

## **RURY PE W KIERUNKOWYCH WIERCENIACH HORYZONTALNYCH HDD - ZALETY I OGRANICZENIA STOSOWANIA**

### **Wstęp**

Horyzontalne wiercenia kierunkowe HDD – Horizontal Directional Drilling to nowoczesna technika zaliczana do metod bezwykopowych. HDD to naturalna i przyjazna środowisku człowieka alternatywa wobec tradycyjnych metod pokonywania przeszkód i układania liniowych instalacji. Otwory wiertnicze wykonuje się w celu instalacji rurociągów do transportu ropy naftowej, gazu ziemnego, substancji chemicznych, dla budowy sieci wodociągów i kanalizacji, dla położenia pod powierzchnią terenu światłowodów i kabli energetycznych. Pewne perspektywy rysują się dla HDD także w obszarze instalacji geotermalnych, drenażowych i ciepłowniczych.

Technologia umożliwia instalacje przewodów rurowych o średnicach już od kilkudziesięciu milimetrów. Ze względu na specyfikę prowadzenia prac w otworze zabezpieczonym jedynie płuczką wiertniczą, potencjalna średnica instalowanego rurociągu limitowana jest do około 1500 mm. Długości osiąganych pojedynczych odcinków przekraczają aktualnie 3000 m. Na uwagę zasługuje możliwość ułożenia kilku rur w jednym otworze wiertniczym. Metoda jest stosowana wszędzie tam, gdzie tradycyjne instalacje w wykopach są niemożliwe albo niepraktyczne. Prace można prowadzić w bardzo szerokim zakresie warunków geotechnicznych, w bliskiej obecności innych podziemnych instalacji. Stosowanie HDD pozwala przekraczać rzeki, ruchliwe szlaki komunikacyjne, silnie zurbanizowane tereny, brzegi morskie, obszary chronione lub takie, do których dostęp jest utrudniony.

### **Sprzęt i technologia**

Zalety wynikające z zastosowania tej metody są oczywiste. Do najważniejszych z nich należą:

- Szeroki zakres długości i średnic
- Możliwość wykorzystania różnych materiałów
- Wysoka precyzja instalacji, możliwość zastosowania skomplikowanych trajektorii
- Pełna ochrona rurociągu, możliwość położenia instalacji na dużych głębokościach
- Możliwość układania instalacji pod terenami niedostępnymi
- Możliwe instalacje typu: łąd – łąd, łąd – woda, woda - woda
- Niższe koszty w porównaniu do metod alternatywnych
- Przewidywalny czas trwania inwestycji, krótki czas mobilizacji i montażu urządzeń
- Nieznaczna ingerencja w środowisko naturalne
- Mała ingerencja w sąsiadującą infrastrukturę
- Małe zakłócenia komunikacyjne

Technika wierceń kierunkowych zawiera wiele elementów znanych z głębokich wierceń naftowych. Pochylona pod kątem kilkunastu stopni laweta wiertnicza odpowiada pod względem funkcjonalności pionowemu szybowi. Urządzenia wiertnicze opisywane są standardowymi parametrami technicznymi takimi jak siła uciągu i pchania, moment obrotowy, prędkość obrotowa wrzeciona, szybkością posuwu, wydajnością systemu płuczkowego. Firmy wiertnicze stosują odpowiednie dla różnych warunków geologicznych wyposażenie wgłębne, w tym narzędzie, elementy przewodu wiertniczego, systemy nawigacji i lokalizacji.

### **Technika wykonywania przewiertu kierunkowego.**

Proponuję przyjąć definicję HDD w postaci: orientowane wiercenia dla instalacji podziemnych rurociągów, kabli i innej infrastruktury bez względu na głębokość jej posadowienia. Typowy proces HDD można podzielić na cztery etapy: wiercenie kierunkowe, poszerzanie, marsze kontrolne oraz instalacja rurociągu. Ilość poszczególnych faz operacji uzależniona jest od czynników geologiczno – technicznych.

- **Wiercenie kierunkowe (pilotowe).** Każdy projekt rozpoczyna się wierceniem otworu o średnicy od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów z punktu wejścia do punktu wyjścia. To najistotniejsza faza determinująca ostateczne położenie rurociągu. W formacjach miękkich otwór wykonywany jest według założonej trajektorii techniką wyłukiwania, urabiania strumieniem płuczki. Formacje zwarte (skalne), o dużej wytrzymałości mechanicznej, przewierca się przy użyciu silnika wgłębego ze świdrem trójgryzowym. Wykonanie założonego profilu możliwe jest dzięki krzywemu łącznikowi umieszczonemu za narzędziem urabiającym skałę.

Asymetria dolnej części przewodu może polegać też na umieszczeniu dyszy kierunkowej odchylającej strugę płynu od osi wyznaczonej przez przewód wiertniczy. Przewód wiertniczy obracany jest wyłącznie dla zorientowania narzędzia lub dla utrzymania dotychczasowego kierunku wiercenia. Postęp wiercenia i pozycja zestawu wierzącego jest monitorowany przez wgłębne systemy pomiarowe. W zależności od stopnia złożoności systemu mierzone są takie parametry jak: długość otworu, inklinacja (pochylenie), azymut (kierunek), głębokość położenia sondy. W bardziej zaawansowanych systemach dostępne są także informacje o ciśnieniu panującym na dnie otworu.

Systemy magnetyczne i żyrokompasowe mogą być stosowane na głębokościach przekraczających nawet 100 m. Rekomendowane jest, aby trajektoria otworu wykonana była przy jak największych promieniach krzywizny.

- **Poszerzanie otworu.** Otwór powinien zostać poszerzony do średnicy od 20 do 60 proc. większej od zewnętrznej średnicy rury (lub ekwiwalentnej średnicy wiązki rur). Proces wykonywany jest za pomocą narzędzia (lub zestawu narzędzi) dobrane do spodziewanych warunków geologicznych, przesuwanego obrotowo od punktu wyjścia w stronę urządzenia wiertniczego (pull reaming). Żerdzie wiertnicze (odcinki przewodu wiertniczego) dokręcane są sukcesywnie po stronie punktu wyjścia (strona rurociągową). Daje to gwarancje utrzymania właściwej trajektorii otworu.

W uzasadnionych przypadkach możliwe jest przeprowadzenie poszerzania w kierunku przeciwnym (push reaming). Aktualna średnica poszerzania i ilość marszy wiertniczych determinowana jest dostępnym sprzętem wiertniczym, długością otworu, warunkami geologicznymi, parametrami wytrzymałościowymi rury, promieniami krzywizny otworu.

Operacja poszerzania i czyszczenia otworu prowadzona jest do momentu uzyskania adekwatnego marginesu bezpieczeństwa dla planowanego procesu instalacji. Większość projektów zakłada poszerzenie otworu przed rozpoczęciem procesu instalacji. Płuczka wiertnicza o wymaganych parametrach fizycznych i chemicznych pompowana jest w objętości gwarantującej wyniesienie urobku i stabilność ściany otworu. Zawartość fazy stałej waha się od kilku do około dwudziestu procent objętościowo. Ważną sprawą jest kontrola strumienia przepływu przepływów i ciśnienia w głębinie w otworze.

Prawidłowe zaprojektowanie płynu wiertniczego w korelacji z geometrią otworu i warunkami geologicznymi pozwala bezpiecznie wykonać prace bez problemów technologicznych. Do podstawowych funkcji płynu wiertniczego należą: dostarczanie mocy hydraulicznej na spód otworu, oczyszczanie czoła narzędzia, odprowadzenie ciepła, transport zwiercin, utrzymywanie tarcia w otworze na umiarkowanym poziomie.

- **Kalibracja otworu.** W wypadku długich instalacji wielkośrednicowych wykonywane są dodatkowe marsze sprawdzające stan techniczny otworu.
- **Instalacja rurociągu.** Rurociąg powinien zostać przygotowany (o ile to możliwe) w jednym wymaganym odcinku. Prefabrykacja odbywa się po stronie punktu wyjścia. W zależności od użytego materiału rury są spawane (stal) lub zgrzewane (PE, specjalne odmiany PVC).

