

Fot. AJ Lucas Group Limited

# Przewierty przyszłości?!

Praktyczne możliwości wykonania bardzo długich instalacji HDD pod terenami niebezpiecznymi – 5 km, 10 km?

Fot. 1. Kanał Illawarra, Wollongong NSW, Australia (obraz przybliżonej trasy przewiertu)

Celem artykułu jest upowszechnienie „nowego myślenia” na temat sposobów bezpiecznego przekraczania rurociągami przeszkód terenowych oraz promocja współpracy pomiędzy projektantami rurociągów i wykonawcami robót.

Propagowane w tej pracy „nowe myślenie” to perspektywa stosowania bardzo długich kierunkowych przewiertów horyzontalnych (HDD) w celu sprostania wyzwaniom wynikającym z geozagrożeń i ograniczeń środowiskowych. W kategoriach bezpieczeństwa i zminimalizowania wpływu na środowisko przewierty na dużych głębokościach metodą HDD wydają się oczywistym rozwiązaniem w przypadku takich geozagrożeń, jak: osuwiska, erozja gleby, kras, rzeki meandrujące, kwaśne gleby, usypiska rumoszowe, podmokłe zbocza i urwiste skarpy.

Zadaniem tego artykułu jest również uświadomienie projektantom rurociągów, specjalistom w dziedzinie geoinżynierii i ochrony środowiska, a także inwestorom, że HDD to nie „czarna magia” i że inżynierię wiertniczą można i da się stosować w celu zmniejszenia do minimum oddziaływania na rurociągi ze strony większości geozagrożeń.

## Geozagrożenia, HDD i ryzyko

„Geozagrożenia” to szerokie pojęcie, obejmujące wszelkie geoproceny mogące spowodować straty czy szkody dla społeczeństwa lub środowiska. Autorzy artykułu skoncentrowali się na geoprocenach o potencjale mogącym spowodować straty czy uszkodzenia rurociągów, jak również szkody dla środowiska, wynikające z uszkodzenia rurociągów bądź z samej ich budowy.

Mitygacja ryzyka polega na złagodzeniu możliwych skutków zagrożeń. W tym kontekście mitygację ryzyka postrzegać można jako proces, który pozwala ograniczyć do minimum niewiadome występujące w potencjalnie niebezpiecznych sytuacjach, przy jednoczesnym maksymalnym zwiększeniu poziomu bezpieczeństwa dla rurociągów, środowiska i ludności.

Biuro Koordynatora ONZ ds. Udzielania Pomocy Nadzwyczajnej (UNDRO) opracowało w roku 1979 poniższy model pseudomatematyczny do oceny ryzyka i pomiaru mitygacji:  $Ryzyko \text{ (całkowite)} = \text{Zagrożenie naturalne} \times \text{Elementy zagrożone} \times \text{Wrażliwość}$ .

Zastosowanie metody HDD do przejścia pod niebezpiecznymi lub trudnymi terenami i przeszkodami znacznie redukuje „elementy zagrożone” i „wrażliwość” rurociągu, a tym samym „ryzyko (całkowite)”. Na rynku dostępne są narzędzia matematyczne i narzędzia oceny ryzyka, umożliwiające opracowanie szczegółowych analiz.

Przy sporządzaniu takich analiz zalety metody HDD do przechodzenia pod naturalnymi przeszkodami wydają się oczywiste. Na przykład:

- wpływ HDD na środowisko (przy właściwym zaprojektowaniu) jest niemal równy zeru,
- można skrócić całkowitą długość trasy rurociągów poprzez wyeliminowanie zmian kierunku,
- rurociągi można bezpiecznie układać na dużej głębokości pod przeszkodami w stosunku do metod konwencjonalnych,
- dzięki ułożeniu na dużej głębokości rurociągi są mniej

**Andrew Lukas** – BE, dyrektor generalny, AJ Lucas Group Limited, Sydney, Australia  
**Stephen Loneragan** – BSc, dyrektor generalny, HDD, AJ Lucas Group Limited  
**Duncan Macdonald** – BSc Hons (Geologia), kierownik robót wiertniczych, AJ Lucas Group Limited

# Vermeer



Przedstawicielstwo w Polsce



Biuro Handlowe RUDA  
ul. Zegadłowicza 10  
40-555 Katowice

tel./fax (32) 251 25 53  
[www.bh-ruda.pl](http://www.bh-ruda.pl)



Wiertnice horyzontalne  
Żerdzie wiertnicze FIRESTICK I, II  
Narzędzia wiertnicze  
Główce do wiercenia w skałach  
Systemy mieszalnicze płuczki  
Przyrządy do sterowania i kontroli  
Kraking



narażone na manipulowanie przy nich, co zwiększa stopień bezpieczeństwa,

- uzbrojenie można układać piętrowo w gruncie, co pozwala ograniczyć do minimum wkraczanie na teren prywatny,
- trasa może przebiegać w terenach o gęstej infrastrukturze, takich jak drogi, bez wpływu na istniejące uzbrojenie czy ruch uliczny.

