

REFERAT KONFERENCYJNY

XXXI KONFERENCJA

SZKOLENIOWO-TECHNICZNA
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI
KABLOWE I NAPOWIETRZNE

KABEL
2026 ▲

10 – 13 marca 2026 r.

Świeradów-Zdrój Elements Hotel & Spa *****

Autor: Kamil Balcer

Firma: TELE-FONIKA Kable S.A., Zakład Bydgoszcz

KABEL
2026 ▲

Tytuł: *Naprężenia występujące podczas układania kabli średnich napięć*



CENTRUM SZKOLENIOWO-KONFERENCYJNE
"ENERGETYK" S.C.

20-867 Lublin, ul. Sudecka 73

✉ biuro@energetyk.lublin.pl

🌐 www.energetyk.lublin.pl

Spis treści

Wprowadzenie.....	3
Sposoby ciągnięcia kabli oraz parametry graniczne	3
Obliczanie sił ciągnących i nacisku	6
Parametry przy układaniu w rurach	11
Wspomaganie ciągnięcia kabli.....	11
Wyliczenia w programie Cableizer w zależności od parametrów.....	14
Wpływ współczynnika tarcia	17
Wpływ urządzeń wspomagających i ich mocy	19
Wpływ promienia gięcia na wartość SP.....	20
Podsumowanie	20
Bibliografia.....	21

KABEL

2026

Wprowadzenie

Jednym z istotnych elementów podczas projektowania trasy linii kablowych, prócz warunków pracy, jest sposób jej ułożenia oraz towarzyszące temu warunki. Na rynku istnieje wiele sposobów układania tras kablowych, jednak to przy metodzie ciągnięcia kabla wzdłuż linii trasy narażony jest on najbardziej na działanie sił zewnętrznych. W referacie przybliżono przykłady różnych metod układania tras kablowych, sposobu mocowania oprzyrządowania, a także aparatury wspomagającej. Została również podjęta próba omówienia istotnych mechanizmów fizycznych rządzących tym procesem, metodyka uwzględniania ich skutków oraz aspekty praktyczne, mogące ograniczyć negatywny wpływ działania sił zewnętrznych na kabel podczas jego ciągnięcia w różnych, zwłaszcza tych mniej przychylnych warunkach.

Sposoby ciągnięcia kabli oraz parametry graniczne

Istnieje wiele sposobów układania kabli średnich napięć, od tradycyjnych otwartych wykopów kablowych, do których następnie układany jest kabel wraz z podsypką, po coraz bardziej popularną metodę płuzenia, zwłaszcza na terenach wiejskich i leśnych, gdzie grunt rodzimy jest piaszczysty.



Rys. 1. Przykład realizacji układania metodą płuzenia [1]

Niekiedy jednak z uwagi na warunki otoczenia trasa kablowa musi przebiegać przez różnego rodzaju rury osłonowe, bloki betonowe bądź kanały i tunele kablowe, gdzie konieczne będzie przeciąganie kabla przez otwory. Metoda ta najczęściej wykorzystuje wciągarki kablowe, posiadające ograniczniki siły naciągu oraz rolki kablowe, choć nie jest to jedyne rozwiązanie.



Rys. 2. Przykład wciągarki kablowej [2]



Rys. 3. Zastosowanie rolek kątowych na załomie trasy [3]

Innym sposobem układania kabli w rurach osłonowych jest wykorzystanie ciśnienia wody, zastępującej tradycyjną wciągarkę. Metoda ta wymaga użycia pompy wodnej oraz tłoczka blokującego utratę ciśnienia a także odpowiedniego zabezpieczenia końca kabla przed wzdłużną penetracją wody.



Rys. 4. Pompa doprowadzająca wodę do głowicy przed wejściem do rury kablowej



Rys. 5. Wodoszczelny tłoczek wywołujący ciśnienie wody w rurze kablowej

Podczas przeciągania kabla niezależnie od wybranego sposobu jego przemieszczania, istotne jest jego mocowanie, gdyż będzie miało ono wpływ na dopuszczalne siły przykładane do ciągniętego kabla. Można wyróżnić dwa sposoby jego ciągnięcia:

- za żyłę roboczą, do której przymocowane zostaje na stałe oczko zaciągowe (lub głowica ciągnąca) posiadające końcówkę umożliwiającą połączenie z linką zaciagową;
- za powłokę przy pomocy pończochy kablowej ze stalowych linek, zaciskającej się na powierzchni kabla przy działaniu siły ciągnącej.

W przypadku kabli ciągniętych za żyłę roboczą przy pomocy oczka ciągnącego maksymalną siłę dla pojedynczej żyły wylicza się ze wzoru:

$$F_d = S \cdot \sigma \quad [\text{N}] \quad (1)$$

gdzie:

S – przekrój poprzeczny żyły roboczej [mm^2];

σ – dopuszczalne naprężenie żyły w Europie (dla Cu $\sigma = 50$; dla Al $\sigma = 30$) [N/mm^2].

Oczywiście dozwolone jest ciągnięcie za więcej niż jedną żyłę roboczą, przy czym w zależności od budowy kabla czy też jego ułożenia należy otrzymany wynik pomnożyć przez odpowiedni współczynnik k , którego wartości przedstawiono w poniższej tabeli.

Tab. 1. Współczynniki korekcyjne dla ciągnięcia większej ilości kabli

Budowa / ułożenie kabli	k
kabel trzyżyłowy we wspólnej powłoce	3
trzy kable ułożone równolegle	2
trzy kable skręcone razem (triplex)	3

W przypadku ciągnięcia kabla przy pomocy pończochy maksymalną siłę jaka może zostać przeniesiona na powłokę wylicza się na podstawie:

$$F_d = 3 \cdot D^3 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

gdzie:

D – średnica zewnętrzna kabla [mm];

jednakże siła ta nie może przekraczać wartości wynikającej ze wzoru (1).



Rys. 6. Osprzęt do uchwycenia kabla a) oczko zaciągowe; b) pończocha kablowa [4]

Obliczanie sił ciągnących i nacisku

W celu wyznaczenia maksymalnej spodziewanej siły ciągnącej, potrzebnej do przeciągnięcia danego odcinka, w pierwszej kolejności należy go podzielić na każdy fragment prosty oraz każde jego załamanie. Właściwe wyznaczenie długości odcinków a także kątów i promieni ich załamania jest dość ważne, ponieważ będą one wpływać na poszczególne siły ciągnące, potrzebne do pokonania sił tarcia oddziałujących na kabel. Siły te składają się na ich wypadkową na końcu trasy przeciąganego kabla, co reprezentuje poniższy wzór:

$$F = F_{t1} + F_{tz1} + F_{t2} + F_{tz2} + \dots + F_{tn} + F_{tzn} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

gdzie:

F_t – siła tarcia kabla na prostym odcinku (o rolki przelotowe, ścianki przepustów itp.);

F_{tz} – siła tarcia na załomach trasy.