Niektóre rurociągi ze względu na specyfikę swojego przeznaczenia poddawane są próbom ciśnieniowym. Właściwie zabezpieczony rurociąg umieszczany jest na podporach (rolkach), a następnie wciągany za pomocą przewodu wiertniczego do poszerzonego i stabilnego otworu. W trakcie przygotowania i instalacji rurociągów o dużych średnicach niezbędne jest wykorzystanie specjalistycznego sprzętu dźwigowego. Podczas tej fazy prac rurociąg połączony jest z przewodem za pomocą łącznika obrotowego. - krętlika,

Rurociąg prowadzony jest w trakcie instalacji narzędziem o średnicy większej niż jego średnica nominalna. Instalacja odbywa się na ogół w kierunku przeciwnym do wiercenia. Znane są nieliczne przypadki zapuszczania rurociągu do otworu od strony punktu wejścia (projekty morskie). Rurociąg powinien być poddany minimalnym możliwym wyężeniom dla zapewnienia bezpiecznej i długoletniej eksploatacji. Jedną z typowych metod ograniczania naprężeń w rurociągach jest zmniejszanie jego wyporności poprzez balastowanie płynem.



Fot. Urządzenie wiertnicze klasy 2500 kN

## Rurociąg

Typowe materiały wykorzystywane przez technologie to stal, polietylen wysokiej gęstości HDPE polichlorek winylu PVC oraz żeliwo. Spośród nich polietylen jest najpopularniejszym tworzywem i materiałem w technologii. Jest łatwy w zastosowaniu, elastyczny i relatywnie odporny na naprężenia występujące w trakcie instalacji. Rury o małych średnicach mogą dostarczać w postaci kręgów, większe średnice, aż do 1400 mm, transportowane są w odcinkach i zgrzewane bezpośrednio na miejscu realizacji projektu. Technika zgrzewania pozwala na uzyskanie połączeń równie wytrzymałych, co calizna rury.

Ta metoda łączenia rur pozwala znacząco obniżyć koszty przygotowania rurociągu w porównaniu z alternatywnymi materiałami. Polietylen ma doskonałą odporność na korozję, działanie bakterii, agresywne chemiczne płyny. Jak pokazują analizy statystyczne uszkodzenia powierzchni rurociągu w wyniku instalacji HDD w prawidłowo przygotowanym otworze nie przekraczają kilku procent i nie wpływają znacząco na parametry wytrzymałościowe. Jako materiał blisko ośmiokrotnie lżejszy od stali nie wymaga zwykle ciężkiego sprzętu budowlanego i specjalnych konstrukcji podpór umożliwiających wprowadzenie rurociągu do otworu wiertniczego.

Projekt instalacji metodą HDD powinien uwzględnić możliwie najwyższą jakość polietylenu i bezpieczną dla parametrów instalacji grubość ścianki rury. Szczególnie zalecane jest stosowanie w projektach HDD rur wykonanych z polietylenu PE 100 RC.



Fot. Rurociąg przygotowany do instalacji

Fot. Rurociąg przygotowany do instalacji. Na zdjęciu widoczna głowica do wciągania z otworami wyciętymi w celu balastowania rurociągu przez płuczkę wiertniczą.



Tab. 1 Porównanie właściwości charakteryzujących materiał rurociągu (dla HDPE i stali)

Parametr	Jednostka	HDPE	Stal (rurociągi)
Typ materiału		lepkosprężysty	sprężysty
Odporność na naprężenia rozciągające		umiarkowana, zależna od temperatury i czasu działania obciążenia	wysoka
Odporność na korozję		wysoka	umiarkowana
Koszty przygotowania rurociągu		niskie - umiarkowane	wysokie
Koszty utrzymania i eksploatacji		niskie - umiarkowane	umiarkowane - wysokie
Wrażliwość na głębokość instalacji		Tak	Nie
Podatność na deformacje		Tak	Nie
Gęstość materiału	g/cm <sup>3</sup>	0,96	7,85
Bezpieczne naprężenie rozciągające (1 h)	MPa	9	250
Bezpieczne naprężenie rozciągające (12 h)	MPa	8	250
Graniczna wytrzymałość na rozciąganie	MPa	15 – 18	350
Moduł Younga (moduł sprężystości podłużnej) krótki okres ekspozycji	MPa	800	200.000
Moduł Younga (moduł sprężystości podłużnej) 10 h	MPa	400	200.000
Dopuszczalne ciśnienie wewnętrzna	MPa	1,6 - 2	Ponad 20
Rekomendowany minimalny promień wiercenia	m	Powyżej 200 średnic instalowanego rurociągu	Powyżej 1000 średnic instalowanego rurociągu
Przydatność dla danego typu aplikacji			
Gazociągi wysokiego ciśnienia			Bardzo dobra
Gazociągi średniego ciśnienia		Bardzo dobra do 1 - 1,6 MPa	Dobra
Ropociągi			Bardzo dobra
Rurociągi chemiczne		Dobra (niskie ciśnienie)	Dobra
Wodociągi		Bardzo dobra	Dobra
Kanalizacja		Bardzo dobra	Dobra
Kable energetyczne		Bardzo dobra	Bardzo dobra
Światłowody		Bardzo dobra	Bardzo dobra

W trakcie przygotowania rury instalacji oraz przyszłego użytkowania występuje szereg jej obciążeń, które należy uwzględnić na etapie koncepcji i projektowania inwestycji:

- naprężenia zginające wynikające ze swobodnego ułożenia rury pomiędzy rolkami prowadzącymi na powierzchni
- ciśnienia w trakcie testów sprawdzających szczelność rurociągu
- **naprężenia zginające i rozciągające w trakcie instalacji rury**
- zewnętrzne ciśnienie nadkładu gruntu
- ciśnienie zewnętrzne wynikające z obecności wody gruntowej
- ciśnienie zgniatające (różnicowe) wynikające z obecności płuczki w otworze
- docelowe maksymalne ciśnienie robocze

Teoretyczna, kalkulowana siła występująca w czasie instalacji zależy od:

- parametrów materiału rurociągu
- ciężaru rurociągu w powietrzu
- ciężaru właściwego płynu wiertniczego w otworze
- lepkości płynu wiertniczego w otworze
- medium wypełniającego wnętrze rury
- geometrii otworu (długość, promień krzywizny, kąty wejścia i wyjścia, głębokość instalacji)
- stosunku średnicy nominalnej otworu do średnicy rurociągu (overcut)
- stabilności otworu
- współczynnika tarcia rura – płyn - ściana otworu (stopnia oczyszczenia otworu)
- występowania w otworze obiektów o znacznej średnicy (żwir, kamienie, rumosz skalny), których wyprowadzenie z otworu jest trudne lub czasami niemożliwe
- różnicy w ewalacjach pomiędzy punktem wejścia i wyjścia
- prędkości instalacji



Fot. Instalacja rurociągu HDPE 1000 mm



Fot. Rurociąg po zakończonej instalacji



Fot. Tłokowanie rurociągu HDPE 1000 mm

Tab. 2 Rekomendowane maksymalne obciążenia osiowe (kG) dla rur polietylenowych (obciążenia trwające do 1 h), przy założeniu dopuszczalnego naprężenia rozciągającego na poziomie 9 MPa.

Średnica rury HDPE	SDR 9	SDR 11	SDR 13,5	SDR 17	SDR 21
75 mm	1.568	1.319	1.098	887	
90 mm	2.260	1.895	1.575	1.269	
110 mm	3.384	2.828	2.385	1.900	
140 mm	5.484	4.586	3.807	3.069	
160 mm	7.200	6.309	4.986	4.032	
200 mm	11.180	9.350	7.770	6.280	
250 mm	18.000	14.610	12.100	9.810	8.100
280 mm	22.100	17.900	14.800	12.100	10.000
315 mm	27.700	23.100	19.200	16.400	12.700
355 mm	35.200	29.300	24.300	20.100	16.100
400 mm	44.700	37.500	30.900	25.500	20.500
450 mm	56.500	47.300	39.400	31.600	26.000
500 mm	70.200	58.400	49.000	39.200	32.300
630 mm		92.900	77.400	62.300	50.800
800 mm		150.000	124.000	100.000	82.100
1 000 mm		233.000	194.000	156.000	128.000
1 200 mm		336.000	279.000	225.000	184.000
1 400 mm			380.000	306.000	251.000

## Kalkulacja przewidywanych sił instalacyjnych w otworach wiertniczych wierconych metodą HDD

Dla uproszczenia proponuje się przyjąć założenie, że trajektoria otworu wiertniczego będzie składała się z odcinków prostych i łuków wykonanych w jednej płaszczyźnie.

