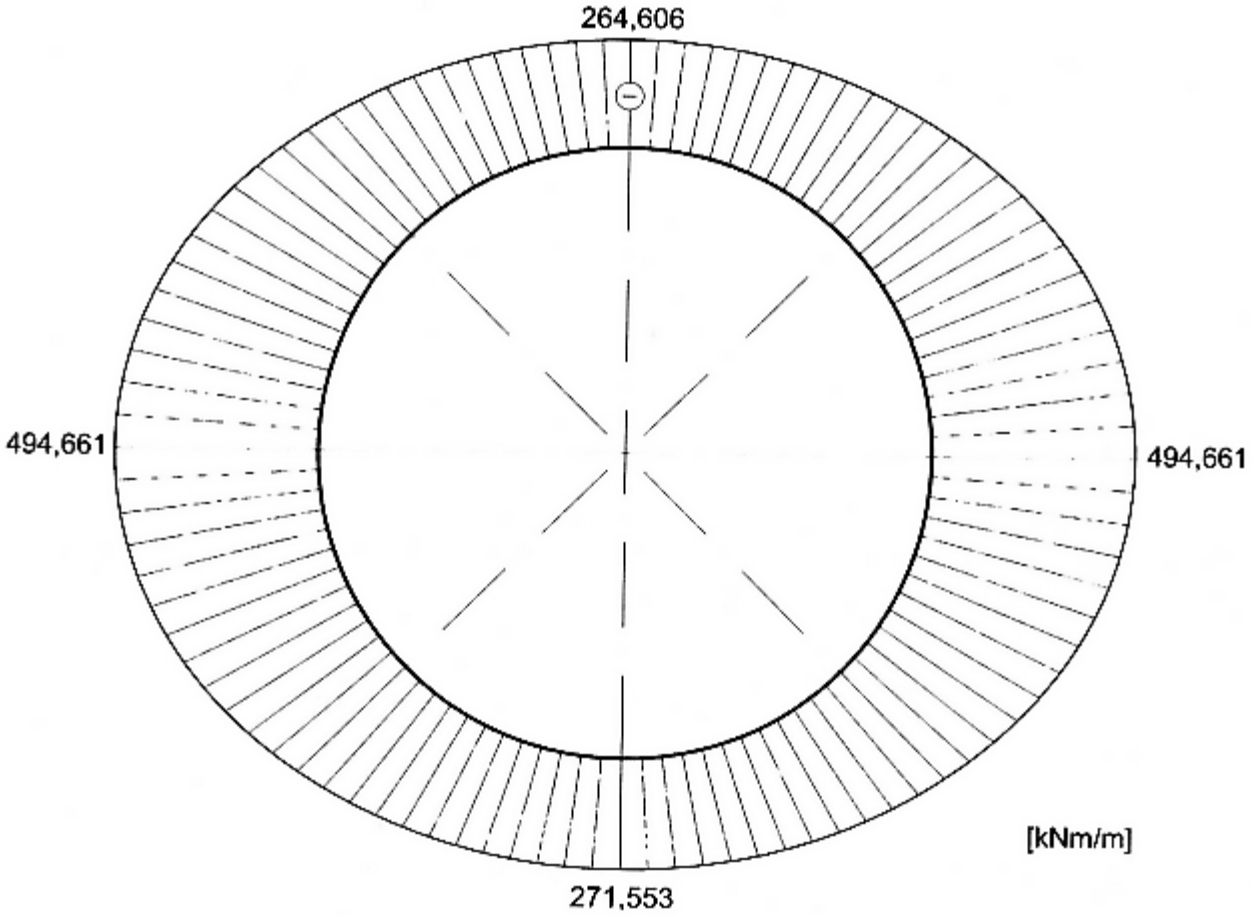
$$N_{totw} = N_{Nw} + N_{Gw} + N_{Ew} + N_{Pw} + N_{pww} + N^{*}_{ghvw} + N^{*}_{ghEw} =$$
$$= -287,300 - 5,732 - 115,541 - 38,028 - 48,06 + 0 + 0 =$$
$$= -494,661 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