W przypadku sił tarcia na prostych odcinkach trasy możemy wyróżnić trzy warianty definiujące w jakim stopniu siła tarcia będzie wpływać na ciągnięty odcinek. Pierwszy z nich, to gdy kabel jest ciągnięty niemalże w poziomej linii:

$$F_t = g \cdot m \cdot L \cdot \mu \quad [\text{N}] \quad (4)$$

W przypadku, gdy trasa kablowa będzie przebiegać przez wzniesienie terenu, ale pod kątem do 25° , można zastosować uproszczony wzór uwzględniający różnicę wysokości:

$$F_t = g \cdot m \cdot (L \cdot \mu \pm h) \quad [\text{N}] \quad (5)$$

Natomiast w przypadkach, gdzie kąt wzniesienia będzie większy należy skorzystać z pełnego wzoru:

$$F_t = g \cdot m \cdot L \left(\mu \cdot \cos \left(\beta \frac{\pi}{180} \right) \pm \sin \left(\beta \frac{\pi}{180} \right) \right) \quad [\text{N}] \quad (6)$$

gdzie:

g – wartość przyspieszenia grawitacyjnego ($\sim 9,81 \text{ m/s}^2$);

m – masa układanego kabla [kg/m];

L – długość rozważanego odcinka trasy [m];

μ – współczynnik tarcia między powłoką kabla a materiałem powierzchni na trasie kablowej;

h – różnica wysokości początku i końca nachylnego odcinka [m];

β – kąt wychylenia odcinka od poziomu [$^\circ$].

W przypadku sił tarcia kabla na załomach trasy najpierw należy wyznaczyć współczynnik kąta załamania trasy K :

$$K = e^{\mu \cdot \alpha \cdot \frac{\pi}{180}} \quad (7)$$

Tab. 2. Przykładowe wartości współczynnika K

α	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,4$
15°	1,03	1,05	1,11
30°	1,05	1,11	1,23
45°	1,08	1,17	1,37
60°	1,11	1,23	1,52
75°	1,14	1,30	1,69
90°	1,17	1,37	1,87

Na podstawie którego wyznaczana jest wartość siły tarcia na załomie trasy:

$$F_{tz} = (K - 1) \cdot F_{ts} \quad [\text{N}] \quad (8)$$

gdzie:

α – kąt załamania trasy;

F_{ts} – wypadkowa siła tarcia z poprzednich odcinków trasy.

Podczas wyliczania sił ciągnących ważnym aspektem jest przedstawiony w powyższych wzorach współczynnik tarcia, ponieważ to jego wartość potrafi znacznie wpłynąć na końcową

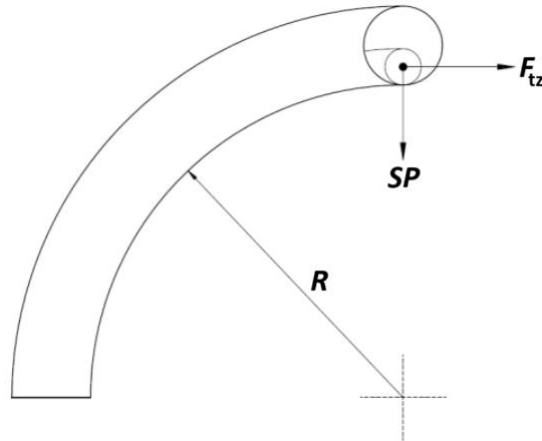
siłę niezbędną do przeciągnięcia kabla. Współczynnik ten będzie zależał zarówno od materiału powłoki zewnętrznej kabla, materiału powierzchni trasy mającej bezpośredni kontakt z tą powłoką a także zastosowanego lubrykantu. Wartości tego parametru zaleca się szukać w broszurach producenta danego lubrykantu, natomiast w przypadku braku informacji AEIC zaleca zastosowanie poniższych, bardziej konserwatywnych wartości [6].

Tab. 3. Wybrane wartości współczynnika tarcia wg AEIC CG5-15 (dla lubrykantu na bazie wody i mydła - 75°F)

Materiał zewnętrznej warstwy kabla	Materiał trasy kablowej			
	PE	PVC	Beton	Metal
PE – polietylen	0,25	0,3	0,35	0,5
PVC – polichlorek winylu	0,30	0,5	0,55	0,65
CE – concentric neutral	0,20	0,4	-	0,5
Pb – powłoka ołowiana	0,20	0,25	0,55	-

W przypadku ciągnięcia kabla po rolkach, zwykle przyjmować się współczynnik tarcia od 0,1 do 0,15, choć niektóre źródła podają skrajne wartości nawet do 0,3.

Znając siły na poszczególnych załamaniach trasy kablowej, można wyznaczyć naprężenie boczne SP (ang. Sidewall Pressure) działające na powłokę kabla podczas przeciągania go po łuku, na które wpływ mają czynniki przedstawione na rysunku 7.



Rys. 7. Czynniki wpływające na naprężenie boczne [7]

Tak jak w przypadku współczynnika korekcyjnego k , budowa, ilość, a także ułożenie względem siebie przeciąganych kabli będzie miała znaczenie. W przypadku kabli jednożyłowych wartość spodziewanej siły bocznej będzie wynosiła:

$$SP = \frac{F_{tz}}{R} \quad [\text{N/m}] \quad (9)$$

Dla trzech jednożyłowych kabli układanych na płasko czy też w kołyskę równanie będzie miało postać:

$$SP = (3 \cdot w - 2) \cdot \frac{F_{tz}}{3 \cdot R} \quad [\text{N/m}] \quad (10)$$

Natomiast dla ułożenia trójkątnego będzie ono wyglądać następująco:

$$SP = w \cdot \frac{F_{tz}}{2 \cdot R} \quad [\text{N/m}] \quad (11)$$

gdzie:

w – współczynnik wagowy ciągniętego kabla/i;

F_{tz} – siła na końcu załamania;

R – promień gięcia.

W przypadku, gdy ciągnięty jest pojedynczy kabel wówczas $w = 1$; natomiast dla ciągnięcia większej ilości należy skorzystać z jednego z poniższych wzorów.

Dla kabli ułożonych w trójkąt:

$$w = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D}{d - D}\right)^2}} \quad (12)$$

Dla kabli ułożonych na płasko:

$$w = 1 + \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{D}{d - D}\right)^2 \quad (13)$$

gdzie:

d – średnica otworu przepustu / rury;

D – średnica pojedynczego kabla.