Siła potrzebna na pokonanie tarcia na odcinkach prostych:

$$F_p = \mu N L + F_{\text{fluid}}$$

Gdzie:

$F_p$  – siła tarcia na odcinku prostym (N)

$N$  – siła kontaktowa (normalna) pomiędzy rurą i jej otoczeniem (N/m)

$\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy rurą i jej otoczeniem (-)

$L$  – długość odcinka (m)

$F_{\text{fluid}}$  – tarcie pochodzące od ruchu rurociągu w lepkim ośrodku (szlamie wiertniczym)

Siła potrzebna na pokonanie tarcia na odcinkach zakrzywionych (efekt Capstana):

$$F_c = e^{\mu\alpha} (\mu N L) + F_{\text{fluid}}$$

Gdzie:

$F_c$  – siła tarcia na odcinku zakrzywionym (N)

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego

$\alpha$  – kąt krzywizny otworu (rad)

$N$  – siła kontaktowa (normalna) pomiędzy rurą i jej otoczeniem (N/m)

$\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy rurą i jej otoczeniem (-)

$L$  – długość odcinka (m)

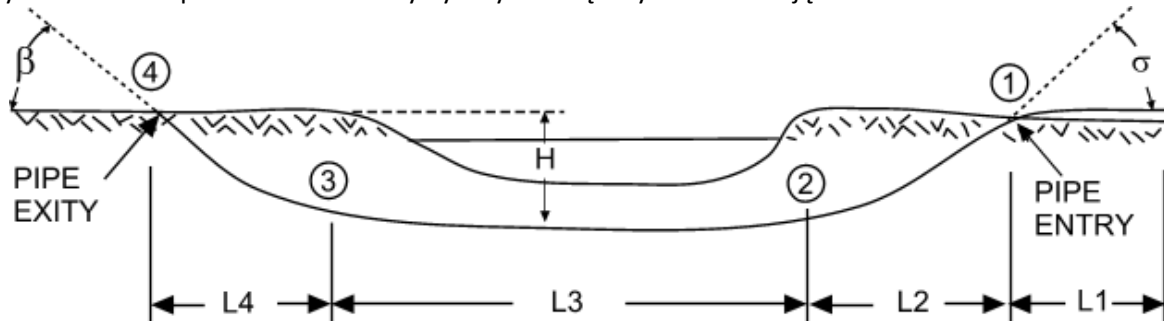
$F_{\text{fluid}}$  – tarcie pochodzące od ruchu rurociągu w lepkim ośrodku (szlamie wiertniczym)

Na podstawie wieloletnich obserwacji zachowania się rurociągów w otworach wiertniczych wypełnionych płuczką wiertniczą, autorzy proponują przyjąć założenie:

$F_{\text{fluid}} = 3 - 5 \text{ kG/m}$  poboczniczy rury



Rys. 1 Schemat punktów charakterystycznych związanych z instalacją HDD



Dla podanego teoretycznego przykładu siła instalacyjna dla poszczególnych punktów charakterystycznych: 1,2,3,4 wygląda następująco (według Larry Slavina):

$$F_1 = \exp(\mu_g \alpha) [\mu_g \cdot N_g (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)]$$

$$F_2 = \exp(\mu_h \alpha) [F_1 + \mu_h N_h L_2 + N_h H - \mu_g N_g L_2 \exp(\mu_g \alpha)] + F_{f2}$$

$$F_3 = F_2 + \mu_h N_h L_3 - \exp(\mu_h \alpha) \mu_g N_g L_3 \exp(\mu_g \alpha) + F_{f3}$$

$$F_4 = \exp(\mu_h \beta) [F_3 + \mu_h N_h L_4 - N_h H - \exp(\mu_h \alpha) \mu_g N_g L_4 \exp(\mu_g \alpha)] + F_{f4}$$

Gdzie:

$F_1, F_2, F_3, F_4$  – siła tarcia punktach charakterystycznych (N)

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego

$\alpha$  – kąt krzywizny w punkcie wejścia rury do otworu (strona montażowa) (rad)

$\beta$  – kąt krzywizny w punkcie wyjścia rury z otworu (strona wiertnicy) (rad)

$H$  – głębokość instalacji

$N_h$  – jednostkowa siła kontaktowa (normalna) pomiędzy rurą i ścianą otworu (wynika z wyporności rurociągu) (N/m)

$N_g$  – jednostkowa siła kontaktowa (normalna) pomiędzy rurą i rolkami (powierzchnią terenu). Jest to najczęściej ciężar jednostkowy rury w powietrzu.

$\mu_h$  – współczynnik tarcia pomiędzy rurą i ścianą otworu (-)

$\mu_g$  – współczynnik tarcia pomiędzy rurą i rolkami (powierzchnią terenu) (-)

$L_1, L_2, L_3, L_4$  – długość poszczególnych sekcji otworu (m)

$F_{fluid}$  – tarcie pochodzące od ruchu rurociągu w lepkim ośrodku (szlamie wiertniczym)

### Kalkulacja wyporności rurociągu

$$N_h = \pi D_z^2 / 4 \gamma_{płuczki} - \pi (D_z^2 - D_w^2) / 4 \gamma_{HDPE} - \pi D_w^2 / 4 \gamma_{cieczy\ balastujacej}$$

Gdzie:

$D_z$  – średnica zewnętrzna rurociągu

$D_w$  – średnica wewnętrzna rurociągu

$\gamma$  – ciężary właściwe płuczki w otworze, polietylenu oraz cieczy balastującej

Tab. 3 Przewidywane zakresy długości możliwych instalacji metodą HDD w zależności od średnicy rurociągu (stan na 2011)

Rurociąg	HDPE	Stal
DN 100	500 m	4.000 m
DN 200	1.000 m	4.000 m
DN 300	1.600 m	4.000 m
DN 400	2.000 m	4.000 m
DN 500	2.500 m	4.000 m
DN 600	2.400 m	3.500 m
DN 700	2.200 m	3.200 m
DN 800	2.000 m	3.000 m
DN 1000	1.800 m	2.500 m
DN 1200	1.400 m	2.000 m
DN 1400	1.200 m	1.800 m

W przypadku rur polietylenowych podstawowym ograniczeniem materiału jest wytrzymałość mechaniczna i limitowana odporność na ciśnienie różnicowe. Największe obciążenie dla rurociągu polietylenowego pojawia się w trakcie złożonego stanu naprężeń wynikającego z rozciągania, zginania, ciśnienia zewnętrznego i wewnętrznego.