### Przykłady rozwiązań metodą HDD w przypadku przeszkód terenowych i geozagrożeń

Poniższe przykłady dotyczą sytuacji, w których metoda HDD pozwala wyeliminować lub złagodzić wpływ przeszkód terenowych i geozagrożeń lub odgrywa istotną rolę w ochronie środowiska. Obejmują one rozwiązania zastosowane w przypadku osuwisk, erozji gleby, krasu, rzek meandrujących, kwaśnych gleb siarczanowych, piarg, rumoszu skalnego, podmokłych zboczy i urwistych skarp.

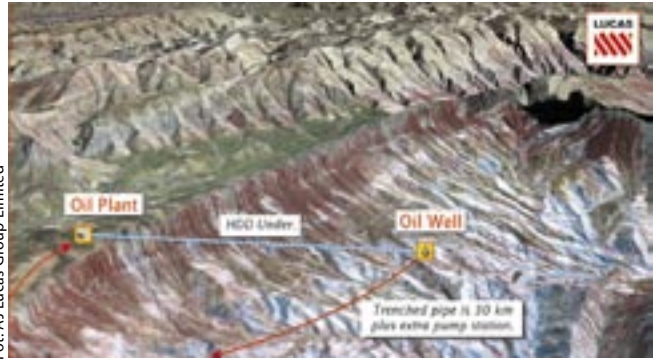
Fot. 2 przedstawia pasmo gór Zagros w Iranie. Petrofac projektuje i konstruuje tam instalację zbiorczą ropy naftowej. Szyb naftowy znajduje się w odległości zaledwie 4 km od instalacji stabilizacji ropy/gazu, ale jedyna możliwa trasa rurociągu w wykopie wymaga pokonania ok. 30 km trudnego terenu i wykonania dodatkowej przepompowni. Tym niezwykle istotnym wyzwaniem, wynikającym z warunków terenowych, można sprostać, stosując metodę HDD, pozwalającą na wykonanie przewiertu pod pasmem górskim na głębokości ok. 3 km. Oznaczać to będzie znaczne oszczędności i znacznie mniejszy wpływ na środowisko i otoczenie.

Fot. 3 przedstawia Chatswood, na przedmieściach Sydney. Projekt wynikający z warunków terenowych i geozagrożeń przewidywał montaż grawitacyjnego kanału ściekowego o długości ok. 1800 m, bez zakłóceń dla ruchliwej ulicy Victoria Avenue i bez wpływu na operacje handlowe satelickiego centrum miasta. Efektem jest najdłuższy na świecie kanał grawitacyjny wykonany metodą HDD. Istotne tutaj ze względu na służebność było poprowadzenie rurociągu wzdłuż istniejącej drogi.

Lotnicza fot. 1 przedstawia miasto Wollongong, położone na południe od Sydney. Wyzwaniem wynikającym z warunków terenowych i geozagrożeń był montaż ciśnieniowego kolektora ściekowego o średnicy 700 mm pod terenem mieszkalnymi i centrum miejskim Wollongong. Podobnie jak w projekcie z Chatswood, można było poprowadzić trasę wzdłuż drogi i przez teren publiczny, a nie pod terenem prywatnym.

Fot. 4 przedstawia wybrzeże południowej Victorii, nieskazitelny teren zdominowany przez słynne skały Dwunastu Apostołów. Problemem wynikającym z warunków terenowych i geozagrożeń było doprowadzenie rurociągu na ląd bez szkody dla skał krasowych czy przybrzeżnych hodowli małż. Osiągnięto to skutecznie dzięki metodzie HDD.

Fot. 5 przedstawia skarpę Sublime Point w Górach Błękitnych w pobliżu Sydney. Wyzwaniem wynikającym z warunków terenowych i geozagrożeń była budowa sieci infrastruktury podziemnej w tym regionie, zwłaszcza kanalizacji. Udało się temu sprostać poprzez budowę tunelu kanalizacyjnego pod terenem zabudowy i zastosowanie metody HDD w celu grawitacyjnego połączenia z tunelem kolektora osiedli oddalonych o 1200 m (jak dotąd). Konieczne było zastosowanie kilku instalacji HDD, żeby uniknąć kopania rowów w rejonie podmokłych zboczy



Fot. 2. System gromadzenia ropy Petrofac



Fot. 3. Budowa grawitacyjnego kanału ściekowego wykonana metodą HDD, Chatswood (obraz przybliżonej trasy przewiertu)



Fot. 4. Dwunastu Apostołów, Victoria, Australia



Fot. 5. Skarpa Sublime Point, NSW, Australia

i zwierciadeł wody zawieszonych (a tym samym ich osuszenia). Dzięki ułożeniu rurociągu głęboko pod terenem ich występowania udało się je ocalić w formie pierwotnej.

Fot. 6 przedstawia rysunki Aborygenów w Tumbledown Dick w pobliżu Syd-



Fot. 6. Rysunki Aborygenów w Tumbledown Dick

ney, które zablokowały trasę rurociągu gazu ziemnego na krętym odcinku wąskiej szosy biegnącej przez park narodowy. Zadaniem przewidywało wykonanie przewiertu na głębokości ponad 1000 m poniżej tego miejsca, co pozwoliło ominąć rysunki Aborygenów i kręty odcinek wijącej się drogi. Geozagrożenie, którego udało się tu uniknąć, stanowił rumosz skalny (piarg/usypisko) u podnóża wąskiej skarpy sąsiadującej z wąskim korytarzem drogi.