Naprężenie boczne jest wielkością stosowaną stricte na rynku amerykańskim, z uwagi na niskie dopuszczalne tam wartości promieni gięcia. Sięgają one w zależności od konstrukcji do nawet 7D, podczas gry na rynku europejskim wartości te zazwyczaj oscylują w granicy 15D czy 20D na rynku brytyjskim. W związku z tym trudno znaleźć w europejskiej literaturze wartości graniczne tego parametru. W przypadku amerykańskich zaleceń można sięgnąć po normę AEIC CG5-15 3rd Edition „*Underground Power Cable Pulling Guide*” czy też IEEE 576-2000 „*IEEE Recommended Practice for Installation, Termination, and Testing of Insulated Power Cable as Used in Industrial and Commercial Applications*”. Przykładowe parametry graniczne wg IEEE zostały zawarte w poniższej tabeli.

Tab. 4. Maksymalne wartości naprężenia bocznego wg IEEE 576-2000

Rodzaj kabla	Maksymalna wartość SP	
	lbf/ft	N/m
Kable sygnalizacyjne 600V	500	7300
Kable 600V i 1kV		
- do 6 AWG	300	4400
- powyżej 8 AWG	500	7300
Kable 5 – 15 kV	500	7300
Kable 25 – 35 kV	300	4400
Kable z pancierzem Interlock	300	4400
Kable pomiarowe		
- jedna para	300	4400
- więcej par	500	7300

Z kolei AEIC CG5-15 3rd Edition [7] podaje, że maksymalna wartość dla kabli o izolacji XLPE oraz EPR z ekranem w postaci taśm bądź drutów miedzianych i powłoce PE lub PVC może wynosić 2000 lb/ft (ok. 29,2 kN/m), przy czym kable w powłoce bezpośrednio nieprzylegającej do „rdzenia” jak w przypadku konstrukcji typu MC-HL wartość ta powinna być zredukowana do 1500 lb/ft (ok. 21,9 kN/m), a dla ciągnięcia trzech pojedynczych żył do 750lb/ft (ok 10,9 kN/m). Inne podejście prezentuje natomiast Tele-Fonika Kable, która jako producent zaleca jako wartość graniczną 500lb/ft (ok. 7,3 kN/m) w przypadku korzystania z rolek, natomiast dla przepustów wartość ta jest podniesiona do 1000lb/ft (ok. 14,6 kN/m) [8].

W przypadku załomów trasy kablowej istotnym parametrem jest także nacisk kabla na pojedynczą rolkę kątową, wynoszący maksymalnie 1,4 kN/rolkę, którego wartość można wyznaczyć na podstawie poniższego wzoru.

$$F_r = \frac{K \cdot F_{ts}}{n \cdot (R_w + b)} \quad [\text{kN}] \quad (14)$$

gdzie:

K – współczynnik kąta załamania trasy;

F_{ts} – siła wypadkowa, wynikająca z poprzednich odcinków trasy [kN];

n – liczba rolek przypadająca średnio na 1m długości łuku załomu [szt./m];

R_w – długość promienia łuku ściany trasy [m];

b – odległość zewnętrznej powierzchni rolki od podstawy jej ramy [m], (zazwyczaj $b = 0,15$).

Parametry przy układaniu w rurach

Podczas ciągnięcia kabli przez przepusty kablowe może okazać się konieczne wykonanie dodatkowych obliczeń i weryfikacji. Jednym z nich jest sprawdzenie, czy podczas ciągnięcia więcej niż jednego kabla w pojedynczym przepuszczeniu nie dojdzie do ich zaklinowania. Do weryfikacji prawdopodobieństwa wystąpienia tego zjawiska służy współczynnik zatoru (ang. Jamm Ratio), który wylicza się następująco:

$$JR = \frac{1,05 d}{D} \quad (15)$$

gdzie:

d – średnica otworu przepustu / rury;

D – średnica pojedynczego kabla.

W przypadku, gdy wynik będzie mieścić się w przedziale między 2,8 a 3,2 istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia zatoru. Jeżeli natomiast uzyskana wartość będzie większa bądź też mniejsza niż powyższy zakres, ryzyko zaklinowania jest mało prawdopodobne. Należy pamiętać, iż w przypadku wystąpienia wartości poniżej 2,8 należy zweryfikować prześwit w przepuszczeniu. Wartość ta powinna wynosić nie mniej niż 0,5 cala (12,7 mm) i wylicza się ją w zależności od ilości i ułożenia przeciąganych kabli [7].

Dla pojedynczego kabla:

$$CL = d - D \quad (16)$$

Dla trzech kabli ułożonych w trójkąt:

$$CL = \frac{d}{2} - 1,366 \cdot D + \frac{d - D}{2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{D}{d - D}\right)^2} \quad (17)$$

Dla trzech kabli ułożonych na płasko (w kołyskę):

$$CL = \frac{d}{2} - \frac{D}{2} + \frac{d - D}{2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{D}{2(d - D)}\right)^2} \quad (18)$$

Wspomaganie ciągnięcia kabli

Niekiedy może zdarzyć się, że obliczona siła ciągnięcia bądź też nacisk na zewnętrzną ściankę kabla będzie tak duży, że przewyższać będzie wartości dopuszczalne. W momencie, gdy nie możemy już wpływać ani na współczynnik tarcia (poprzez zastosowanie innego

rodzaju lubrykantu), ani poprzez zmianę trasy (choćby przez zwiększenie promieni gięcia) a zależy nam, by trasa została przeciągnięta w niezmiętej liczbie odcinków, wówczas można zastosować wspomaganie ciągnące na pośrednich etapach trasy. W zależności od rynku pojawiają się dwa stosowane urządzenia. W przypadku układania kabli na rynku krajowym, jak i europejskim popularnym rozwiązaniem są tzw. „pieski kablowe” (ang. cable dog). Działa ono na zasadzie napędzanych kół pasowych bądź też gąsienic, między które zostaje doprowadzony kabel, który przez odpowiedni docisk części ruchomych maszyny zostaje przepchnięty za powłokę w miejscach styku. Ponieważ mamy tu do czynienia z punktowym naciskiem na powłokę kabla, siły oddziałujące na nią nie są tak równomiernie rozłożone jak w przypadku ciągnięcia za pończochę, dlatego nie można przyjąć takich samych wartości granicznych. Jeżeli występuje konieczność zastosowania większej siły wspomagającej, warto rozważyć rozdzielanie jej na kilka urządzeń wzdłuż trasy.