Tab. 4 Analiza wstępna realnych projektów:

Lokalizacja: Gdańsk Rok budowy: 2000	Przeszkoda: Martwa Wisła	Firma wiertnicza: BETA Warszawa LMR Drilling	Sprzęt wiertniczy: Amerivcan Augers 400 kN LMR 1300 kN
Długość otworu: 520 m	Średnica otworu: 1473 mm	Rurociąg: HDPE 1200 mm SDR 21	Producent: KWH Pipe
Długości sekcji: L <sub>2</sub> = 150 m; L <sub>3</sub> = 220 m; L <sub>4</sub> = 150 m	Kąt wejścia: $\beta$ 14° = 0,24 rad Kąt wyjścia: $\alpha$ 10° = 0,17 rad Głębokość: 16 m	Współczynnik tarcia: powierzchnia: 0,15 otwór: 0,7	C. wł. PE: 0,96 G/cm <sup>3</sup> C. wł. płuczki 1,30 G/cm <sup>3</sup>
Wyporność jednostkowa rurociągu			
Ciężar jednostkowy w powietrzu: 198 kG/m	Wyporność w otworze z balastem płuczkowym: 116 kG/m	Wyporność w otworze z balastem wodnym: 347 kG/m	Wyporność w otworze rurociągu pustego: 1271 kG/m
Analiza teoretycznych sił instalacyjnych			
Etap instalacji	Balast płuczkowy	Balast wodny	Rura pusta
Punkt 1	F <sub>1</sub> = 15.840 kG	F <sub>1</sub> = 15.840 kG	F <sub>1</sub> = 15.840 kG
Punkt 2	F <sub>2</sub> = 30.340 kG	F <sub>2</sub> = 61.850 kG	F <sub>2</sub> = 187.750 kG
Punkt 3	F <sub>3</sub> = 46.950 kG	F <sub>3</sub> = 114.000 kG	F <sub>3</sub> = 382.100 kG
Punkt 4	F <sub>4</sub> = 69.440 kG	F <sub>4</sub> = 172.740 kG	F <sub>4</sub> = 586.700 kG
Wartości dopuszczalnych sił ciągnięcia dla HDPE SDR 21			
Bezpieczna siła ciągnięcia W funkcji czasu trwania ekspozycji	1 h – 184.000 kG (9 MPa)	12 h – 164.000 kG (8 MPa)	24 h – 155.000 kG 7,6 (MPa)
Analiza teoretycznych ciśnień różnicowych			
Etap instalacji	Balast płuczkowy	Balast wodny	Rura pusta
Sekcja pozioma	0,08 bar	0,48 bar	2,08 bar
Wartości dopuszczalnych ciśnień różnicowych (zgniecenie rurociągu) dla HDPE SDR 21			
Czas	1 h - 2,17 bar	100 h – 1,05 bar	50 lat – 0,63 bar

Dla projektu przyjęto wartość jednostkowego tarcia pochodzącego od przesuwania rurociągu w cieczy lepkiej na poziomie 4 kG/m<sup>2</sup> poboczniczy rury. Założono ponadto, że ciężar właściwy płuczki wpływającej przez otwartą głowicę jest niższa o 0,05 G/cm<sup>3</sup> od średniego ciężaru właściwego płynu w otworze i wynosi 1,25 G/cm<sup>3</sup>. Z przeprowadzonej analizy wynika, że jedyną możliwością zainstalowania rurociągu HDPE o średnicy 1200 mm było wypełnienie go płuczką o zbliżonym ciężarze właściwym do szlamu w otworze. W tym celu wykonano szereg otworów na poboczniczy głowicy do wciągania rurociągu, dla samoczynnego zatapiania płynnym szlamem wiertniczym.

Tempo wypełniania rurociągu było kontrolowane przez aerometr rejestrujący objętość powietrza wydostającego się przez tylną część rurociągu, które jest wypierane przez szlam wpływający przez przednią część rury. Dane o rzeczywistych siłach instalacyjnych przedstawiono na rys. 2

Lokalizacja: Hamburg Rok budowy: 2000	Przeszkoda: Teren portu	Firma wiertnicza: LMR Drilling	Sprzęt wiertniczy: LMR 1300 kN
Długość otworu: 503 m	Średnica otworu: 914 mm	Rurociąg: HDPE 630 mm SDR 11	Producent rurociągu : -
Długości sekcji: L <sub>2</sub> = 160 m; L <sub>3</sub> = 183 m; L <sub>4</sub> = 160 m	Kąt wejścia: $\beta$ 13° = 0,23 rad Kąt wyjścia: $\alpha$ 10° = 0,17 rad Głębokość: 15 m	Współczynnik tarcia: powierzchnia: 0,15 otwór: 0,6	C. wł. PE: 0,96 G/cm <sup>3</sup> C. wł. płuczki 1,25 G/cm <sup>3</sup>
Wyporność jednostkowa rurociągu			
Ciężar jednostkowy w powietrzu: 99 kG/m	Wyporność w otworze z balastem płuczkowym: 41 kG/m	Wyporność w otworze z balastem wodnym: 81 kG/m	Wyporność w otworze rurociągu pustego: 289 kG/m
Analiza teoretycznych sił instalacyjnych			
Etap instalacji	Balast płuczkowy	Balast wodny	Rura pusta
Punkt 1	F <sub>1</sub> = 7.600 kG	F <sub>1</sub> = 7.600 kG	F <sub>1</sub> = 7.600 kG
Punkt 2	F <sub>2</sub> = 12.080 kG	F <sub>2</sub> = 17.85 0 kG	F <sub>2</sub> = 41.900 kG
Punkt 3	F <sub>3</sub> = 16.240 kG	F <sub>3</sub> = 25.090 kG	F <sub>3</sub> = 71.890 kG
Punkt 4	F <sub>4</sub> = 18.530 kG	F <sub>4</sub> = 30.670 kG	F <sub>4</sub> = 106.470 kG
Wartości dopuszczalnych sił ciągnięcia dla HDPE SDR 21			
Bezpieczna siła ciągnięcia W funkcji czasu trwania ekspozycji	1 h – 92.900 kG (9 MPa)	12 h – 82.500 kG (8 MPa)	24 h – 76.600 kG 7,6 (MPa)
Analiza teoretycznych ciśnień różnicowych			
Etap instalacji	Balast płuczkowy	Balast wodny	Rura pusta
Sekcja pozioma	0,08 bar	0,48 bar	2,08 bar
Wartości dopuszczalnych ciśnień różnicowych (zgniecenie rurociągu) dla HDPE SDR 21			
Czas	1 h -2,17 bar	100 h – 1,05 bar	50 lat – 0,63 bar

W przypadku drugiego analizowanego projektu (Hamburg) po przeprowadzonej analizie spodziewanych sił ciągnięcia, spółka wiertnicza wybrała balastowanie rurociągu za pomocą wody wtłaczanej od tyłu rurociągu przez instalację wykonaną z rury HDPE o średnicy 160 mm. Przewidywane naprężenia w rurociągu nie przekraczają wówczas 40 – 50 proc. naprężeń dopuszczalnych. W obydwu omawianych przypadkach instalacja rury pustej okazała się niebezpieczna lub też technicznie niewykonalna.

Jako generalną rekomendację można przyjąć, że rurociągi z HDPE o średnicach powyżej 300 mm powinny podlegać balastowaniu wodą lub szlamem wiertniczym. Ciecz balastująca korzystnie wpływa też na obniżenie ciśnienia różnicowego (pomiędzy ciśnieniem hydrostatycznym słupa płuczki i ciśnieniem panującym wewnątrz rurociągu). Wszystkie zrealizowane w Polsce instalacje rur o średnicach od 800 mm wzwyż były wykonywane metodą otwartej głowicy (balast szlamem wiertniczym). Balast wodny wydaje się najodpowiedniejszą metodą dla rurociągów HDPE o średnicy od 300 do 630 mm.

Balastowanie nie wyczerpuje problemów instalacyjnych z jakimi może borykać się spółka wiertnicza. Kalkulowane obciążenia zachowują ważność dla przyjętych współczynników tarcia z przedziału 0,6 – 0,7. Odpowiada to dobremu stanowi technicznemu otworu i gruntowi piaszczystemu. W przypadku bardzo dobrych jakościowo otworów i formacji ilastych lub skalnych, realne do osiągnięcia współczynniki tarcia wahają się pomiędzy 0,4 i 0,5. W związku z tym tarcie pochodzące od sił kontaktowych może ulec znaczącej redukcji.

Szacowanie współczynnika tarcia odbywa się w trakcie trwania projektu wiertniczego, na podstawie rejestrowanych obciążeń na przewodzie wiertniczym.