– siła osiowa w dnie rury

$$N_{totd} = N_{Nd} + N_{Gd} + N_{Ed} + N_{Pd} + N_{pwd} + N^{*}_{ghvd} + N^{*}_{ghEd} =$$
$$= -143,650 - 6,338 - 57,516 - 9,507 - 48,06 - 2,326 - 4,156 =$$
$$= -271,553 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Rys. 4.2. *Wykres momentów zginających w konstrukcji tunelu (rurze)*



Rys. 4.3. *Wykres sił osiowych w rurze*

Warunek nośności przekroju:

Wewnętrzne i zewnętrzne krawędzie osobno

Współczynnik korekcyjny uwzględniający krzywiznę ścianki rury:

$$\alpha_k = \frac{3 \cdot d_i + 5 \cdot s}{3 \cdot d_i + 3 \cdot s} = \frac{3 \cdot 2,746 + 5 \cdot 0,127}{3 \cdot 2,746 + 3 \cdot 0,127} = 1,029$$

Sprawdzenie warunku nieprzekroczenia dopuszczalnych naprężeń w sklepieniu rury na wewnętrznej krawędzi przekroju ścianki

$$\sigma_{ik} = \frac{N_{totk}}{A} + \alpha_k \cdot \frac{M_{tot_k}}{W} = \frac{-264,606}{127} + 1,029 \cdot \frac{107,744}{2,68817} = 39,160\,\text{MPa} \quad (4.71)$$

$$\sigma_{ik} = 39,160\,\text{MPa} < \frac{\beta_{RBZ}}{2,2} = 54,55\,\text{MPa} \quad (4.72)$$

znaki + we wzorze

Sprawdzenie warunku nieprzekroczenia dopuszczalnych naprężeń w wezgłowiach rury na wewnętrznej krawędzi przekroju ścianki

$$\sigma_{iw} = \frac{N_{totw}}{A} + \alpha_k \cdot \frac{M_{tot_w}}{W} = \frac{-494,661}{127} + 1,029 \cdot \frac{-107,661}{2,68817} = -45,106\,\text{MPa} \quad (4.73)$$

$$\sigma_{iw} = -45,106\,\text{MPa} < \frac{-\beta_{RBZ}}{2,2} = -54,55\,\text{MPa} \quad (4.74)$$

analogicznie sprawdzenie na dnie na wewnętrznej krawędzi

zewnętrzne krawędzie, znak -

Sprawdzenie warunku nieprzekroczenia wartości dopuszczalnych naprężeń w sklepieniu rury na zewnętrznej krawędzi przekroju ścianki

$$\sigma_{ak} = \frac{N_{totk}}{A} - \alpha_k \cdot \frac{M_{tot_k}}{W} = \frac{-264,606}{127} - 1,029 \cdot \frac{107,744}{2,68817} = -43,327\,\text{MPa} \quad (4.77)$$

$$\sigma_{ak} = -43,327\,\text{MPa} < \frac{-\beta_{RBZ}}{2,2} = -54,55\,\text{MPa} \quad (4.78)$$

Sprawdzenie warunku nieprzekroczenia dopuszczalnych naprężeń w wezgłowiach rury na zewnętrznej krawędzi przekroju ścianki

$$\sigma_{aw} = \frac{N_{totw}}{A} - \alpha_k \cdot \frac{M_{tot_w}}{W} = \frac{-494,661}{127} - 1,029 \cdot \frac{-107,661}{2,68817} = 37,316\,\text{MPa} \quad (4.79)$$

$$\sigma_{aw} = 37,316\,\text{MPa} < \frac{\beta_{RBZ}}{2,2} = 54,55\,\text{MPa} \quad (4.80)$$

Sprawdzenie warunku nieprzekroczenia dopuszczalnych naprężeń w dnie rury na zewnętrznej krawędzi przekroju ścianki

Naprężenia dopuszczalne nie zostaną przekroczone.