Rys. 8. Przykładowy wygląd pieska kablowego podczas pracy [9]

W przypadku rynku amerykańskiego powszechnie stosowanym rozwiązaniem są tzw. assist tuggery. Są to maszyny wyposażone w silnik, zazwyczaj dwubiegunowy z odpowiednio wyprowadzonym i zabudowanym wałem, w celu ciągnięcia przez niego dodatkowej, wspomagającej liny ciągnącej. W takim rozwiązaniu praktykuje się dwa sposoby jej mocowania do powłoki zewnętrznej kabla. Pierwszym z nich jest założenie wcześniej wspomnianej pończochy, drugim natomiast jest tzw. klaczy ogon (ang. mare's tail), będący odpowiednim sposobem oplotu sznura ciągnącego wokół kabla.



Rys. 9. Assist tugger na mocowaniu łańcuchowym [10]

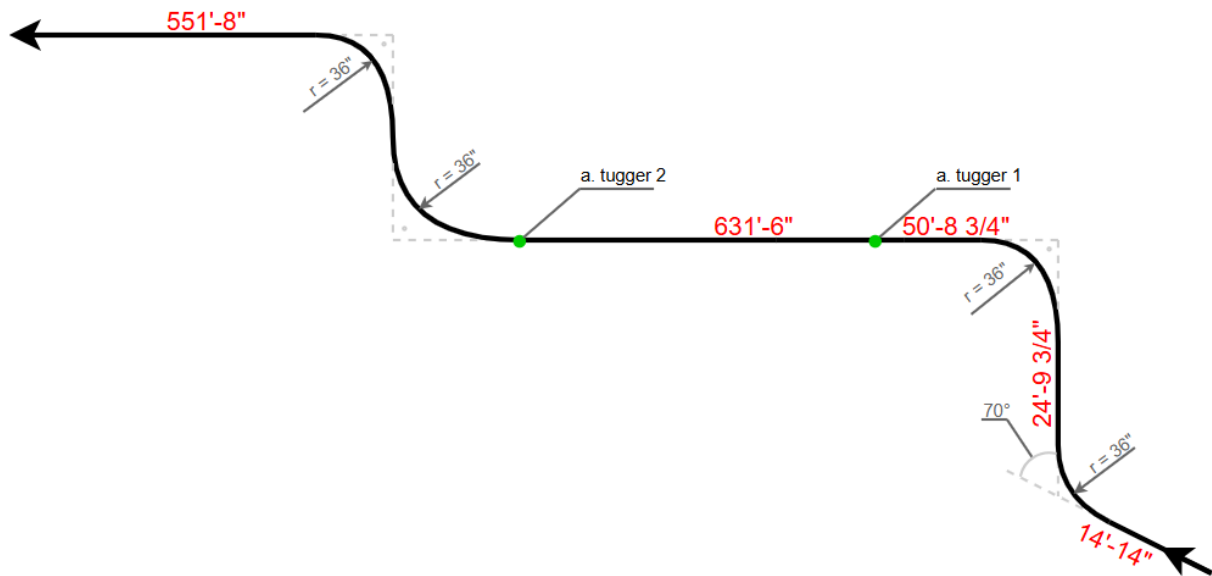
W przypadku takiego rozwiązania ciągnięcie asystujące odbywa się punktowo i przy dotarciu mocowania do urządzenia wspomagającego musi zostać ono przeniesione na przeciwny koniec. W przypadku tego rozwiązania IEEE zaleca, by wartość ciągnięcia wspomagającego nie przekraczała 3 520N.



Rys. 10. Przykład założenia klaczonego ogona na kabel typu MC-HL

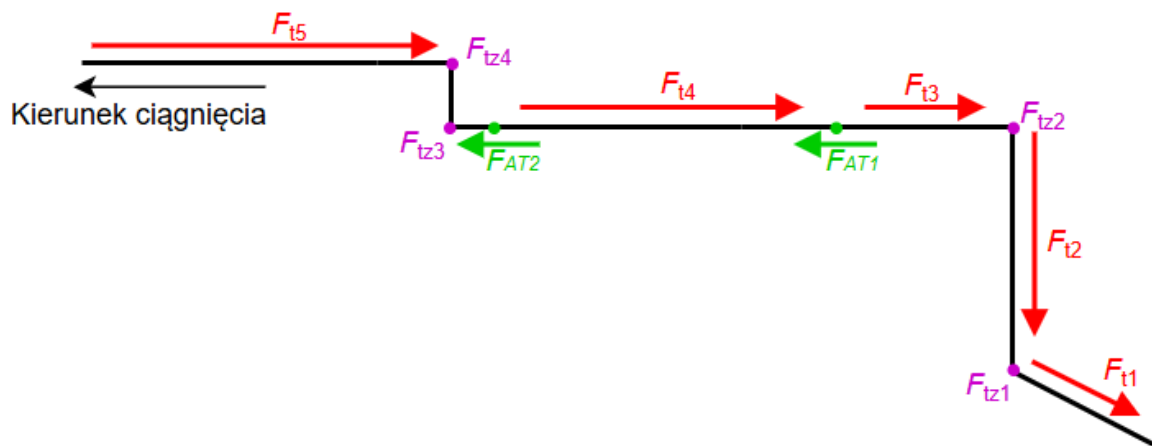
Wyliczenia w programie Cableizer w zależności od parametrów

Przykładowy schemat trasy kablowej pod wyliczenia siły ciągnięcia został przedstawiony poniżej.



Rys. 11. Schemat trasy kablowej z zaznaczonymi długościami odcinków, kątami załamania i umiejscowieniem assist tigger'ów (nie w skali)

Trasa ta została podzielona na łącznie pięć prostych odcinków oraz cztery punkty załomu trasy, przy czym dwa ostatnie znajdują się jeden za drugim, niemalże bez prostego odcinka między nimi. Zważywszy na bardzo krótką długość segmentu prostego, siła tarcia na nim została pominięta z uwagi na jej marginalny wpływ, co zostało przedstawione na uproszczonym, poniższym schemacie.



Rys. 12. Interpretacja sił tarcia oraz sił wspomagających oddziaływujących na kabel podczas ciągnięcia

Do analizy sił ciągnięcia został wykorzystany program Cableizer, natomiast kablem ciągniętym był kabel typu MC-HL z rysunku 10. Do uzyskania wyników prócz parametrów trasy kablowej należało wprowadzić dane wejściowe przedstawione w tabeli 5.

