wymiarowanie konstrukcji wprowadzanej w przestrzeń gruntową
(dobór i sprawdzenie cech rur)

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe rur przeciskowych

Wytyczna ATV - DVWK A 161: Obliczenia statyczne rur przeciskanych

Wydanie I – 1990
Wydanie II (zmienione i uzupełnione) - marzec 2014



Arbeitsblatt DWA-A 161

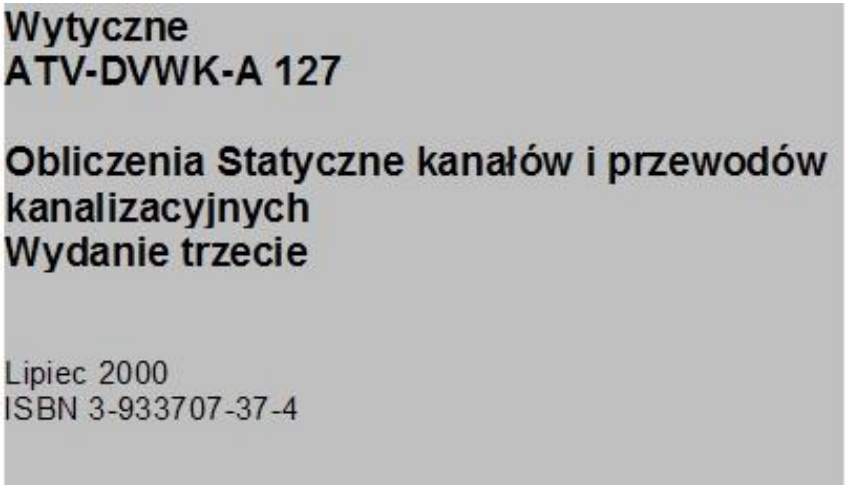
Statische Berechnung von Vortriebsrohren

März 2014

DWA-A 125, Rohrvertrieb und verwandte Verfahren
(przecisk hydrauliczny i metody pokrewne)

EN 12889: Bezwykopowa budowa i badanie przewodów kanalizacyjnych

Zbieranie obciążeń, zasady obliczeń dla kierunku prostopadłego do osi



Rura przeciskana – etap realizacji i etap eksploatacji przewodu

Rura przeciskana - praca na kierunku podłużnym i praca na kierunku porzecznym przewodu

Etap realizacji przewodu

a) obciążenia działające poprzecznie do osi przewodu

- obciążenie pionowe gruntem,
- parcie boczne gruntu,
- obciążenie równomiernie rozłożone naziomu,
- obciążenia komunikacyjne (poruszającymi się w poziomie terenu pojazdami),
- obciążenie naziomu na ograniczonej powierzchni,
- ciężar własny rury,
- zewnętrzne ciśnienie wody gruntowej do poziomu sklepienia przeciskanej rury,
- zewnętrzne ciśnienie wody gruntowej powyżej poziomu sklepienia przeciskanej rury,
- ciśnienie wywierane przez środek poślizgowy,
- ciśnienie powietrza,
- oddziaływania wywołane przeciskaniem,
- wypór.

b) obciążenia działające wzdłuż osi przewodu

- siłę wciskającą rurę w grunt,
- dodatkowe oddziaływania, np. na skutek sterowania przeciskiem.

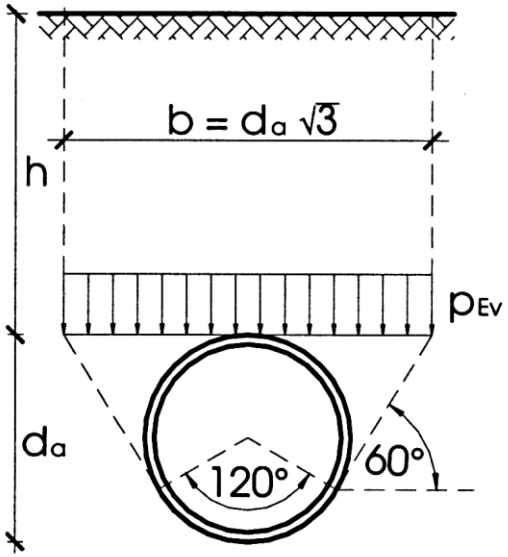
Etap eksploatacji

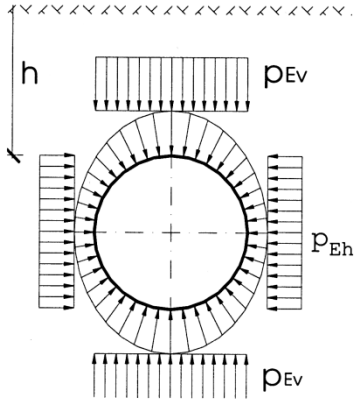
obciążenia działające poprzecznie do osi przewodu