#### Dane technologiczne z realnych projektów wiertniczych

Tab. 5 Dane podstawowe o projektach cz. 1

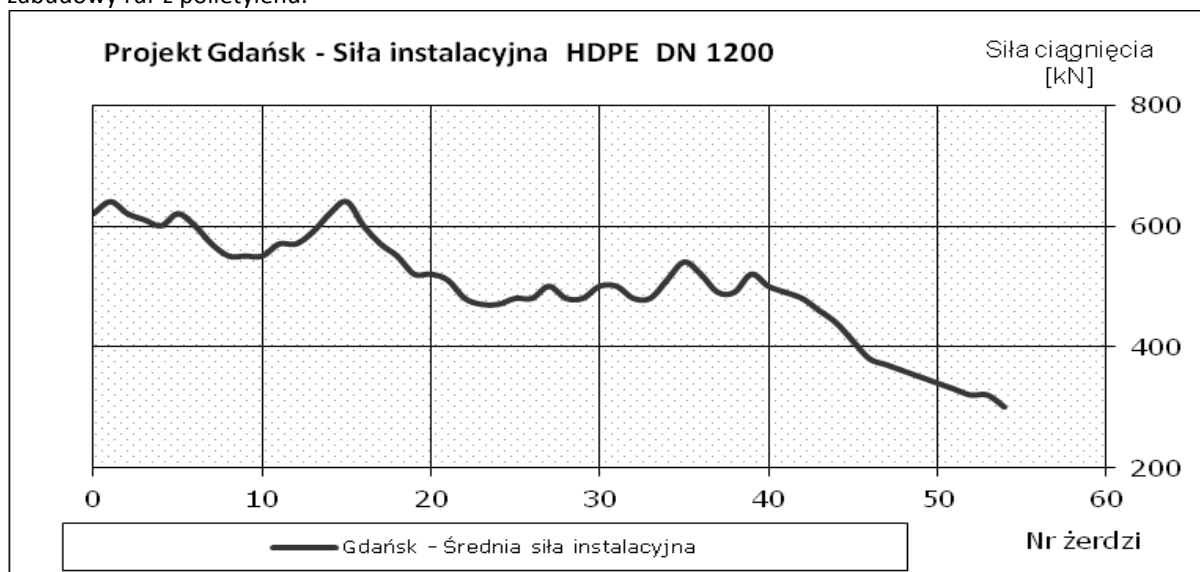
Projekt Lokalizacja	Kraj	Długość otworu	Głębokość	Rurociąg	Średnica otworu	Pole przekroju rury : pole przekroju otworu	Geologia	Rok budowy
Gdańsk	Polska	517 m	16 m	1200 mm SDR 21	1473 mm	0,66	Piasek	2000
Szczecin 2	Polska	480 m		1030 mm SDR 14,5	1220 mm	0,71	Piasek	2007
Szczecin 4	Polska	570 m		1030 mm SDR 14,5	1220 mm	0,71	Piasek	2007
Szczecin 6	Polska	620 m		1030 mm SDR 14,5	1220 mm	0,71	Piasek	2007
Hamburg 1	Niemcy	643 m	25 m	630 mm SDR 11	864 mm	0,53	Skąła	2008
Hamburg 2	Niemcy	503 m	15 m	630 mm SDR 11	914 mm	0,47	Piasek / glina	2008
Toruń	Polska	545 m	20 m	400 mm / SDR 11 125 mm / SDR 11	720 mm	0,35	Piasek / ił	2004

Tab. 6 Dane podstawowe o projektach cz. 2

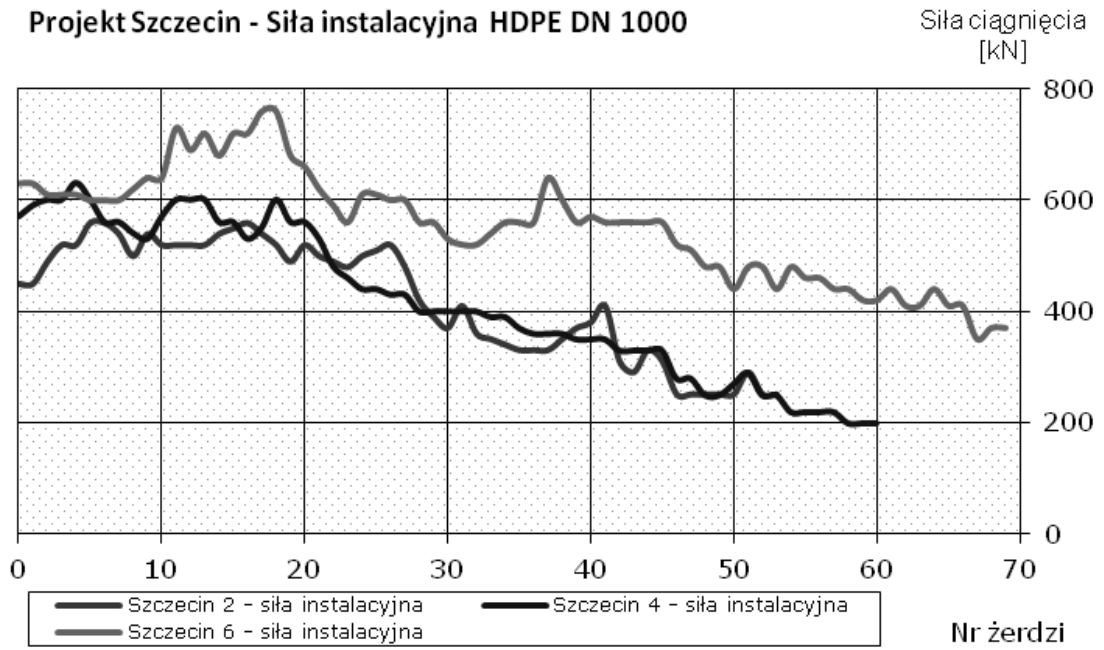
Projekt / Lokalizacja	Dopuszczalna siła instalacyjna	Maksymalna rzeczywista siła instalacyjna	Średnia rzeczywista siła instalacyjna	Średni postęp instalacji	Średnia siła w przeliczeniu na 1 m <sup>2</sup> poboczniczy rury	Jakość techniczna otworu	Medium użyte do balastowania rurociągu
Gdańsk	1640 kN	640 kN	500 kN	0,73 m/min	25,7 kG/m <sup>2</sup>	7 / 10	Płuczka z otworu
Szczecin 2	1720 kN	560 kN	423 kN	2,90 m/min	27,2 kG/m <sup>2</sup>	8 / 10	Płuczka z otworu
Szczecin 4	1720 kN	630 kN	418 kN	2,37 m/min	22,7 kG/m <sup>2</sup>	9 / 10	Płuczka z otworu
Szczecin 6	1720 kN	760 kN	553 kN	2,30 m/min	27,6 kG/m <sup>2</sup>	6 / 10	Płuczka z otworu
Hamburg 1	826 kN	700 kN	417 kN	2,85 m/min	32,8 kG/m <sup>2</sup>	7 / 10	Woda
Hamburg 2	826 kN	300 kN	237 kN	2,58 m/min	23,8 kG/m <sup>2</sup>	9 / 10	Woda
Toruń	333 kN	250 kN	219 kN	2,21 m/min	24,4 kG/m <sup>2</sup>	8 / 10	Woda

Przy określaniu dopuszczalnej siły instalacyjnej założono, że dopuszczalne naprężenie rozciągające jest rozłożone pomiędzy siłę osiową i siły potrzebne na pokonywanie zakrzywionych odcinków otworu (moment zginający).