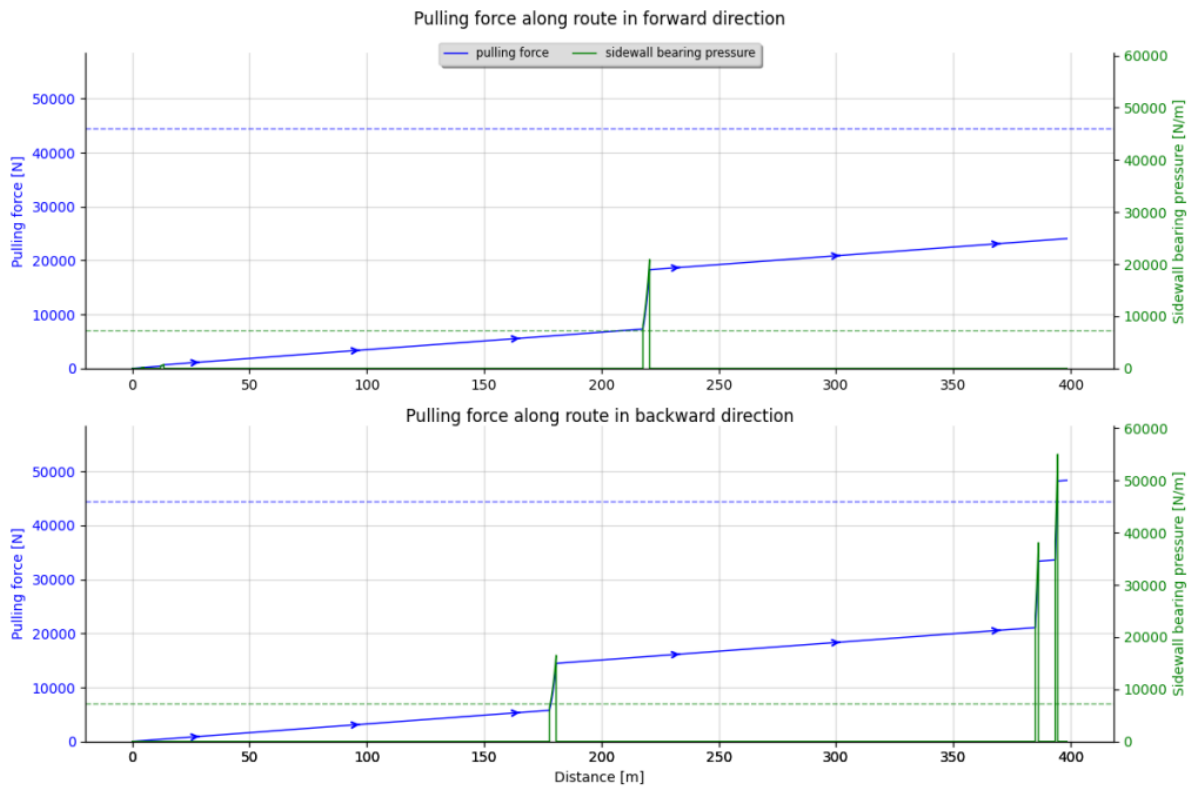
Tab. 5 Parametry wejściowe do programu Cableizer

Nazwa Kable	MC-HL 3x500MCM +3x5AWG 5kV 133%
Średnica zewnętrzna	75,4 mm
Masa kable	11,02 kg/m
Maksymalna siła ciągnięcia za oczko	10 000 lbs (ok. 44 482 N)
Maksymalny nacisk na powłokę	7 300 N
Dynamiczny współczynnik tarcia	0,3

Na tym etapie nie wprowadzono jeszcze żadnych sił wspomagających. Na podstawie wprowadzonych danych wejściowych, program wylicza siłę ciągnięcia na każdym odcinku, a także siły boczne działające na kabel na załomach w obu kierunkach ciągnięcia kable:

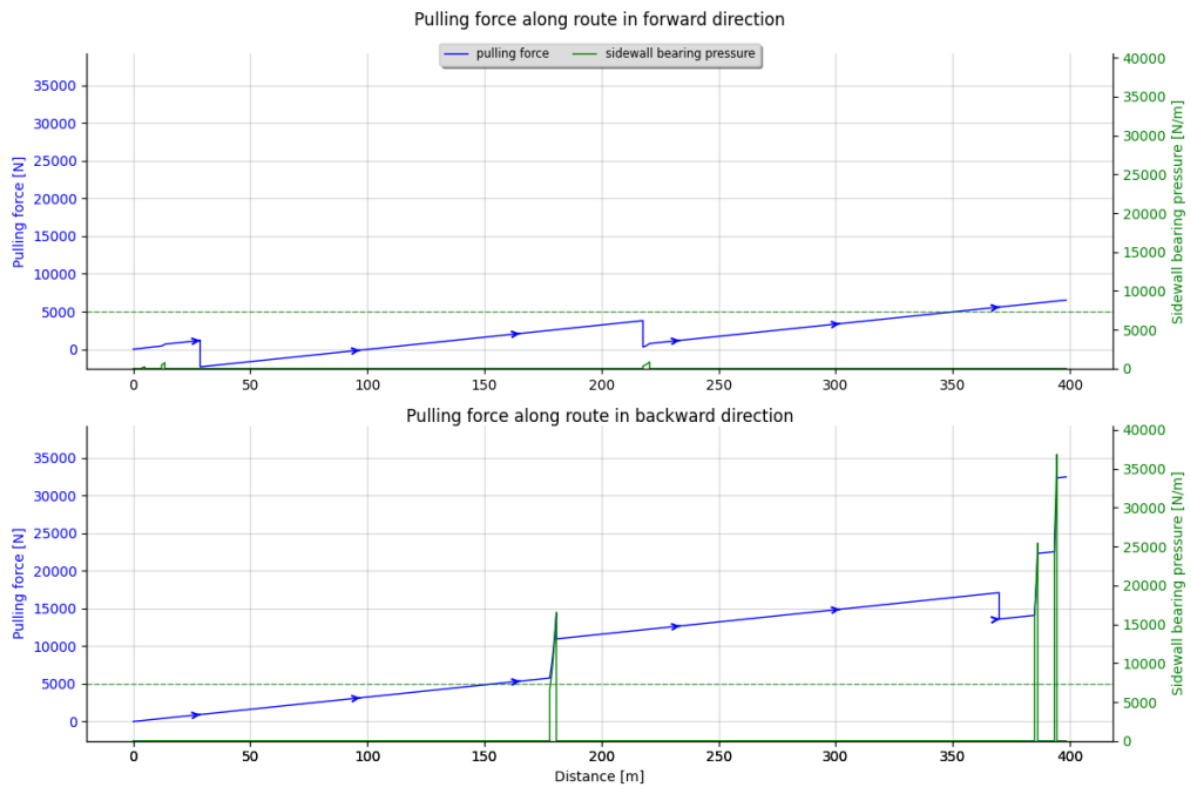
forwards					backward				
Type	ΔF [N]	L [m]	F_{rad} [N/m]	F_{pull} [N]	Type	ΔF [N]	L [m]	F_{rad} [N/m]	F_{pull} [N]
Reel		0.0		0.0	Reel		0.0		0.0
section 1	129.7	3.9		129.7	section 5	5770.9	177.9		5770.9
bend 1	89.8	5.0	240.2	219.5	bend 4	3506.4	179.3	10150.2	9277.3
section 2	226.9	12.1		446.5	bend 3	5617.1	180.8	16295.8	14894.4
bend 2	301.2	13.5	818.0	747.6	pusher 2	0	180.8		14894.4
section 3	486.3	28.6		1234.0	section 4	6127.5	369.9		21021.9
pusher 1	0	28.6		1234.0	pusher 1	0	369.9		21021.9
section 4	6127.5	217.7		7361.5	section 3	486.3	384.9		21508.2
pusher 2	0	217.7		7361.5	bend 2	12979.9	386.3	37733.2	34488.1
bend 3	4463.9	219.1	12938.0	11825.3	section 2	226.9	393.4		34715.1
bend 4	7151.0	220.5	20761.9	18976.4	bend 1	15400.9	394.5	54831.5	50116.0
section 5	5770.9	398.4		24747.3	section 1	129.7	398.4		50245.7