- obciążenie pionowe gruntem,
- parcie boczne gruntu,
- obciążenie równomiernie rozłożone naziomu,
- obciążenia komunikacyjne (poruszającymi się po naziomie pojazdami),
- obciążenie naziomu na ograniczonej powierzchni,
- ciężar własny rury,
- wypełnienie wodą do sklepienia rury,
- nadciśnienie wewnątrz rury,
- zewnętrzne ciśnienie wody gruntowej do poziomu sklepienia przeciskanej rury,
- zewnętrzne ciśnienie wody gruntowej powyżej poziomu sklepienia przeciskanej rury,
- wypór.

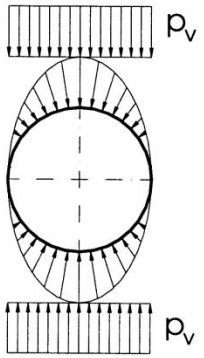
wzdłuż osi ?

Schemat obciążeń rury przeciskanej – założenia wg teorii Terzagiego





Schemat obciążenia gruntem rury przeciskowej



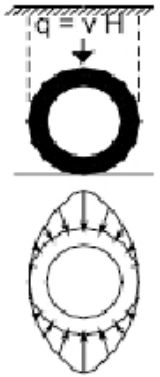
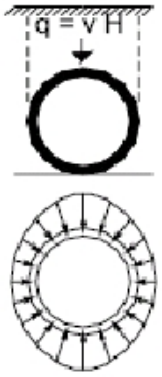
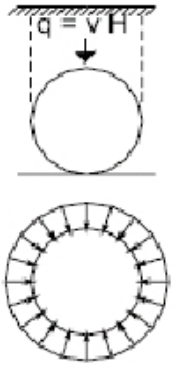
Rozkład obciążeń rury przeciskowej wywołanych obciążeniami komunikacyjnymi

dla rury sztywnej

Kryterium Kleina

n < 1 - rury sztywne
n > 1 - rury podatne
n = 1 - rury półsztywne

$$n = \frac{E_g r_m^3}{E e^3}$$

	Sztywne	Półsztywne	Podatne
			
Czynniki określające nośność układu	Wytrzymałość materiału rury	Wytrzymałość materiału rury + sztywność gruntu	Sztywność obwodowa rury + sztywność gruntu
Charakterystyka statyczna układu	Rura stanowi samodzielny układ statyczny	→ ←	Rura i grunt stanowią współpracujący układ statyczny
Dopuszczalne odkształcenie względne [%]	~ 0	~ 0,5	> 5
Kryteria projektowe	Naprężenie	Naprężenie/odkształcenie względne	Odkształcenie + stateczność

Założenia do projektowania przewodów ułożonych w gruncie

Kolonko A., Madryas C., Wysocki L., *Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych*

Obciążenia pionowe od gruntu:

$$p_{Ev} = \chi \gamma_B h$$

gdzie: χ – współczynnik zmniejszający uwzględniający współdziałanie górotworu będące następstwem ograniczonego rozluźnienia gruntu;
γ_B – ciężar objętościowy gruntu,
h – zagłębienie rury.

$$\chi = \frac{1 - e^{-2K_1 \operatorname{tg}\frac{\varphi'}{2}\frac{h}{b}}}{2K_1 \operatorname{tg}\frac{\varphi'}{2}\frac{h}{b}}$$

gdzie: K_1 – współczynnik parcia gruntu; wytyczne zalecają przyjmowanie $K_1 = 0{,}5$,
φ' – kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

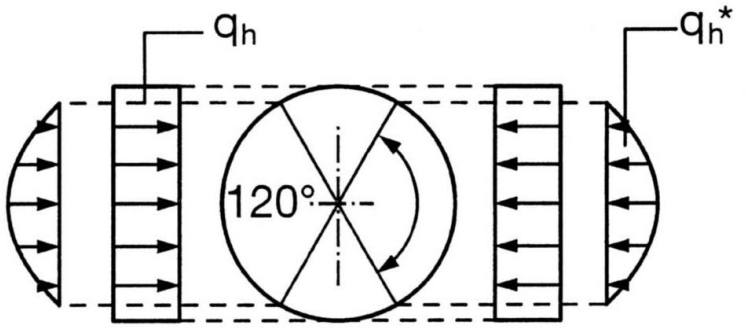
Boczne parcie gruntu p_{Eh} wyznaczamy z zależności

$$p_{Eh} = \chi \gamma_B h K_2$$

gdzie K_2 – współczynnik parcia gruntu.