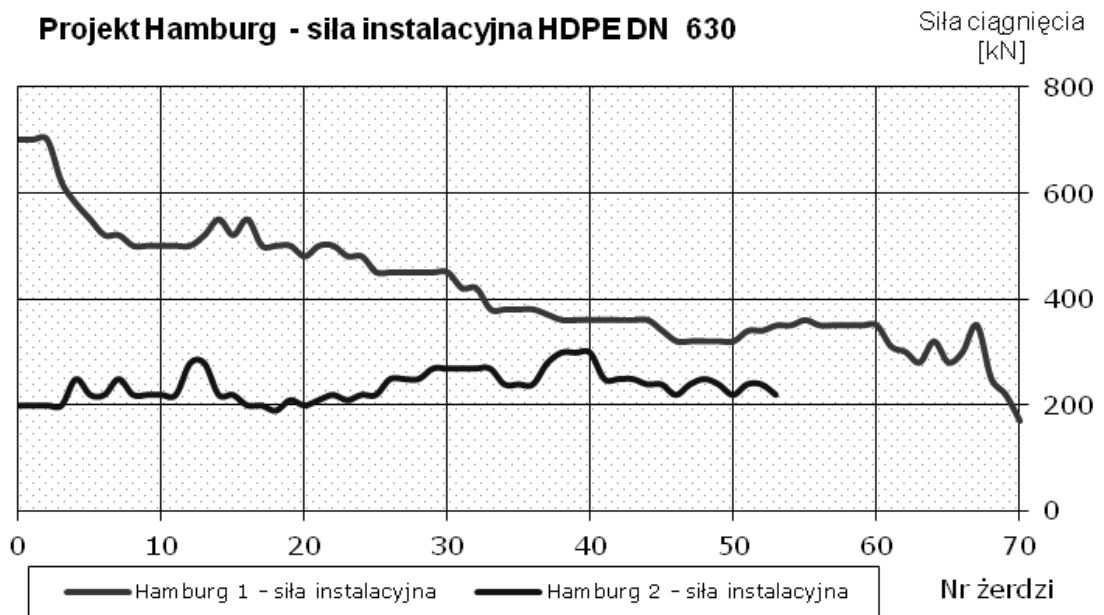
Rys. 2 Wykresy dotyczące sił instalacyjnych zarejestrowane podczas rzeczywistych projektów realizowanych dla zabudowy rur z polietylenu.

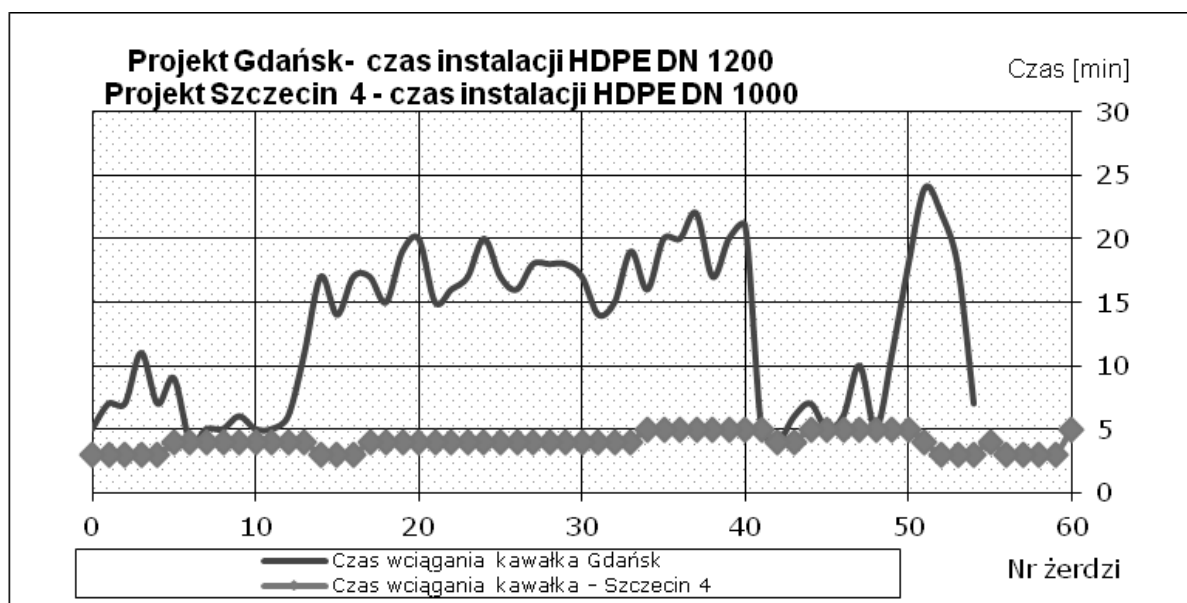
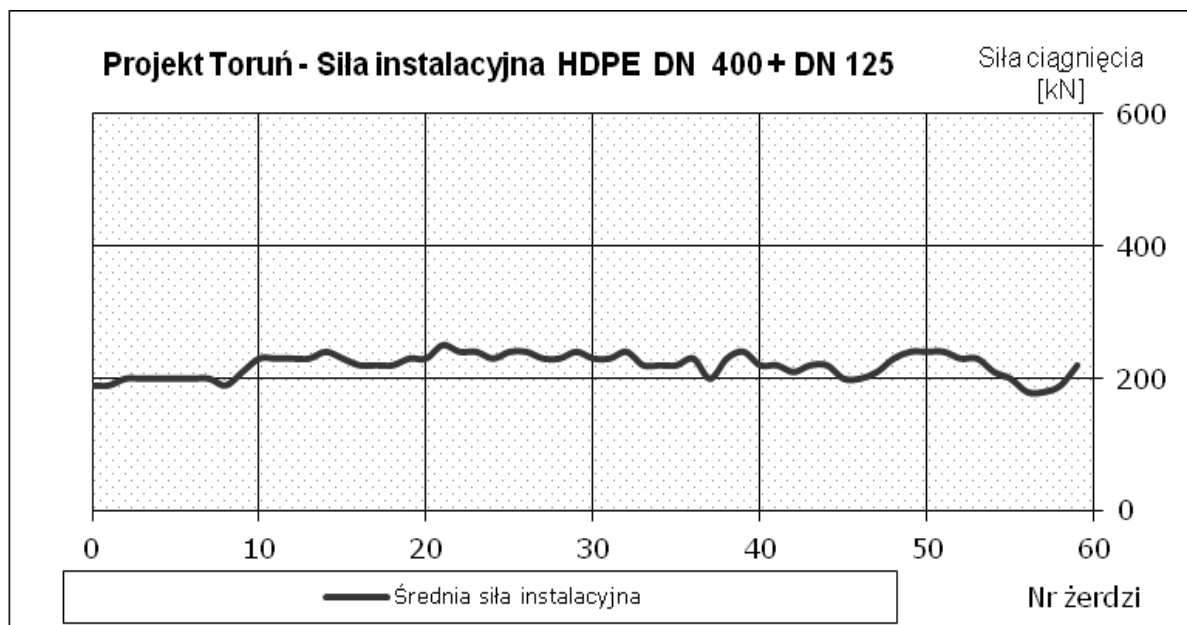


### Projekt Szczecin - Siła instalacyjna HDPE DN 1000



### Projekt Hamburg - siła instalacyjna HDPE DN 630





### Przegląd instalacji HDD z użyciem polietylenu w Polsce i na świecie

Projekty wiertnicze często okazują się bardzo złożone i wymagają znajomości zagadnień interdyscyplinarnych, gdzie nieodzowna jest poparta doświadczeniem wiedza inżynierska. Najbardziej spektakularne instalacje są realizowane przez w pełni profesjonalne spółki o długoletnim doświadczeniu przy prowadzeniu tego typu projektów.

W tabelach przedstawiono wybrane projekty zrealizowane do 2011 roku.