Rys. 13. Wyniki poszczególnych sił ciągnięcia oraz sił bocznych (brak wspomagania)



Rys. 14. Graficzna interpretacja wyników bez wspomagania

Na podstawie powyższych wyników widać, iż w przypadku tej trasy wąskim gardłem są załamania trasy 3 i 4, gdyż im załamanie trasy bliższe kątowni prostemu, tym większe naprężenia będą występowały. Zarówno ciągnięcie do przodu jak i w drugą stronę powoduje zbyt duże siły naprężeniowe na powłoce, przy czym kierunek przeciwny dodatkowo przewyższa dopuszczalną siłę ciągnięcia na końcu trasy. W przypadku załączenia obu ciągnięć wspomagających o mocy 3,5 kN rezultaty uległy znacznej poprawie, niemalże eliminując naprężenia w załomach wąskiego gardła.

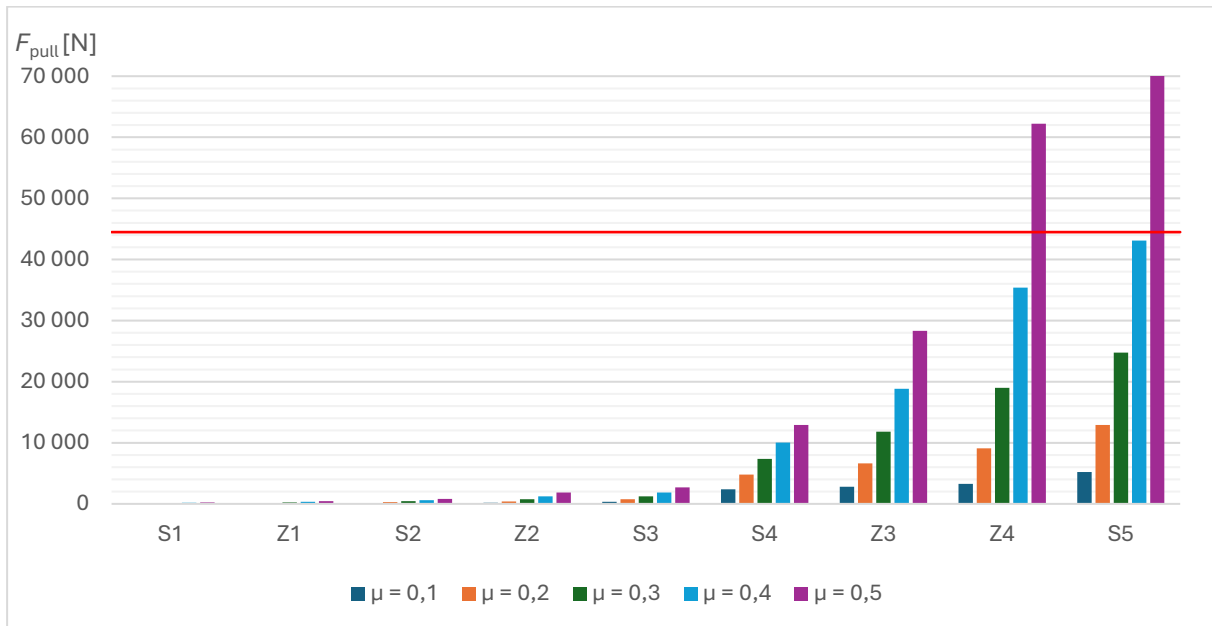


Rys. 15. Graficzna interpretacja wyników ze wspomaganie

W celu bardziej efektywnej wizualizacji wpływu poszczególnych parametrów na siły ciągnięcia przeprowadzono pewną ilość symulacji różnych warunków na trasie kabla. Podstawowe założenia zostały przyjęte jak w tabeli 5, chyba że dane poszczególnych wykresów wykazują zmianę parametru.