Warunek deformacji względnej przekroju poprzecznego:

jeśli nie ma innych danych przyjmować 3% a pod torowiskami 2%

Współczynniki deformacji

$c_{h1} = 0,0833, \quad c_{h2} = -0,0658,$ podane w wytycznej za ATV A 127

$c_{v1} = -0,0833, \quad c_{v2} = 0,0640.$

Współczynnik parcia bocznego od reakcji posadowienia wyrażony jest wzorem

$$K^* = \frac{c_{h1}}{V_{RB} - c_{h2}} = \frac{0,0833}{0,717 + 0,0658} = 0,106 \qquad (4.83)$$

a współczynnik odkształcenia pionowego zależnością

$$c_v^* = c_{v1} + c_{v2} \cdot K^* = -0,076$$

Wstawiając wartości ze wzoru (4.84) można obliczyć pionową deformację względną

$$\delta_v = c_v^* \cdot \frac{p_{Ev} + p_v - p_{Eh}}{\frac{E_R \cdot s^3}{12 \cdot (r_m)^3}} = -0,076 \cdot \frac{80,432 + 26,473 - 33,130}{\frac{11113,91 \cdot 10 \cdot 127^3}{12 \cdot 1436,5^3}} = \qquad (4.85)$$

$$= -0,88\% < -2\%$$

Warunek dopuszczalnej deformacji względnej jest spełniony.

Warunek stateczności:

Wartość krytycznego ciśnienia obwodowego dla krótkookresowego modułu sprężystości rury oblicza się ze wzoru

$$p_k = \frac{E_R \cdot 1000}{3,64} \cdot \left(\frac{s}{r_m}\right)^3 = \frac{11113,91 \cdot 1000}{3,64} \cdot \left(\frac{127}{1436,5}\right)^3 = 2109,89\,\text{kPa} \qquad (4.86)$$

Warunek (dla sytuacji bez użycia środka poślizgowego)

$$\gamma_{pres} = \frac{p_k}{p_{Ev} + p_v + p_w} = \frac{2109,89}{80,408 + 26,473 + 35,0} = 14,87 \geq 2,5$$

Warunek stateczności globalnej rury jest zatem spełniony.

jeśli jest środek poślizgowy dodatkowo sprawdza się jeszcze drugi warunek, gdzie w mianowniku jest suma podciśnienia p_u i ciśnienie środka wypełniającego p_{st}

następnie **SPRAWDZENIE WARUNKU NOŚNOŚCI RURY W KIERUNKU PODŁUŻNYM – etap realizacji**

SPRAWDZENIE WARUNKU NOŚNOŚCI RURY W KIERUNKU PODŁUŻNYM – etap realizacji

Długość tunelu wynosi 262 m. Jego trasa jest prostoliniowa na długości 88 m oraz w kształcie łuku na długości 174 m. Promień łuku wynosi 450 m. Założono wstępnie długość pojedynczego segmentu rury równą 1 metr dla strefy krzywoliniowej a 3 metry, dla strefy prostoliniowej. Dla takiej sytuacji zweryfikowano wstępne założenie i przyjmując zastosowanie stacji pośrednich w celu zmniejszenia siły przeciskającej.

Określenie dopuszczalnej siły przeciskającej dla odcinka o kształcie łuku

Przyjęto następujące założenia:

- całkowita długość przecisku (mikrotunelu) 262 m
- grubość przekładki sprężystej między rurami $L_j = 20$ mm
- długość segmentu rury $L_p = 1$ m
- dopuszczalne naprężenie dociskowe

$$\sigma_{\max} = \frac{\beta_{LD}}{2} = 42{,}5\,\text{MPa}$$

formuła podawana w wytycznej ma inną formę, a rozwiąznie tu przyjęte jest ostatecznie podstawionym wzorem ale dla odcinka prostoliniowego z siłą o mimośrodzie niezamierzonym na krawędzi rdzenia

- szerokość przekładki sprężystej $t_j = 117$ mm
- grubość ścianki rury w strefie łącznika $t_p = 117$ mm
- moduł sprężystości przekładki $E_j = 150\,\text{MPa}$
- moduł sprężystości rury $E_p = E_{RD} = 18$ GPa

Ekwiwalentna sztywność połączenia rur w kierunku podłużnym

$$E_e = \frac{L_j \cdot t_p \cdot E_p \cdot E_j}{L_j \cdot t_p \cdot E_p + t_j \cdot L_p \cdot E_j} = \frac{20 \cdot 127 \cdot 18000 \cdot 150}{20 \cdot 127 \cdot 18000 + 127 \cdot 1000 \cdot 150} =$$

$$= 105{,}88\,\text{MPa}$$

W celu wyznaczenia z – dopuszczalnego mimośrodu siły przeciskającej w łuku

Geometria odcinka trasy mikrotunelu o kształcie łuku

- rozwartość kąta łuku poziomego 22,15°
- rozwartość kąta łuku pionowego 0°
- długość łuku 174 m
- promień łuku 450 m
- długość segmentu mikrotunelu (pojedynczej rury) 1 m
- kąt jednostkowy dla pojedynczego segmentu rury $\beta = 0{,}16°$