w typowym przypadku jako miarodajny przyjmuje się grunt o najniższym współczynniku parcia K_2

W przypadku rur przeciskowych wykazujących się podatnością (stalowych), należy uwzględnić reakcję otaczającego gruntu (odporu) dla obciążenia pionowego gruntem i obciążenia komunikacyjnego



$$q_h^* = q_{hV}^* + q_{hE}^*$$

$q_{hV}^* = p_V K^*$ parcie od reakcji posadowienia wywołane obciążeniem komunikacyjnym

$q_{hE}^* = (p_{Ev} - p_{Eh}) K^*$ parcie od reakcji posadowienia wywołane obciążeniem gruntem

gdzie: K^* – współczynnik parcia od reakcji posadowienia (reakcji otaczającego rurę gruntu)

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

gdzie V_{RB} – sztywność układu rura–grunt wyznaczona z zależności

$$V_{RB} = 0{,}14 \frac{E_R}{E_B} \left(\frac{s}{r_m} \right)^3$$

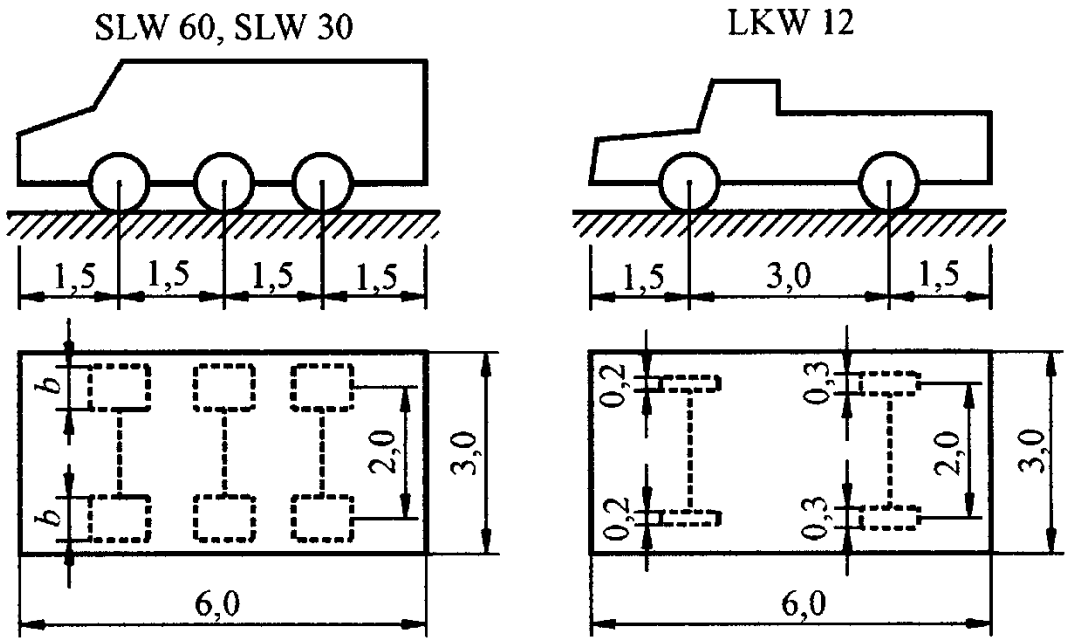
gdzie: E_R – moduł sprężystości materiału rury,
E_B – moduł odkształcenia gruntu otaczającego rurę.
s – grubość ścianki rury,
r_m – średni promień rury.

Wielkość obciążeń komunikacyjnych wynika z założonego modelu obciążeń przyjmowanego przez wytyczną.

Prezentowane są modele dla obciążeń ruchem ulicznym,
ruchem pojazdów szynowych,
obciążenia samolotami dla lotnisk,

zalecenia do obciążeń w przypadkach i dla lokalizacji szczególnych (np.: ciężkie pojazdy na trenach przemysłowych).