Fot. 7 przedstawia dwa przewiertu w The Spit, Sydney. Wyzwaniem wynikającym z warunków terenowych było zachowanie nieskazitelnego środowiska naturalnego, natomiast geozagrożenie pojawiło się przy omijaniu ruchomych piasków. Udało się to zrealizować dzięki metodzie HDD.

Fot. 8 pokazuje wrażliwą ekologicznie, pomimo istniejących autostrad, lokalizację w pobliżu portu lotniczego w Sydney. Jest to ostatnia pozostałość podmokłych terenów Botany Wetlands, które stanowiły pierwotne źródło zaopatrzenia w wodę dla Sydney. Geozagrożeniem dla tego rurociągu tłoczącego etan było przekroczenie terenu podmokłego bez szkody dla 113 miejscowych gatunków roślin naczyniowych i bez żadnego wpływu na autostradę.

Na fot. 9 i rys. 1 obserwujemy głęboki wąwóz w Papui-Nowej Gwinei, przez który należy przeprowadzić rurociąg ropy naftowej. Możliwe opcje to most wiszący albo przewiert metodą HDD na dużej głębokości. Most wiszący wiąże się z poważnymi kwestiami w zakresie bezpieczeństwa, dotyczącymi sabotażu i oddziaływania na środowisko, dlatego też przekroczenie należy wykonać metodą przewiertu. Problemem jest ukształtowanie terenu – wąwóz jest na głębokości 400 m i ma szerokość 500 m. Wyzwanie geologiczne stanowią skały krasowe z nieregularnie występującą skałą wapienną, z erozyjnymi szczelinami, zagłębieniami, podziemnymi strumieniami i kawernami. Wiercenie będzie wykonane prawdopodobnie bez możliwości utrzymania prawidłowej cyrkulacji w otworze.

Fot. 10 przedstawia przewiert metodą HDD pod osuwiskiem na Sri Lance. W przypadku większości osuwisk można określić średnicę poprzez badanie gleby. Rurociąg można ułożyć pod tym osuwiskiem. Metodę HDD można także zastosować do drenażu powierzchni styku różnych stref, zwiększając w ten sposób kąt tarcia wewnętrznego materiałów i jednocześnie zmniejszając prawdopodobieństwo wystąpienia osuwisk.

Na fot. 11 przedstawiono bagna namorzynowe w Salt Pan Creek w Sydney. Zawodniona warstwa gleby estuaryjnej zawiera siarczki żelaza. Woda zapobiega reagowaniu zawartego w powietrzu tlenu z siarczkami żelaza. Wykopanie w glebie rowów wystawia ją na działanie tlenu z powietrza, co powoduje utlenianie do kwasu siarkowego. Gleba może samoistnie zneutralizować część kwasu siarkowego, ale jego pozostałości przemieszczają się w glebie, powodując zakwaszanie wody glebowej i gruntowej, a nawet wód powierzchniowych. Konsekwencją jest śnięcie ryb i pewne typy zakwitów glonów. Dzięki zastosowaniu metody HDD rurociąg ułożono głęboko poniżej warstw zawierających siarczki żelaza.

Inne projekty HDD dotyczące geozagrożeń obejmują:

- obszar przybrzeżny w Hanzghou Bay w Chinach, w którym przewidziano ułożenie rurociągu ropy o średnicy 914 mm. Fale przyływu osiągają wysokość 8 m, a prądy pływowe szybkość 15 km/h. Luźny grunt sprawia, że rowy bardzo szybko ponownie się wypełniają, zanim zdąży się w nich ułożyć rurociągi. Dzięki metodzie HDD udało się sprostać tym geozagrożeniom, układając rurociąg



Fot. 7. The Spit, Sydney



Fot. 8. Botany Wetlands, Sydney

głęboko poniżej tego obszaru i wyprowadzając 1800 m dalej w głębszej wodzie, gdzie prądy oraz oddziaływanie przyływów na podmorski sprzęt do montażu rur są mniej widoczne;

- rurociąg o długości 8 km, zaprojektowany pod ruchliwym portem azjatyckim; prądy są tam bardzo silne, a układane wcześniej w dnie basenu portowego rurociągi były zmywane nawet przy zabezpieczeniu ich narzutem skalnym. Trudne jest również wykonywanie wykopów w spągu granitowym, w sąsiedztwie hodowli delfina różowego i przy robotach załadunkowych jednego z najbardziej ruchliwych portów świata.

## Wykonywanie bardzo głębokich przewiertów metodą HDD

Nie ma powodu, dla którego przewiert metodą HDD nie mógłby być prowadzony na bardzo dużej głębokości, np. 1000 m poniżej trudnego terenu. Rurociąg prowadzony w przewiercie na głębokości 30 m jest równie niedostępny w celu naprawy, jak rurociąg na głębokości 1000 m. Przy obecnym poziomie naszej wiedzy w zakresie stali i powłok rur, ochrony katodowej, jak również wysokim poziomie technik prób rurociągów, nie ma powodów, dla których rurociągi miałyby w takim środowisku ulegać awarii.