Tab. 7 Wybrane projekty HDD zrealizowane z użyciem rur polietylenowych w Polsce

Rok	Firma wiertnicza	Lokalizacja	Projekt	Długość	Rurociąg	Geologia	Urządzenie wiertnicze	Aplikacja
1996	LMR Drilling (Niemcy)	Tczew	Wisła	1230 m w dwóch sekcjach	160 mm	Piasek	1000 kN	Telekomunikacja
1997	Dalbis Bytom	Nowy Sącz	Dunajec	240 m	220 mm	Piaskowiec	700 kN	Telekomunikacja
1997	Beta Warszawa	Szczecin	Odra	515 m	315 mm	Piasek	400 kN	Energetyka
1997	K-Tel Terra Kostrzyn Wlkp.	Krosno Odrzańskie	Odra	300 m	125 mm	Piasek / glina	100 kN	Telekomunikacja
1998	Nawitel Wrocław	Kęty	Las	460 m	400 mm	Piasek, glina	220 kN	Wodociąg
1998	Ergotel Katowice	Opole	Odra	2 x 240 m	450 mm	Margiel	220 kN	Gazociąg
1999	Beta Warszawa	Żywiec	Soła	160 m	315 mm	Rumosz skalny	400 kN	Gazociąg
1999	Ergotel Katowice	Głucholazy	Biała Głucholaska	160 m	450 mm	Rumosz skalny	220 kN	Gazociąg
1999	ZWSE Kraków	Kraków	Wisła	130 m	3 x 160 mm	Piasek, glina	100 kN	Energetyka
1999	Telbial Biała Podlaska	Opole	Kanał Ulgi	250 m	560 mm	Piasek, margiel	320 kN	Kanalizacja
2000	Telbial Biała Podlaska	Gdańsk	Wisła	530 m	280 mm	Piasek	320 kN	Wodociąg
2000	Beta Warszawa	Sandomierz	Wisła	835 m	180 mm	Piasek, ił	400 kN	Telekomunikacja
2000	Beta Warszawa LMR Drilling	Gdańsk	Martwa Wisła	530 m	1.200 mm	Piasek	400 kN 1300 kN	Kanalizacja
2000	Hoster Rumia	Bydgoszcz	Rzeka	550 m	200 mm	Piasek, glina	160 kN	Telekomunikacja
2001	TKC Kros Poznań	Grudziądz	Wisła	660 m	225 mm	Piasek	450 kN	Telekomunikacja
2001	Agat Koluźki	Ostrowsko	Warta	570 m	315 mm	Piasek, glina	320 kN	Telekomunikacja
2001	Agat Koluźki	Koluźki	Las	550 m	200 mm	Piasek	320 kN	Telekomunikacja
2002	Nawitel Wrocław	Wrocław	Miasto	115 m	630 mm	Piasek	220 kN	Wodociąg
2002	Nawitel	Opole	Odra	275 m	450	Piasek,	220 kN	Kanalizacja



	Wrocław				mm	margiel		
2002	TKC Kros Poznań	Zakroczym	Wisła	770 m	225 mm	Piasek, ił	450 kN	Telekomunikacja
2003	Telbial Biała Podlaska	Włocławek	Wisła	628 m	180 mm	Piasek, ił	320 kN	Kable
2003	Beta Warszawa	Toruń	Wisła	2 x 550 m	400 mm	Piasek	400 kN	Wodociąg
2004	Nawitel Wrocław	Wrocław	Odra	2 x 630 m	355 mm	Piasek, głina	450 kN	Kanalizacja
2006	ZRI Chrobok	Rybnik	Droga	150 m	560 mm	Głina, rumosz	220 kN	Kanalizacja
2006 - 2008	Hydrobudowa 9 Poznań LMR Drilling	Szczecin	Odra Miasto	8 x 360 – 630 m	1030 mm	Piasek	400 kN 2500 kN	Kanalizacja
2007	Albrehta Biała Podlaska	Włocławek	Wisła	850 m	180 mm	Piasek, ił	2500 kN	Kanalizacja
2008	Telprojm ont Sępólno Krajeńskie	Kraków	Miasto	2 x 110 m	315 mm	Wapień	130 kN	Wodociąg
2008	Hydrobudowa 9	Ostaszewo	Wisła	700 m	160 mm	Piasek	400 kN	Telekomunikacja
2008	Nawitel Wrocław	Opole	Odra	237 m	800 mm	Piasek, ił, margiel	450 kN	Kanalizacja
2008	Albrehta Biała Podlaska	Świnoujście	Świna	918 m	400 mm	Piasek	2.500 kN	Energetyka
2008	Fobud Wrocław	Wrocław	Odra	538 m	160 mm	Piasek, głina	160 kN	Telekomunikacja
2008	Textel Wejherowo	Wolin	Dźwina	333 m	160 mm	Piasek	140 kN	Kable
2008	Telprojm ont Sępólno Krajeńskie	Leszno	Park	340 m	280 mm		120 kN	Wodociąg
2009	Nawitel Wrocław	Głogów	Odra	828 m	160 mm	Piasek	450 kN	Kable dla gazociągu
2009	ZRB Janicki Gierałtówice	Mysłowice	Miasto	360 m	315 mm		180 kN	Kanalizacja
2009	Wafro Brzozów	Lesko	San	220 m	225 mm	Podłoże skalne	160 kN	Kanalizacja
2009	Nawitel Wrocław	Pińczów	Natura 2000	783 m	160 mm	Piasek, rumosz skalny	350 kN	Kable dla gazociągu
2009	Agat Koluszki	Nowy Dwór	Narew	370 m	250 mm		320 kN	Energetyka

		Mazowiecki						
2009	ZRI Bojszowy Hydrobudowa 9	Wrocław	Odra	273 m 260 m	800 mm	Piasek, glina	400 kN	Kanalizacja
2009	PPI Bojszowy Nowe	Mysłowice	Miasto	310 m	315 mm		220 kN	
2009	ZRI Bojszowy Nowe	Żywiec	Tresna	462 m	355 mm		360 kN	Wodociąg
2010	Nawitel Wrocław	Warszawa	Wisła	540 m	4 x 180 mm 1 x 100	Gлина	460 kN	Energetyka
2010	Albrehta Biała Podlaska	Cieszyn	Olza	544 m	710 mm	Podłoże skalne	2.500 kN	Rura osłonowa dla gazociągu
2010	Hoster Rumia	Mikołajki	Miasto	446 m	160 mm		160 kN	Wodociąg
2010	Telprojmont Sępólno Krajeńskie	Grudziądz	Rzeka Osa	320 m	225 mm		120 kN	Wodociąg
2010	Van den Berg Boringen Strzelce	Nowa Wieś	Rzeka Zagożdżonka	2 x 250 m	225 mm		360 kN	Wodociąg
2010	Van den Berg Boringen Strzelce	Zarzecze	San	245 m	315 mm		160 kN	Kable
2010	PIB Żala Rekowo	Jojkowo		205 m	125 mm		100 kN	Kanalizacja
2010	ZRB Janicki	Częstochowa	Miasto	115 m	630 mm	Wapień	160 kN	Kanalizacja
2011	Hydrobudowa 9	Poznań	Warta Miasto	2 x 460 m 2 x 400 m	800 mm	Piasek, glina, rumosz	400 kN 2.500 kN	Kanalizacja

Tab. 8. Wybrane projekty HDD zrealizowane z użycie rur polietylenowych i PVC na świecie

Rok	Firma wiertnicza	Lokalizacja	Projekt	Długość	Rurociąg	Geologia	Urządzenie wiertnicze	Aplikacja
2007	AJ Lucas Australia	Sydney, Australia	Medlow Bath Sewer	2400 m	HDPE 500 mm HDPE 250 mm	Piaskowiec	4500 kN	Kanalizacja
2009	Mears Group USA	Beaufort, Karolina USA	Archers Creek	1950 m	PVC 400 mm	ł, pasek, żwir	2280 kN	Kanalizacja
2003	AJ Lucas Australia	Sydney, Australia	Illawara	1920 m	HDPE 710 mm	Piaskowiec		Kanalizacja
2003	AJ Lucas Australia	Sydney, Australia	Chastwo od Sewer	1810 m	HDPE 630 mm	Piaskowiec		Kanalizacja grawitacyjna
2010	Mears Group USA	New Jersey, USA		1635 m	PVC 610 mm		4000 kN	Wodociąg
2007	Mears Group USA	Południowa Karolina, USA	Rzeka Beaufort	1560 m	PVC 250 mm	Piasek, wapień		Wodociąg
2005 2006	Laney Directional Drilling, USA	Hawaje, USA	Pearl Harbor	1531 m	HDPE 711 mm		4000 kN	Energetyka
2008	Utility Services Authority	Teksas	Crude Expansion Project	1530 m	HDPE 1050 mm			
2009	King Contracting USA	Południowa Dakota, USA	Rzeka Wakpala	1463 m	PVC 610 mm	Łupek ilasty	2850 kN	Wodociąg
2010	UEA Australia	Sydney, Australia	Park Brightmore	1403 m	HDPE 500 mm	Piaskowiec	1500 kN	Kanalizacja grawitacyjna
2000	LMR UK	Plymouth, Wielka Brytania	Rzeka Tamar	1365 m	HDPE 560 mm	Skala	2500 kN	Kanalizacja
2009	Direct Horizontal Drilling, Kanada	Fort Murray, Kanada	Rzeka Athabaska	1350 m	HDPE 900 mm	Wapień	2000 kN	Kanalizacja
2010	LMR Drilling, Niemcy	Morze Północne, Niemcy	Morska farma wiatrowa	1243 m 1232 m 1229 m	HDPE 300 mm	Piasek	2500 kN	Energetyka
2009	Coe Drilling Australia	Nowa Południowa Walia, Australia	Rzeka Clarence	1230 m	HDPE 250 mm		1500 kN	Kanalizacja
2008	DrillTec Gut,	ZEA	Water Supply to	1200 m	HDPE 250			Kable