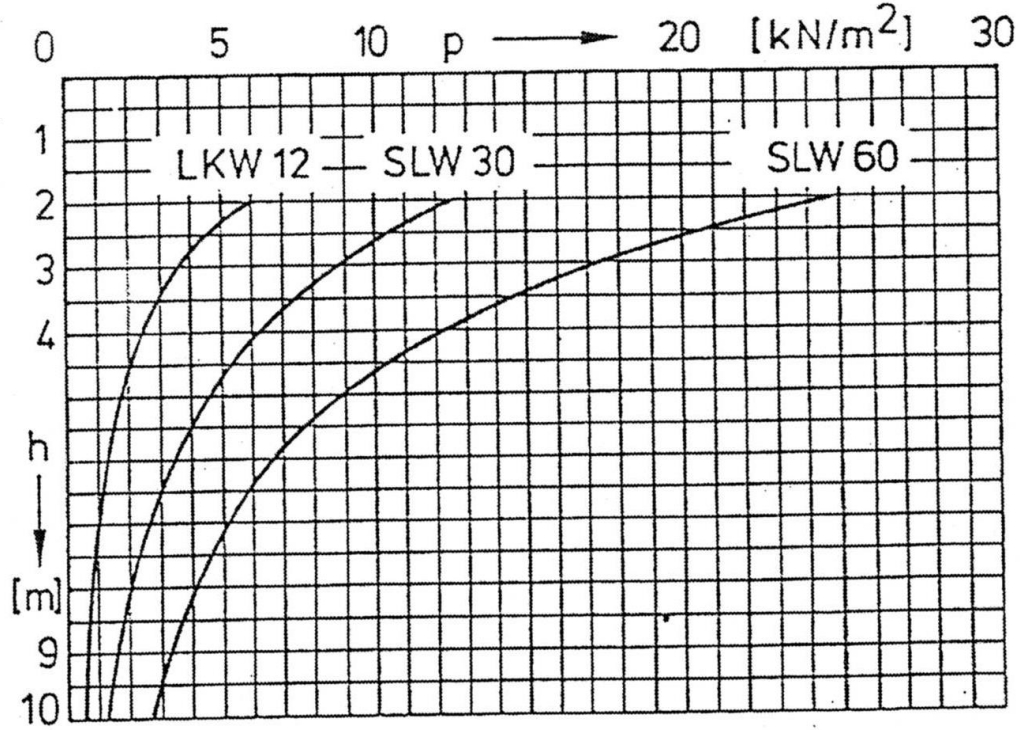
Podawane wzory i nomogramy umożliwiają określenie podstawowego obciążenia p_v w zależności od głębokości prowadzenia przecisku.