### Otoczaki i żwir

Otoczaki i żwir to nemezis HDD. Jest tak dlatego, że metoda HDD wymaga dostępności nieobudowanego otworu w celu instalacji rury docelowej (w miękkim gruncie otwór ten może być faktycznie tylko strefą naruszonego gruntu, a nie rzeczywistym otworem, a strefa naruszonego gruntu pracuje). W przypadku luźnych otoczek i żwiru siła ciężkości zawsze powoduje wypełnienie przewiertu bez pozostawienia otworu, przez który można przeciągnąć narzędzie i rurę produktową.

Z pewnym powodzeniem stosowano ekrany żwirowe, zapobiegające zakleszczaniu urządzenia wiertniczego przez żwir i otoczki, ale jest to ryzykowne i w grę wchodzi jedynie krótkie odcinki.

Najlepszym rozwiązaniem w przypadku żwiru i otoczek jest wykonanie przecisku rurą okładzinową, jak najszybsze przedostanie się poniżej ich poziomu i umieszczenie większej części rurociągu w skale lub innym materiale związłym, pod żwirem/otoczkami. Młot udarowy do przeciskania rury okładzinowej musi być młotem wiertniczym, który posuwając się w dół, jednocześnie instaluje rurę okładzinową.

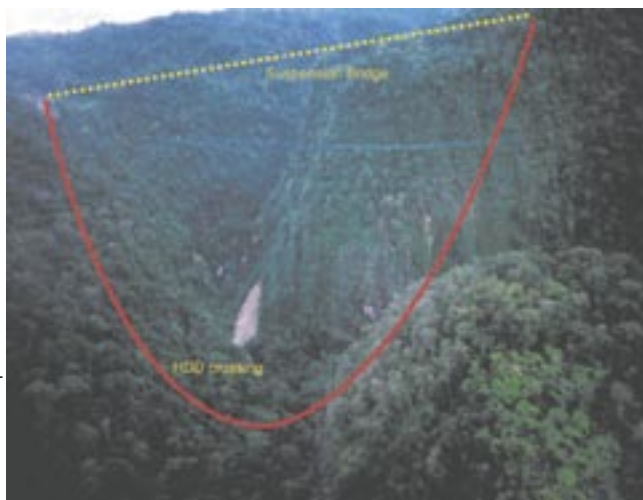
Przy zastosowaniu technik orientacji magnetycznej, np. Paratrack II TM, możliwe jest wiercenie otworu pilotowego z obu stron przewiertu i spotkanie się w środku, jak pokazano na załączonym rys. 2. W tej technice dobrym rozwiązaniem jest wykonanie przecisku rurą okładzinową po obu stronach rzeki/przeszkody, przy zastosowaniu wiertniczego młota kruszącego.

### Nowa koncepcja bardzo długich przewiertów metodą HDD

Z powyższych przykładów wynika, że w przypadku wielu geozagrożeń (z wyjątkiem aktywności wulkanicznej i sejsmicznej) rozwiązaniem może być ułożenie rurociągu na dużej głębokości pod przeszkodą, przy zastosowaniu metody HDD. Powstają pytania: Ile wynosi obecnie maksymalna długość przewiertów metodą HDD? Jak długo można kontrolować geozagrożenie, stosując metodę HDD?

Odpowiedź leży w połączeniu technologii pola naftowego i doświadczenia z tej dziedziny z doświadczeniem z zakresu HDD. Doświadczenie w zakresie odwiertów naftowych i gazowych dotyczy odległości w poziomie przekraczających 11000 m. Z tego względu, przy wykorzystaniu wiedzy z dziedziny wiertnictwa naftowego, możliwe jest wykonanie przewiertów znacznej długości metodą HDD. Załączony rys. 3 przedstawia doświadczenia koncernu British Petroleum z zakresu wierceń kierunkowych z długim odcinkiem poziomym.

Oprzysądowanie i techniki stosowane w HDD są bardzo



Fot. AJ Lucas Group Limited

Fot. 9. Proponowane przeprowadzenie ropociągu w Papui-Nowej Gwinei



Rys. 1. Proponowane przeprowadzenie ropociągu w Papui-Nowej Gwinei



Fot. AJ Lucas Group Limited

Fot. 10. Osuwisko na Sri Lance



Fot. AJ Lucas Group Limited

Fot. 11. Bagna namorzynowe w Salt Pan Creek, Sydney

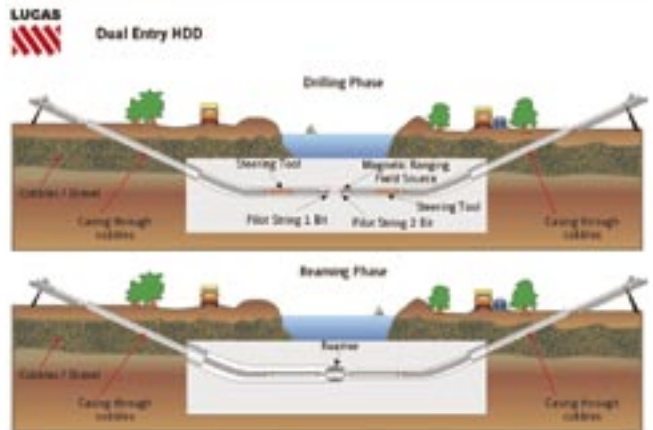
podobne do stosowanych w wiertnictwie naftowym i gazowym. Przewód wiertniczy i narzędzia są często identyczne, tak samo pompy płuczkowe i systemy oczyszczania cyrkulującego w otworze płynu. Chociaż urządzenia naftowe mają dużo większe rozmiary, to ich moment obrotowy i siła naporu/uciągu są podobne jak w wiertnicach HDD.