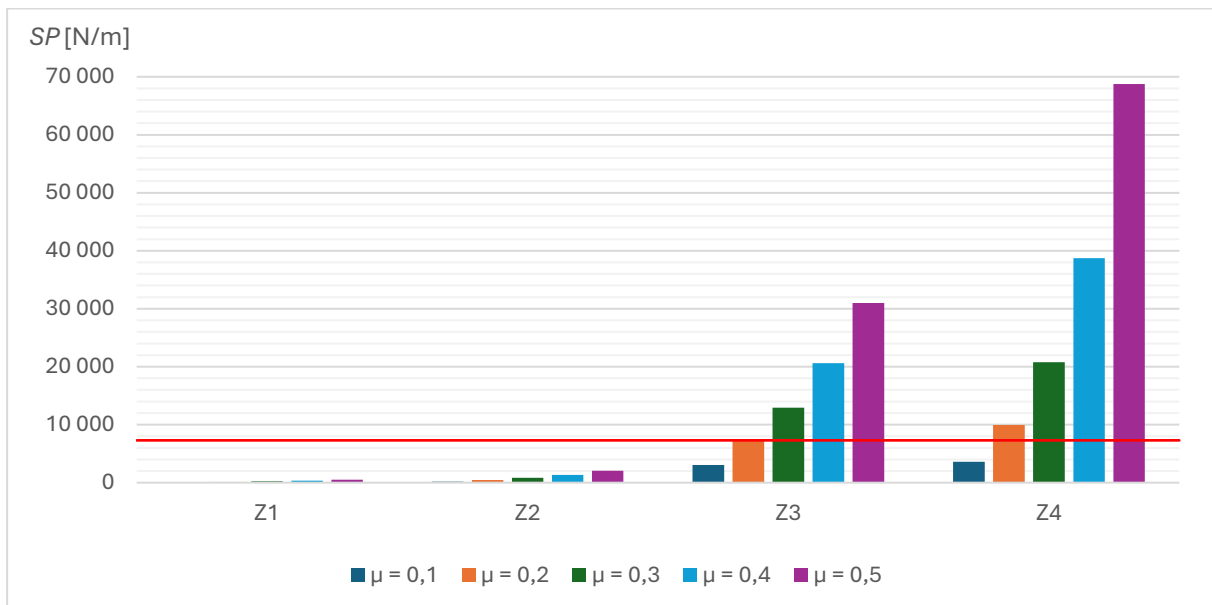
Wpływ współczynnika tarcia

W celu pokazania wpływu współczynnika tarcia na parametry podczas ciągnięcia kabla założono, że na całej trasie współczynnik będzie wynosić kolejno od 0,1 do 0,5 ze skokiem 0,1. Wartości siły, jakiej trzeba użyć, by przeciągnąć kabel przez dany odcinek zostały przedstawione na rysunku 16, natomiast naprężenia oddziałujące na powłokę kabla na załomach trasy na rysunku 17. Liniami czerwonymi zostały zaznaczone przyjęte wartości graniczne. Literami „S” oznaczono kolejne sekcje trasy, natomiast „Z” jej załomy, zgodnie z rysunkiem 12.



Rys. 16. Wpływ współczynnika tarcia na siły potrzebne do przeciągnięcia poszczególnych odcinków trasy

Widać, iż niezależnie od współczynnika tarcia siły występujące na początku trasy posiadają znikomy wpływ z uwagi na ich krótkie odcinki, natomiast już przy segmencie 4 wartość współczynnika tarcia zaczyna mieć coraz większe znaczenie, co przy jej przyjętym maksimum sprawia, że potrzebna siła ciągnąca na ostatnim segmencie przewyższa dopuszczalną wartość.

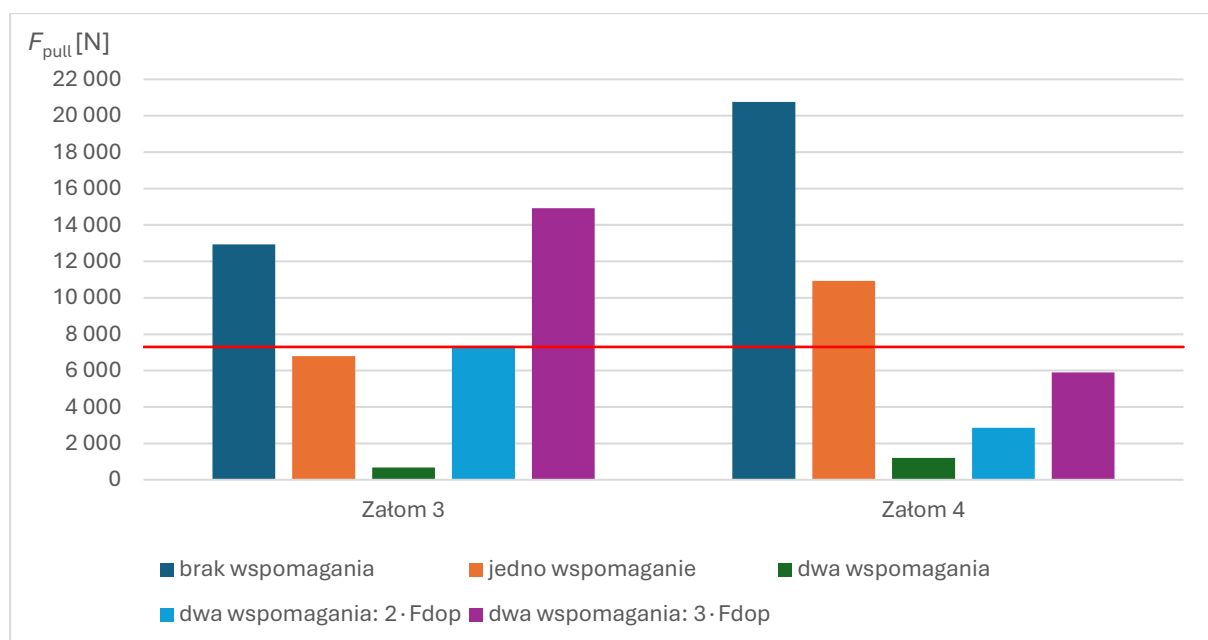


Rys. 17. Wpływ współczynnika tarcia na naprężenia oddziałujące na powłokę na załomach trasy

W przypadku naprężeń na powłoce kabla jedynie dla minimalnej wartości współczynnika tarcia, nie odnotowano przekroczenia zalecanych parametrów, co potwierdza konieczność przedsięwzięcia dodatkowych środków redukujących naprężenia.

Wpływ urządzeń wspomagających i ich mocy

Zgodnie z rysunkiem 15, po uwzględnieniu wspomaganie ciągnięcia kabla odnotowano znaczącą poprawę naprężeń oddziałujących na jego powłokę na załomach trasy, z kolei na rysunku 18 przedstawiono wpływ wartości tego wspomaganie. Rozważono wariant bez wspomaganie, jednym wspomaganie oraz dwoma w wariacie zarówno z mocą dopuszczalną jak i z dwukrotnością i trzykrotnością tej wartości. Ponieważ assist tuggery były zainstalowane za załomem pierwszym i drugim analiza ich naprężeń bocznych została pominięta, z uwagi na brak wpływu urządzeń na te punkty.