Pojazdy samochodowe, wg [2] ATV-DVWK-A 127

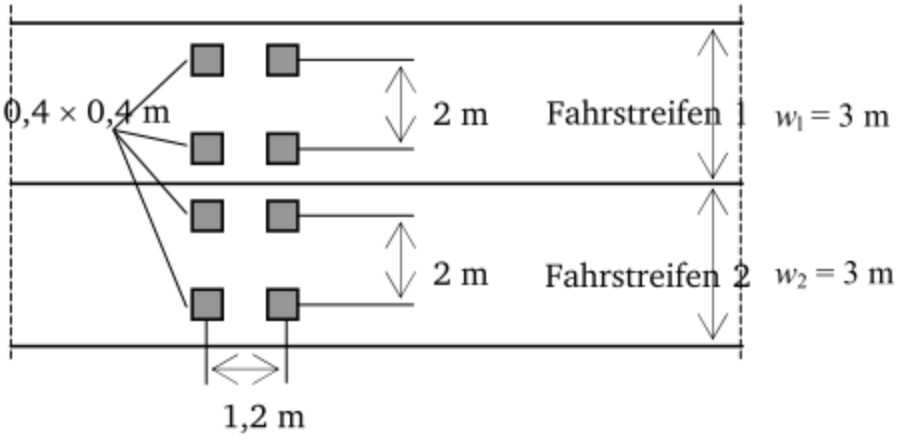
Parametry pojazdów samochodowych

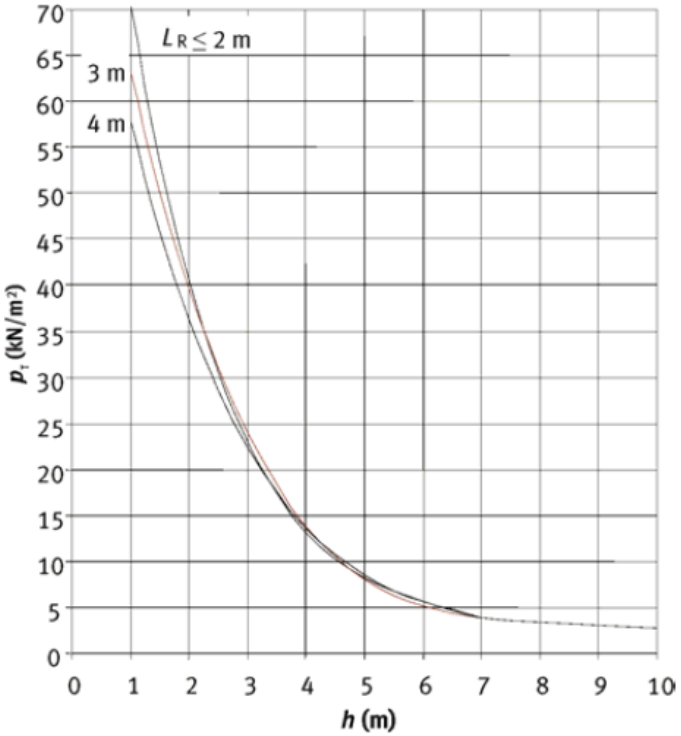
Rodzaj pojazdu	Ciężar, kN	Ciężar przypadający na koło, kN	Powierzchnia styku koła z nawierzchnią, m	
			szerokość	długość
SLW 60	600	100	0,6	0,2
SLW 30	300	50	0,4	0,2
LKW 12	120	przednie 20	0,2	0,2
		tylne 40	0,3	0,2



Naprężenie p w gruncie wywołane przez SLW 60, SLW 30, LKW 12; h = 2 m do h = 10 m

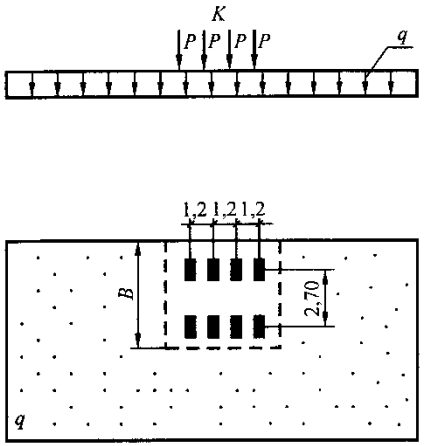
Schemat obciążenia pojazdami LM1 wg EN 1991-2





Vertikale Bodenspannungen p_T in kN/m² in Abhängigkeit von der Rohrlänge L_R, Überdeckungen $h = 1$ m bis 10 m

PN-85/S-10030: Obiekty mostowe. Obciążenia.



B - szerokość pasa ruchu

Schemat obciążenia od taboru samochodowego

Obciążenia taborem samochodowym,

Klasa obciążeń	Mnożnik dla klasy A	Obciążenie q, kN/m^2	Obciążenie K, kN	Nacisk na oś, kN
A	1,00	4,00	800	200
B	0,75	3,00	600	150
C	0,50	2,00	400	100
D	0,40	1,60	320	80
E	0,30	1,20	240	60

Ciężary pojazdów dopuszczonych do eksploatacji dla klas obciążeń A – E

Klasa	A	B	C	D	E
Ciężar, kN	500	400	300	200	150

Od poszczególnych obciążeń wyznaczane są siły wewnętrzne M i N w charakterystycznych przekrojach rury.

Siły wewnętrzne od obciążenia gruntem

$$M_{EA} = m_E^A p_{Ev} r_m^2$$

$$M_{EB} = m_E^B p_{Ev} r_m^2$$

$$M_{EC} = m_E^C p_{Ev} r_m^2$$

$$N_{EA} = n_E^A p_{Ev} r_m$$

$$N_{EB} = n_E^B p_{Ev} r_m$$

$$N_{EC} = n_E^C p_{Ev} r_m$$

od obciążeń komunikacyjnych

$$M_P^A = 0{,}25 p_v r_m^2$$

$$M_P^B = -0{,}25 p_v r_m^2$$

$$M_P^C = 0{,}25 p_v r_m^2$$

$$N_P^A = -0{,}25 p_v r_m$$

$$N_P^B = -1{,}00 p_v r_m$$

$$N_P^C = -0{,}25 p_v r_m$$

Wartości współczynników n i m

współczynnik parcia gruntu

Współczynniki	$K_2 = 0{,}3$	$K_2 = 0{,}4$	$K_2 = 0{,}5$
m_E^A	0,1636	0,1375	0,1125
m_E^B	–0,1636	–0,1375	–0,1125
m_E^C	0,1636	0,1375	0,1125
n_E^A	–0,4978	– 0,5750	– 0,6500
n_E^B	–1,0000	–1,0000	–1,0000
n_E^C	– 0,4978	–0,5750	–0,6500