Np. J.H. Gammage i inni [2] oraz Mason [12] podają wymiary wiertnicy, wyposażenia i oprzyrządowania do wykonania otworów poziomych o długości 8 km dla koncernu BP na polu naftowym Wytch Farm. Moment obrotowy i siła uciągu są podobne, przy czym wiertnice HDD mają oczywiście dużo większą siłę naporu – niektóre mają moc znamionową naporu/uciągu 500 ton. Poza wymiarami fizycznymi wymaganymi do prowadzenia przewodów wiertniczych zbudowanych z trzech żerdzi o łącznej długości ok. 27-29 m (wiertnice HDD zazwyczaj wyposażone są w pojedyncze żerdzie o długości ok. 9,5 m), największa różnica pomiędzy tymi urządzeniami polega na prędkości, z jaką wiertnice naftowe obracają przewodem, np. 150 obr./min., podczas gdy duże wiertnice HDD są na ogół ograniczone do 40 obr./min. (w niektórych przypadkach 60 obr./min.). Tym samym moc efektywna wiertnic naftowych jest większa (moc jest funkcją prędkości i momentu obrotowego).

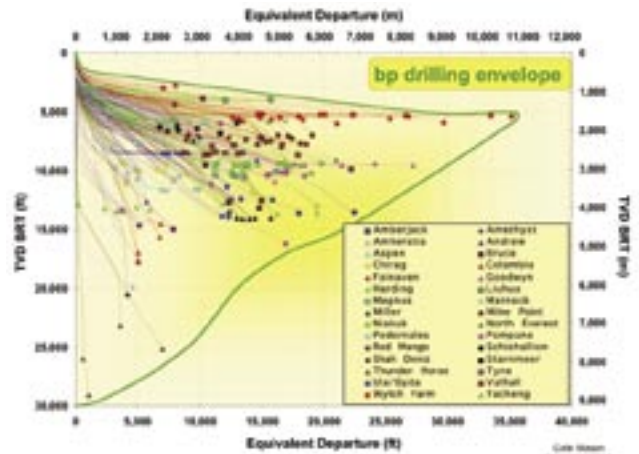
Jednakże ta mniejsza prędkość obrotowa wrzecion wiertnic HDD może być bez znaczenia (poza znaczeniem dla skuteczności oczyszczania otworu), ponieważ w poziomych otworach wiertniczych sens szybkiego obracania długiej kolumny przewodu jest wątpliwy, jako że drgania elementów zestawu wiertniczego przyczyniają się znacznie do zmęczenia przewodu i osłabienia tempa wiercenia. Wyższe szybkości ścierania występujące w wierceniu poziomym w twardej skale stanowią problem, podobnie jak drgania harmoniczne żerdzi przy wyższych obrotach. Z tego względu w metodzie HDD jest tendencja do tego, żeby wymaganą szybkość obrotową świdra uzyskać za pomocą głębinnych silników typu naporowego, przy utrzymaniu niższych obrotów samego przewodu. Moc hydrauliczna dostarczana jest do narzędzia przez płuczkę wprowadzającą w ruch obrotowy rotor silnika, a w konsekwencji narzędzie wiertnicze.

Wynika stąd, że przy podobnym oprzyrządowaniu i wydajności procesu, bardzo długie otwory wiertnicze HDD stanowią realną propozycję. Dlaczego więc nie ma przewiertów o takich długościach? Załączony rys. 4 przedstawia wykres zależności średnicy i długości dla najbardziej znaczących projektów na świecie. Wynika z niego, że w chwili obecnej najdłuższe przewiertory mają długość nieco ponad 2300 m. Przy długości otworu 2000 m instalowano rurociągi o średnicach do 914 mm (36"). W Rosji podobno udało się zastosować średnice 1320-1420 mm (52"-56") na dystansach powyżej 1000 m, ale trudno jest zdobyć bliższe szczegóły na ten temat.