	Niemcy		Saadiyat Island		mm			
2011	LMR Drilling, Niemcy	Morze Północne, Niemcy	Morska farma wiatrowa DolWin1, Hilgenriedersiel	1155 m 1150 m Landfall	HDPE 450 mm	Piasek		Energetyka
2006	LMR Drilling, Niemcy	Niemcy	Heidkruger Bäke	1028 m	HDPE 500 mm	Piasek		Kanalizacja
2010	Smythe Contractors, Nowa Zelandia	North Shore City, Nowa Zelandia	Birkdale	950 m	HDPE 550 mm	Piaskowiec	2000 kN	Kanalizacja
2007	DrillTec Gut Niemcy	Cartagena, Hiszpania	Landfall	890 m	HDPE 1000 mm			System wodny
2011	UAE Australia	Nowa Południowa Walia, Australia	Mardi – Mangrove		HDPE 1200 mm	Piaskowiec	1500 kN	Wodociąg
2006	LMR UK	Waterford, Irlandia	Rzeka Suir	2 x 800 m	HDPE 800 mm	Skala	2500 kN	System drenażowy
2009	Mears Group USA	Północna Karolina USA	Rzeka Cape Fear	736 m	HDPE 973 mm			Wodociąg
2002	DrillTec Gut Niemcy	Egipt	Kanał Sueski	680 m	HDPE 710 m			
2009	Frontier Pipeline USA	Connecticut, USA	Zatoka New Haven	580 m	HDPE 1220 mm	Skala	4000 kN	Kanalizacja
2008	DrillTec Gut Niemcy	Barcelona, Hiszpania	Rzeka Llobregat	2 x 482 m	HDPE 1400 mm			Stacja odsalania wody
2008	NSCC, ZEA	Dubai, ZEA	Dewatering Pipeline at Village Centre	450 m	HDPE 1000 mm			Kanalizacja
2004	Laney Directional Drilling USA	Indio, Kalifornia USA	Indio	440 m	HDPE 1370 mm			Instalacja wielofunkcyjna
1999	Beta Warszawa	Decin, Czechy	Rzeka Łaba	6 x 200–250 m	HDPE 630 mm	Margiel	400 kN	Kanalizacja

## Obserwowane tendencje technologiczne

Wśród najistotniejszych innowacji technologicznych jakie mogą wpłynąć korzystnie na rozwój technologii i pokonywanie kolejnych barier można wymienić:

- stały rozwój w systemach nawigacji i kontroli trajektorii otworu
- upowszechnienie technologii Intersect (Meeting In The Middle)
- wykorzystanie żyrokompasów do wiercenia w obszarach o silnych zakłóceniach magnetycznych i w terenach niedostępnych
- monitoring ciśnień wgłębnych w czasie rzeczywistym
- monitoring rzeczywistych sił instalacyjnych przez wgłębne moduły pomiarowe
- bardziej stabilne systemy płuczkowe
- modelowanie zachowania się fazy stałej w płuczce wiertniczej
- większe dostępne systemy płuczkowe (pompy, układy separacji faz)
- lepsza jakość narzędzi i elementów przewodu wiertniczego
- lepsza jakość zewnętrznych powłok rurociągów odpornych na zarysowania i naciski punktowe
- precyzyjniejsze raporty geotechniczne uwzględniające specyfikę technologii

Technologia Intersect polegająca na jednoczesnym wierceniu dwóch otworów, których trajektorie przecinają się w wyznaczonym miejscu pod powierzchnią terenu pozwala myśleć realnie o instalacjach na dystansie 5000 m. Od kilku lat na rynku pojawiła się też możliwość aplikacji naftowej technologii RSS (Rotary Steerable System). Firmy Schlumberger oraz Baker Hughes Inteq zaoferowały technikę alternatywną do wiercenia z użyciem popularnych narzędzi, jakimi są silniki wgłębne.

Systemy typu RSS są zaprojektowane do wiercenia kierunkowego przy założeniu ciągłej rotacji przewodu wiertniczego, eliminującej konieczność występowania trybu wiercenia orientowanego. Zalet wspomnianej technologii jest wiele.

Ciągłe obroty przewodu wiertniczego pozwalają usprawnić transport zwiercin w otworze pilotowym oraz zmniejszyć wymagane siły osiowe do prowadzenia wiercenia kierunkowego. Dodatkowym zyskiem płynącym z aplikacji technologii jest ograniczenie efektu spiralnego otworu oraz zmniejszenie amplitudy lokalnych krzywizn w otworze. Najbliższe lata powinny przynieść wzrost praktycznych aplikacji RSS w długich otworach horyzontalnych wierconych w formacjach zwięzłych.

Do powyższych uwag należy dołożyć konieczność poprawy wykształcenia załóg i inżynierów prowadzących projekty, a także co niezwykle istotne należy dążyć do zwiększenia kompetencji i znajomości technologii wśród projektantów i inwestorów decydujących się na wykorzystanie techniki HDD w swoich inwestycjach.

## **Informacje o autorze:**

**Robert Osikowicz** – absolwent Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Od 1991 r. zajmuje się technologią wiercenia i praktycznymi aplikacjami płynów wiertniczych w otworach pionowych i kierunkowych różnego przeznaczenia. Ma za sobą pracę w spółkach naftowych i firmach zajmujących się doradztwem w obszarze wiertnictwa i technik pokrewnych.. Od 2009 r. pracuje dla firmy Robert Osikowicz Engineering. Publikuje na łamach magazynów: Inżynieria Bezwykopowa i Geoinżynieria – drogi, tunele, mosty.

## **Literatura:**

Ariaratnam Samuel – Evaluation of the Annular Space Region in the Horizontal Drilling Installation – Arizona State University 2001.

Colwell Donald, Ariaratnam Samuel – Applied Strain Effects and Loads on HDPE Pipes During HDD Installation – North American Society for Trenchless Technology

Engineering Properties of Polyethylene – Plastics Pipe Institute

Knight Mark, Duyvestyn Mark – Horizontal Directional Drilling Loads on Polyethylene Pipes – No-Dig 2002 Montreal

Lasheen, Polak A.M. – Predicting the Behavior of HDPE Pipes in Horizontal Directional Drilling – University of Waterloo 2001

Materiały DCA-Europe Drilling Contractors Association

Osikowicz Robert, Paweł Kośmider – Przegląd rynku HDD 2008 Inżynieria Bezwykopowa 1/2008

Osikowicz Robert – Przegląd rynku HDD 2011 Inżynieria Bezwykopowa 1/2011

Osikowicz Robert – Czynniki technologiczne limitujące długość instalacji metodą HDD – referat wygłoszony na konferencji Inżynieria Bezwykopowa w Tomaszowicach, czerwiec 2008

Polak Anna Maria - Field Tests on HDPE Pipes Installed Using Horizontal Directional Drilling – American Society for Civil Engineers 2001

Polyethylene Pipe for Horizontal Directional Drilling – Plastics Pipe Institute 2001

Raporty wiertnicze firm LMR Drilling i materiały własne autora.

## **Źródło fotografii**

Zdjęcia użyte do zilustrowania artykułu pochodzą z projektu wiertniczego w Szczecinie. Autorzy zdjęć: Mirosław Makuch oraz portal inzynieria.com