Formuła określająca dopuszczalny kąt załamania trasy na długości pojedynczego segmentu rury

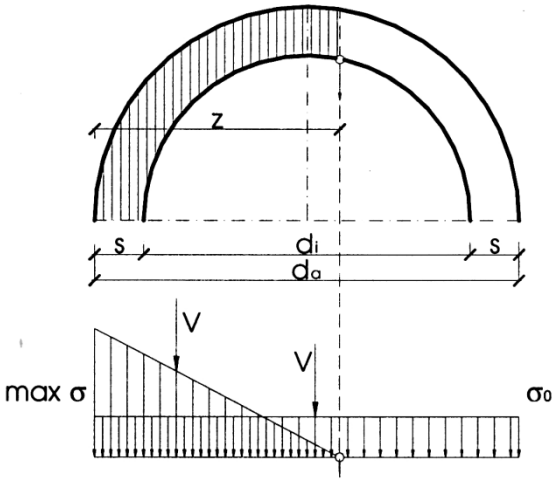
$$\beta = arctg\left(\frac{L_j \cdot \sigma_{max}}{E_e \cdot z}\right)$$

Dopuszczalny mimośród siły przeciskającej

$$z = L_j \cdot \frac{\sigma_{max}}{tg(\beta) \cdot E_e} = 20 \cdot \frac{42{,}5}{tg(0{,}16°) \cdot 105{,}88} = 2{,}875 \text{ m}$$

Dopuszczalny mimośród względny oblicza się ze wzoru

$$\frac{z}{d_a} = \frac{2875}{3000} = 0{,}958$$



Rozkład naprężeń ściskających w złączu

Wielkość maksymalnej siły V wciskającej rurę dla złącza nie przenoszącego naprężeń rozciągających można wyznaczyć z zależności

$$V = \frac{\frac{\beta_{LD}}{\gamma}}{\frac{\max\sigma}{\sigma_0}} A \qquad A = (d_3^2 - d_i^2)\frac{\pi}{4}$$

gdzie: β_{LD} – wytrzymałość na ściskanie w kierunku podłużnym,
γ – współczynnik bezpieczeństwa,
A – najmniejsza powierzchnia przekazująca ściskanie:

d_3 – średnica rury mierzona w najsłabszym miejscu.

Uwaga – nomogram zależności stosunku naprężeń $\max\sigma/\sigma_0$ od stosunku z/d_a – mając z/d_a odczytujemy $\max\sigma/\sigma_o$

dla przecisku w linii prostej zakłada się mimośród niezamierzony wynikający ze sterowania - przyjmuje się przyłożenie siły w rdzeniu przekroju.

Wtedy
$z/da = 1$,
$max\sigma/\sigma = 2$,
$min\ \sigma = 0$

dla rur betonowych i kamionkowych producenci podają często maksymalną siłę podłużną przenoszoną przez rurę. Odpowiednie przyjmowanie tej wielkości do obliczeń może być ryzykowne przy projektach po łuku

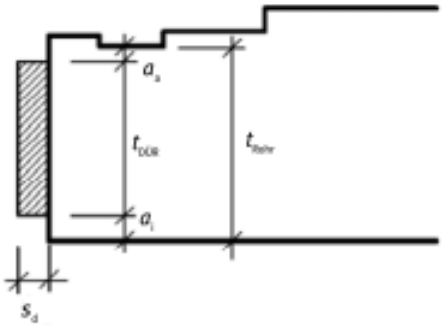
Dla etapu realizacji niezbędne jest uwzględnienie naprężeń w złączu ze względu na jego nierównomierność (praca na kierunku podłużnym)

- dla przypadku realizacji prostoliniowych,
- dla realizacji w łukach poziomych i pionowych.