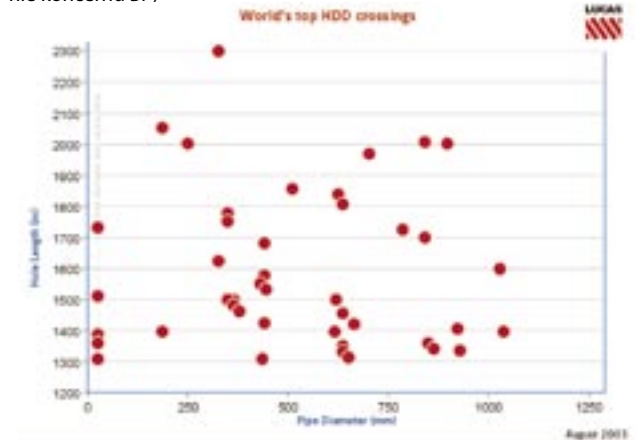
Przyczyną, dla której przewiertory metodą HDD są ograniczone zwykle do ok. 2300 m, jest brak kooperacji pomiędzy projektantami rurociągów i wykonawcami robót, specjalistami z zakresu geoinżynierii i ochrony środowiska oraz inwestorami. Problem stanowi częściowo syndrom transferu ryzyka stałej ceny ryczałtowej przy zawieraniu umów, który stał się pułapką dla samych inwestorów. Nie jest tak w przypadku wierceń naftowych, więc dlaczego ma tak być w przypadku otwierających nowe horyzonty projektów HDD?



Rys. 2. Przewiert realizowany przez dwa urządzenia wiertnicze przez sekcje kamienistą



Rys. 3. Kierunkowe otwory naftowe z długą sekcją poziomą (doświadczenie koncernu BP)



Rys. 4. Najdłuższe na świecie kierunkowe przewiertory horyzontalne HDD

### Czynniki ograniczające długość przewiertów metodą HDD

Kluczowe kwestie, z których wynikają ograniczenia dla długich przewiertów metodą HDD pod terenem przeszkód i geozagrożeń:

- wyobczenia przewodu wiertniczego w otworze,
- odkształcenie żerdzi pomiędzy wrzecionem urządzenia a powierzchnią terenu,
- moment obrotowy i tarcie przewodu w otworze,
- stabilność ściany otworu,
- efektywne czyszczenie otworu ze zwiercin,
- dokładność pomiarów w trakcie wiercenia kierunkowego,
- zredukowanie do minimum przyrostów kąta na jednostkę długości (większy promień krzywizny),
- gradient ciśnienia szczelinowania formacji,
- parametry urządzenia wiertniczego.

## Wyboczenie żerdzi wiertniczej

Przy wierceniu otworu pilotowego lub poszerzaniu otworu od strony wiertnicy (*forward reaming*), przewód wiertniczy ewidentnie podlega ścisaniu. Jeżeli wielkość ścisania mechanicznego nie przekracza obciążenia krytycznego dla wyboczenia, to żerdź wiertnicza pozostaje stabilna i uszkodzenie zmęczeniowe jest niewielkie lub nie występuje wcale.

Rozróżnia się dwa typy istotnych wyboczeń: wyboczenie sinusoidalne i wyboczenie helikalne. Zalecane jest unikanie ich obu, ale udowodniono, że wyboczenie sinusoidalne ma niewielkie znaczenie w przewiertach metodą HDD. Jedynie „zablokowanie” helikalne może przerwać proces wiercenia.

Niemniej jednak, w warunkach gruntu miękkiego, wyboczenie sinusoidalne jest często istotne, ponieważ siła boczna wywierana przez przewód na ścianę otworu może być tak duża, że formacja gruntowa nie zdoła jej się przeciwstawić, powodując niekontrolowane wyboczenie i pęknięcie rury. Wiercenie w gruncie miękkim zostanie omówione w dalszej części tej pracy.

Gotowe wzory na obliczanie wyboczenia sinusoidalnego i helikalnego w odwiertach prostych i pochyłych znajdują się w materiałach źródłowych dla niniejszej pracy [11] i [13]. Licencjonowane programy dla robót wiertniczych wykorzystują te i podobne wzory do tworzenia takich wykresów, jak pokazane na rys. 5 i 6.

Pomimo że wzory te są w zasadzie tradycyjne, to jednak wyznaczają granicę technicznych możliwości przy projektowaniu długich otworów kierunkowych.