Dodatkowo uwzględniane są efekty od sił wywołanych przeciskiem jako wartości dodatkowych sił wewnętrznych:

$$M^{Scheitel} = 33 \cdot r_m^2$$
$$M^{Kampfer} = -33 \cdot r_m^2$$
$$M^{Sohle} = 33 \cdot r_m^2$$
$$N^{Scheitel} = -100 \cdot r_m$$
$$N^{Kampfer} = -200 \cdot r_m$$
$$N^{Sohle} = -100 \cdot r_m$$

Scheitel – A
Kampfer – B
Sohle – C

r_m – średni promień rury.

Przy określonych warunkach realizacji i dla rur o dużych średnicach (np.: żb >= 4000, kamionka >= 1000), można zredukować wartości sił stosując podane w wytycznej mniejsze współczynniki.

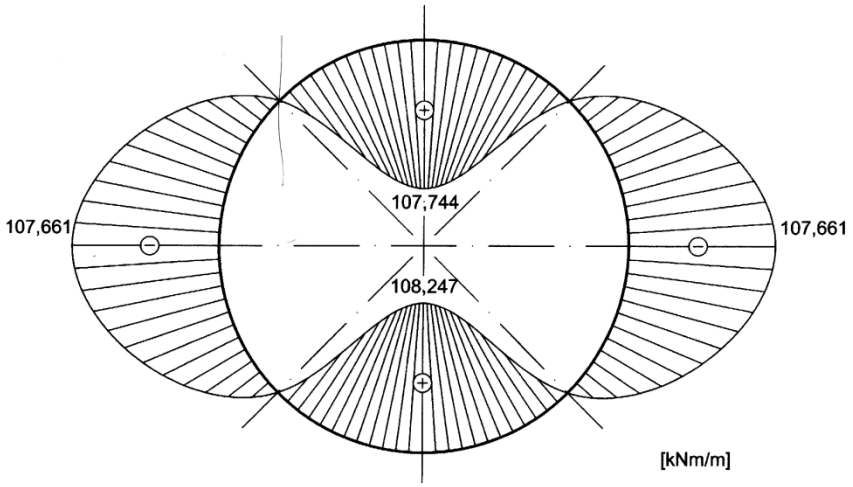
W przypadku przecisków o zaplanowanej krzywiźnie zaleca się pomnożenie wielkości przekrojowych przez wartość

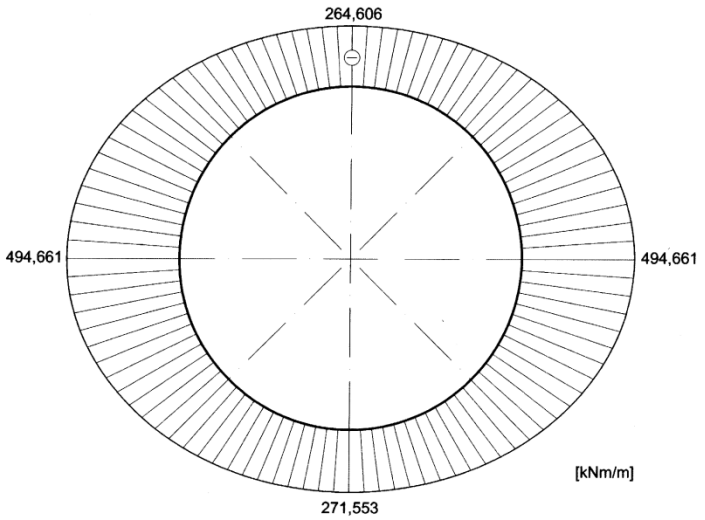
$$1 + \left(0{,}5 - z_k / d_{a,min}\right) \geq 1$$

$z_k / d_{a,min}$ miara rozwartości połączenia rur, jako funkcja danych geometrycznych złącza (przekładki), mimośrodu i kąta między krawędziami rur

Zsumowanie sił wewnętrznych od wszystkich obciążeń pozwala na uzyskanie globalnych rozkładów momentów i sił osiowych dla przekroju poprzecznego rury.

Obliczenia sił wewnętrznych dokonywane są dla wszystkich etapów pracy przewodu





Przykład za Kuliczkowski A., Madryas C.: Tunele wieloprzewodowe dawniej i współcześnie, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2014

Warunki niezbędne do sprawdzenia

Dla rur kamionkowych i żelbetowych w fazie realizacji przecisku należy sprawdzić:

- nośność od obciążeń prostopadłych do osi rury,
- nośność od obciążeń równoległych do osi rury.