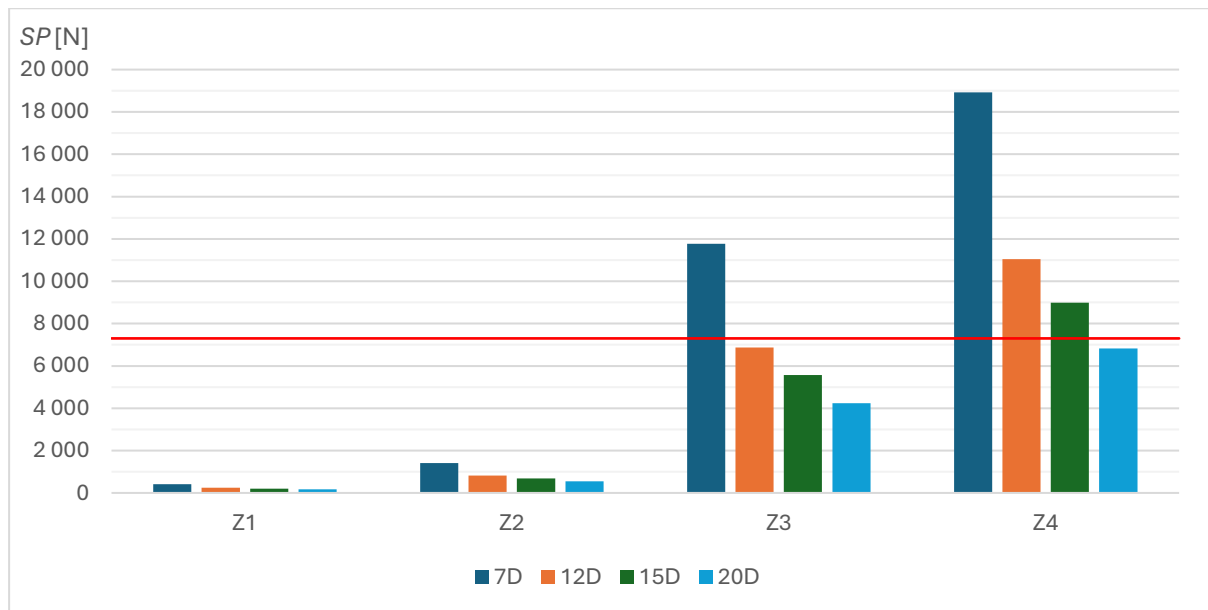


Rys. 18. Wpływ urządzeń wspomagających i ich mocy na wartość SP załomu 3 i 4

Wariant bez i z pojedynczym wspomaganie nie przyniósł pozytywnych rezultatów z uwagi na przekroczenia wartości dopuszczalnych w jednym bądź obu załomach. W przypadku zastosowania obu wspomagań z nastawą o mocach zalecanych w znaczący sposób zredukowano naprężenia. Ciekawy natomiast okazał się wariant z dwukrotnością i trzykrotnością tej wartości, ponieważ przy trzecim załomie siła wspomagająca była tak duża, że zaczęła wręcz przepychać kabel przez załom, co wywołało spore naprężenia. W obu przypadkach naprężenia na załomie czwartym były poniżej wartości granicznej z uwagi na wytracenie siły pchającej na załomie trzecim w skutek tarcia.

Wpływ promienia gięcia na wartość SP

Ostatnim rozważanym przypadkiem jest wpływ dobranego promienia gięcia kabla na załomie trasy. We wcześniejszych rozważaniach jego wartość była dobrana stosunkowo bezpiecznie i wynosiła w przybliżeniu 12D, podczas gdy minimalna wartość dla tego typu konstrukcji wynosi 7D. Wpływ tego parametru został przedstawiony na rysunku 19, dla 7-, 12-, 15- i 20- krotności średnicy zewnętrznej kabla, z użyciem pojedynczego assist tuggera.



Rys. 19. Wpływ promieni gięcia załomu trasy na naprężenia powłoki kabla

W przypadku zastosowania promieni gięcia 20D widać, iż kabel mógłby zostać przeciągnięty przez wyznaczoną trasę bez przekraczania wartości naprężenia dopuszczalnego przy użyciu tylko jednego wspomaganie ciągnięcia. W przypadku pozostałych promieni gięcia, za wyjątkiem minimalnego 7D, naprężenia w załomie trzecim zostały zredukowane poniżej wartości dopuszczalnej.

Podsumowanie

Istotnym aspektem podczas wyznaczania przebiegu trasy kablowej, prócz analizy obciążalności prądowej, jest sposób jej ułożenia. Parametry takie jak maksymalna dopuszczalna siła ciągnąca oraz naprężenia boczne mają kluczowe znaczenie dla zachowania integralności konstrukcyjnej kabla podczas jego przeciągania. Przy znacznej liczbie zmian kierunku trasy kablowej należy ograniczać stosowanie załamań pod kątem 90°, a tam, gdzie warunki instalacyjne na to pozwalają, projektować możliwie największe promienie gięcia,

redukujące naprężenia działające na powłokę zewnętrzną kabla. W sytuacji ograniczonej możliwości optymalizacji geometrii trasy wskazane jest zastosowanie środków minimalizujących opory ruchu, w tym specjalistycznych lubrykantów obniżających współczynnik tarcia między powłoką kabla a materiałem elementów trasy kablowej, jak również mechanicznych urządzeń wspomagających przeciąganie, takich jak pieski kablowe czy assist tuggery, o odpowiednio dobranej mocy. W celu zapewnienia ochrony powłoki kabla podczas jego przeciągania na załomach trasy z wykorzystaniem rolek kątowych należy zweryfikować wartość siły nacisku przypadającej na pojedynczą rolkę. W obszarze przepustów należy natomiast zweryfikować średnicę otworów w punktach zmiany kierunku trasy, celem minimalizacji ryzyka zakleszczenia wiązek kablowych. Dobór wszelkich parametrów instalacyjnych powinien opierać się na obowiązujących lokalnych normach i standardach oraz wytycznych producenta stosowanego okablowania.

Bibliografia

- [1] <https://pgedystrybucja.pl/o-spolce/aktualnosci/pierwsza-w-polsce-maszyna-do-kablowania-sieci-energetycznych-przyspieszy-inwestycje-pge-dystrybucja>
- [2] <https://mp-technik.com.pl/produkt/liny-do-kablowych-wciagarek-linowych/>
- [3] <https://mp-technik.com.pl/produkt/rolka-kablowa-katowa-new/>
- [4] <https://mp-technik.com.pl/produkt/ponczocho-do-przeciągania-kabli-%E2%8C%80-8-15-mm/>
- [5] IEEE Std 576™-2000 IEEE Recommended Practice for Installation, Termination, and Testing of Insulated Power Cable as Used in Industrial and Commercial Applications
- [6] Southwire® – Power Cable Manual 4th Edition
- [7] AEIC CG5-15 3rd Edition Underground Extruded Power Cable Pulling Guide
- [8] Tele-Fonika Kable Guidelines Cable Installation; Edition 3/2025
- [9] <https://www.dta-technik.pl/urzadzenia-pchajace-kable-i-rury-cable%C2%A0dog/urzadzenia-pchajace-kable-i-rury-cable-dog-bks-400/>
- [10] <https://electricalline.com/emerson-expands-greenlee%C2%AE-lineup-10000-pound-g10-tugger-heavy-duty-cable-puller>