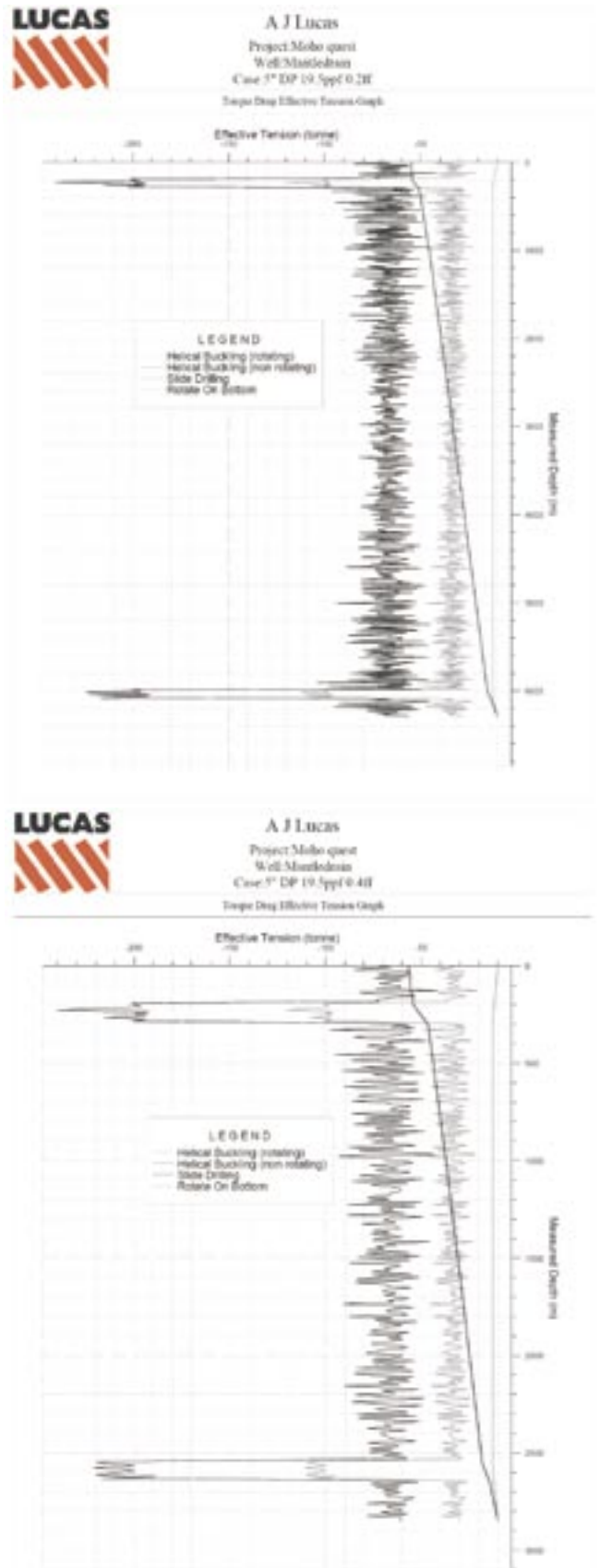
Znajdując się w otworze wiertniczym, żerdź jest ograniczona ścianą otworu. Kiedy jednak znajdzie się poza tym otworem, żerdź wiertnicza nie jest na ogół niczym ograniczona i tak oto najlepiej nawet opracowane projekty zrujnować może wyboczenie lub wyginanie się żerdzi na urządzeniu wiertniczym.

W projektowaniu długich przewiertów należy uwzględnić zachowanie żerdzi wiertniczych, żeby umożliwić wywieranie optymalnego nacisku na narzędzie wierzące.

## Moment obrotowy, opór na żerdzi wiertniczej i współczynnik oporu

Moment obrotowy i opór w trakcie przesuwania przewodu w otworze stanowią również istotne zagadnienie. Biorąc pod uwagę ilość koniecznych obliczeń, nie warto szacować przewidywanego momentu obrotowego i oporu dla przewiertu poziomego bez komputera. Dostępnych jest wiele programów komputerowych, z których większość bazuje na modelu Johhancsika i innych [9]. Metoda ta wymaga rozbicia trajektorii otworu na przedziały dyskretne, obliczenia siły rozciągania oraz siły normalnej i siły skręcania dla każdego przedziału, a następnie zsumowania naprężeń rozciągania, zginania i skręcania na całej długości otworu wiertniczego.

Jak wyjaśnił to T. Hill [14], programy do obliczania wymaganego momentu obrotowego i sił osiowych wykorzystują w swoich prognozach założony współczynnik tarcia, jak w powyższych obliczeniach. Po rozpoczęciu wiercenia programy te są kalibrowane w oparciu o rzeczywiste obciążenia, w celu stworzenia dokładnego modelu momentu obrotowego i oporu w warunkach rzeczywistych. Niemniej jednak moment obrotowy i opór wywołane są nie tylko przez tarcie, ale również odchylenie od osi otworu wiertniczego, akumulację zwiercin, pęcznienie formacji ilastych, przychwytywanie przewodu w wyniku ciśnienia różnicowego, skład i gęstość płuczki wiertniczej oraz inne przeszkody mechaniczne mające wpływ na ruch żerdzi wiertniczej.



Rys. 5., 6. Typowe kalkulacje obciążenia przewodu wiertniczego w trakcie procesu wiercenia. Rysunki przedstawiają znaczenie współczynnika tarcia, o wartości odpowiednio 0,2 i 0,4 dla tego samego projektu

Tym samym „współczynnik tarcia” można by rozpatrywać dokładniej jako „współczynnik oporu”, tj. współczynnik kompleksowy, uwzględniający wszystkie czynniki mające wpływ na moment obrotowy i siły osiowe.

Co więcej, współczynniki oporu dla ruchu obrotowego, ruchu osiowego i kombinacji ich obu będą często się różnić. Ponadto ze względu na mechaniczne zakłócenia ruchu żerdzi współczynniki te często się zmieniają wraz ze zmiennymi warunkami otworu. Również wielkość współczynnika oporu podlega wahaniom, zwłaszcza w ruchu osiowym. Jeszcze bardziej obliczenia komplikuje to, że w tym samym otworze może występować kilka współczynników tarcia, w znacznej mierze uzależnionych od „miejscowej” geometrii otworu.

Mason & Judzis [12] opisują „wiercenie prawie bez tarcia”, oparte na znacznie ulepszonej kompozycji płynu wiertniczego oraz nowym typie lżejszej rury płuczkowej. Opisują także ulepszone metody czyszczenia otworu i czynniki redukujące opór. Podane są współczynniki tarcia wiercenia otworu znacznie poniżej 0,2. Stanowią one 50% wartości współczynników tarcia stosowanych w metodzie HDD.