Dla rur kamionkowych i żelbetowych ułożonych metodą przecisku w fazie eksploatacji należy sprawdzić:

- nośność od obciążeń prostopadłych do osi rury,
- nośność od długotrwale działających obciążeń wielokrotnie zmiennych.

warunek na wytrzymałość zmęczeniową nie musi być sprawdzany dla pojazdu lekkiego KLW 12 a dla SLW 60 i SLW 30 przy głębokości powyżej 1,5 m.

Graniczne wartości przekrojowe od obciążenia komunikacyjnego można przemnożyć przez współczynnik zmniejszający α, uwzględniający, że dla typowego przypadku pełne obciążenie pojazdem typowym występuje od czasu do czasu. Jedynie dla pociągów przyjmuje się zawsze 1.

Warunki niezbędne do sprawdzenia c.d.

Dla rur stalowych w fazie realizacji przecisku konieczne jest sprawdzenie:

- naprężeń w ściance rury od obciążeń prostopadłych do jej osi,
- naprężeń w ściance rury od obciążeń równoległych do jej osi,
- naprężeń zastępczych w ściance rury,
- ugięcia pionowego rury, warunek deformacji względnej przekroju poprzecznego (zas.3% i 2%)
- możliwości wyboczenia rury. warunek stateczności

Dla rur stalowych ułożonych metodą przecisku w fazie eksploatacji należy sprawdzić:

- naprężenia w ściance rury od obciążeń prostopadłych do jej osi,
- ugięcie pionowe rury,
- możliwość wyboczenia rury.

analogicznie sprawdzane są rury GRP

Naprężenia w ściance przeciskanej rury kamionkowej należy wyznaczać z zależności

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}\alpha_k \qquad \alpha_k = \frac{3d_i + 5s}{3d_i + 3s}$$

gdzie: d_i – średnica wewnętrzna rury,
s – grubość ścianki rury.

Współczynnik bezpieczeństwa dla rury kamionkowej wyznaczamy z zależności

$$\gamma = \frac{\beta_{RBZ}}{\sigma}$$

gdzie β_{RBZ} – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu rury kamionkowej określona na próbce pierścieniowej.

Wytyczna podaje tabele współczynników bezpieczeństwa i inne wartości graniczne

Naprężenia w ściance przeciskanej rury stalowej wyznacza się z zależności

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}\alpha_k \quad \text{dla} \quad \alpha_k = 1 \longrightarrow \gamma = \max \sigma/\sigma$$

Możliwość wyboczenia rur stalowych sprawdza się w zależności od stosowania środka zmniejszającego tarcie:

$$\gamma = \frac{p_k}{q_v + p_w + p_u}$$ bez środka poślizgowego

$$\gamma = \frac{p_k}{p_{st} + p_u}$$ dodatkowo sprawdza się przy użyciu środka poślizgowego

$$p_k = 1000 \frac{E_R}{4(1-v^2)} \left(\frac{s}{r_m}\right)^3$$

gdzie: q_v – całkowite obciążenie pionowe rury,

p_w – parcie wody na rurę, $p_w = \gamma_w \left(h_w + \frac{d_a}{2}\right)$,

h_w – wysokość słupa wody ponad wierzchołek rury,

p_u – podciśnienie w rurze,

p_{st} – ciśnienie środka zmniejszającego tarcie w miejscu wtłaczania,

v – współczynnik Poissona (dla stali można przyjąć $v = 0{,}3$).

krytyczne ciśnienie obwodowe dla krótkotrwałego modułu sprężystości

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

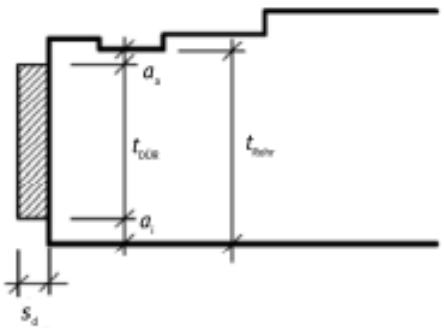
Dla etapu realizacji niezbędne jest uwzględnienie naprężeń w złączu ze względu na jego nierównomierność (**praca na kierunku podłużnym**)