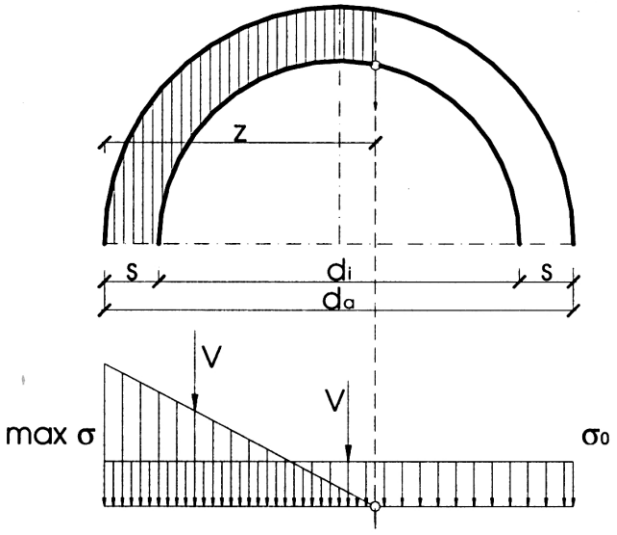
Uwzględniane są złącza przenoszące wyłącznie naprężenia ściskające oraz złącza przenoszące również naprężenia rozciągające i siły ścinające.

Bierze się pod uwagę rzeczywisty kształt rury w strefie złącza.

Uwzględniane są różne materiały przekładek, również przekładki hydrauliczne.



Położenie punktu przyłożenia siły wciskającej przecisku przyjmuje się na krawędzi rdzenia przekroju



Rozkład naprężeń ściskających w złączu

Wielkość maksymalnej siły V wciskającej rurę dla złącza nie przenoszącego naprężeń rozciągających można wyznaczyć z zależności

$$V = \frac{\frac{\beta_{LD}}{\gamma}}{\frac{\max\sigma}{\sigma_0}} A \qquad A = (d_3^2 - d_i^2)\frac{\pi}{4}$$

gdzie: β_{LD} – wytrzymałość na ściskanie w kierunku podłużnym,
γ – współczynnik bezpieczeństwa,
A – najmniejsza powierzchnia przekazująca ściskanie:

d_3 – średnica rury mierzona w najsłabszym miejscu.

Maksymalne naprężenia w złączach stalowych rur spawanych

$$\sigma_{LD} = \frac{2V}{A}$$

gdzie: V – wielkość siły wciskającej rury,
A – pole przekroju poprzecznego.

Biorąc pod uwagę złożony stan naprężeń oblicza się naprężenia zastępcze w złączu przenoszącym siły rozciągające (spawanym):

$$\sigma_{\mathrm{VGE}} = \sqrt{\sigma_{\mathrm{RBZ}}^2 + \sigma_{\mathrm{LD}}^2 - \sigma_{\mathrm{RBZ}}\sigma_{\mathrm{LD}}}$$

oraz sprawdza się współczynnik bezpieczeństwa z zależności:

$$\gamma = \frac{\beta_s}{\sigma_{\mathrm{VGE}}}$$

gdzie β_s jest granicą wydłużalności.

Przykładowe zestawienie współczynników bezpieczeństwa

dla rur żelbetowych

- prostopadle do osi rury $\gamma = 1{,}75$,
- równolegle do osi rury $\gamma = 1{,}60$;

rury kamionkowe:

- prostopadle do osi rury $\gamma = 2{,}20$,
- równolegle do osi rury $\gamma = 2{,}00$;

rury stalowe:

- prostopadle do osi rury (bez ciśnienia wewnętrznego) $\gamma = 1{,}50$,
- prostopadle do osi rury (z ciśnieniem wewnętrznym) $\gamma = 1{,}70$,
- równolegle do osi rury $\gamma = 1{,}75$,
- dla naprężeń zastępczych $\gamma = 1{,}33$,
- dla wyboczenia $\gamma = 1{,}50$.

Założenia wyjściowe dla projektowania:

- przeznaczenie i funkcja obiektu, dane geometryczne, warunki pracy i eksploatacji, elementy wyposażenia, czas użytkowania;

- aktualne i przewidywane obciążenia zewnętrzne i wewnętrzne;

- warunki gruntowo – wodne (z uwzględnieniem możliwych zmian);

- czas i miejsce realizacji;

- technologia realizacji;

- uwarunkowania dodatkowe;