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

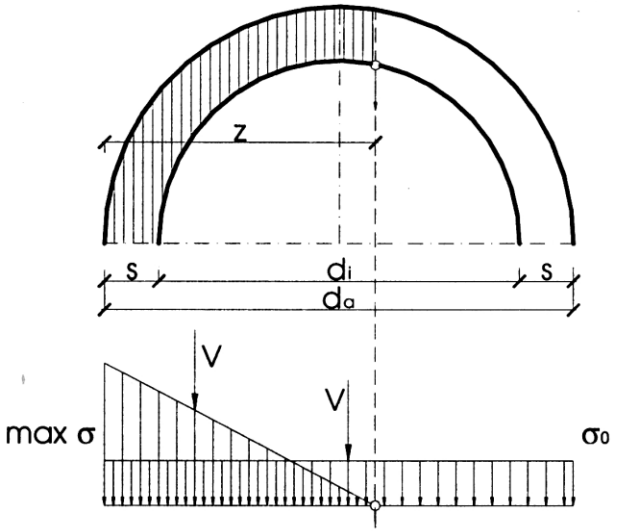
Uwzględniane są złącza przenoszące wyłącznie naprężenia ściskające oraz złącza przenoszące również naprężenia rozciągające i siły ścinające.

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 (rysunek jest w nowej wersji wytycznej)



Rozkład naprężeń ściskających w złączu

ten rysunek musi być połączony z nomogramem

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.

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

$$\max\sigma/\sigma_0 = 2$$

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 dla złączy spawanych oblicza się naprężenia zastępcze:

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

oraz sprawdza się współczynnik bezpieczeństwa z zależności:

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

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 $\gamma = 1{,}50$.

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),

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

ATV - DVWK A 161 wydanie II i I - podstawowe zmiany

• Materiały używane do realizacji przecisków uzupełniono o tworzywa sztuczne i UP-GF. Dla wszystkich uwzględnianych materiałów zestawiono odpowiednie charakterystyki materiałowe.

• Uzupełniono wytyczną o technologie bezwykopowe wymieniane DWA-A 125, zestawiając dla nich miarodajne przypadki obciążeń .

• Zmienione zostały zasady określania parametrów gruntów, skał luźnych i zwartych. W celu dopasowania wartości charakterystycznych gruntów do szczególnych przypadków przecisków traktowane są one jako wartości wskaźnikowe, uzależnione od miar zagęszczenia lub spoistości.

• Określenie ekstremalnej siły przekrojowej na połączeniach rur dla uwzględnienia sił przeciskowych (dotychczas podawane tylko dla przecisku prostoliniowego) zostało uzupełnione o przypadek prowadzenia po odcinkach krzywoliniowych.

• Podane zostały dodatkowo minimalne wartości stosunku grubość ścianki – promień krzywizny.

• Dla dopuszczalnych sił osiowych w trakcie przecisku rozwinięte zostały formuły dla przypadku tras krzywoliniowych, uwzględnione zostały przemieszczenia spowodowane sterowaniem oraz dopuszczalne tolerancje dla prostopadłości powierzchni czołowych rur.

• Dla pierścieni dociskowych (przekładek) podane zostały zalecenia dla określenia ich właściwości przy ściskaniu i skręcaniu pod cyklicznym obciążeniem, jak również ich wartości referencyjne dla modułów sprężystości.

• Zestawiono wymagania dla pierścieni dociskowych (przekładek) wypełnionych płynem.

ATV - DVWK A 161 wydanie II i I - podstawowe zmiany, c.d.

▪ Dla rur przeciskowych w skałach zwartych lub dla stref przejściowych (rumosz/skała) podane zostały zmiany dla obciążeń prostopadłych do osi rury oraz dotyczące warunków jej posadowienia. Dla obciążeń punktowych nie podaje się konkretnych założeń, modelów mechanicznych lub oddziaływań. W tym przypadku odnośne analizy przeprowadzone muszą być przez prowadzącego obliczenia statyczne.

▪ Warunki stateczności dla kierunku poprzecznego rury zostały dopasowane do wytycznej ATV-DVWK-A 127 i uzupełnione o warunek dla kierunku podłużnego.

▪Warunek naprężeń zastępczych został rozwinięty dla materiałów anizotropowych z uwzględnieniem różnych wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie.

▪Tabele do wymiarowania dla rur stalowych zawarte w pierwszym wydaniu zostały pominięte.

▪ Zmieniony został warunek zmęczeniowy od obciążeń cyklicznych.

▪ Stosowane dotychczas obciążenia SLW60, SLW30 i LKW12 zostają pominięte i zastąpione schematem LM1 wg EN 1991-2