Na załączonych rys. 5 i 6 pokazano znaczenie wartości współczynników tarcia wykorzystywanych w obliczeniach dla proponowanego projektu. Przedstawiają one warunki obciążenia rury wiertniczej najpierw dla współczynnika o wartości 0,2, a następnie 0,4. Różnica jest pomiędzy teoretyczną maksymalną długością wiercenia 6300 m (12 600 m dla metody z wlotem obustronnym, pokazanej na rys. 2) w przypadku pierwszym a teoretyczną maksymalną długością wiercenia 2850 m (5 700 m dla metody z wlotem obustronnym, pokazanej na rys. 2) w przypadku drugim. Różnica jest dramatyczna.

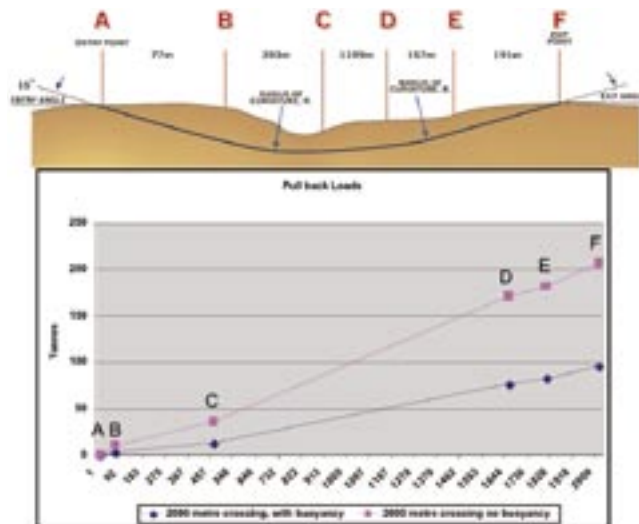
Rys. 5 pokazuje, że wykonanie otworów pilotowych o długości 10 km dla przewiertów metodą HDD jest możliwe i do zastosowania w praktyce. Nieujęta tutaj analiza wykazała, że otwór pilotowy można wywiercić, a następnie poszerzyć.

### Duża ilość skrzywień może wywołać duże obciążenia i awarię oprzyrządowania

Istotną rolę w minimalizowaniu sił występujących w czasie wiercenia i rozwiercania otworu odgrywa intensywność zmian kierunku (sumaryczne odchylenie od osi/długość). W czasie wiercenia otworu przez skałę techniką HDD powstają miejscowe skrzywienia (ostre zmiany kierunku), wywołane sekwencjami wiercenia/przesuwu/obrotu działania silnika płuczkowego i jego zakrzywionej części obudowy. Należy dążyć do minimalizacji sumarycznej wielkości tych skrzywień (krętości otworu wiertniczego), gdyż w przeciwnym wypadku w przewodzie wiertniczym i narzędziu powstają duże obciążenia boczne oraz moment obrotowy i siły oporu. W przypadku bardzo długich otworów istotne jest zredukowanie do minimum intensywności ostrych zmian kierunku, co pozwala zminimalizować obciążenia momentowe i oporowe zestawu wiertniczego, a także ich wpływ na rzeczywisty współczynnik tarcia i zużycie urządzeń wiertniczych.

Nieprostoliniowość otworu stanowi istotny problem przy wierceniu. Duża intensywność ostrych zmian kierunku (duża krętość) może prowadzić do:

- awarii przewodu wiertniczego, wywołanej zmęczeniem – API opublikowało metody określenia „bezpiecznych” zmian kierunku na podstawie ich intensywności wyrażonej w stopniach (kąta odchylenia od osi) – 100 stóp;
- nadmiernego zużycia rur płuczkowych w miejscach oddziaływania dużych sił bocznych na ścianę otworu (do-



Rys. 7. Oddziaływanie wyporu na obciążenia w trakcie instalacji rur w długich otworach

tyczy to zarówno zworników, jak i calizny rury);

- duże siły boczne powodują powstanie dużego momentu obrotowego, stanowiącego obciążenie dla przewodu i urządzenia wiertniczego;
- duże obciążenie boczne narzędzi do poszerzania powoduje uszkodzenia konstrukcyjne;
- duże obciążenia boczne poszerzacza prowadzą do jego szybkiego zużycia;
- duże obciążenia boczne narzędzi do rozwiercania powodują powstanie dużego momentu obrotowego na narzędziu, prowadzącej go rurze wiertniczej i urządzeniu wiertniczym;
- zakleszczenia głębokiego zestawu wiertniczego.

### Wprowadzanie rurociągu docelowego do bardzo długich przewiertów

Rura docelowa jest zazwyczaj wciągana, a nie wpychana do poszerzonego otworu, toteż kwestia wybożenia jej nie dotyczy. Oczywiście, znacznie większa jest również średnica, istotny jest także moduł inercji.

Ważne są następujące czynniki:

- grubość ścianki rury i łączne naprężenia,
- powłoka (izolacja) rury,
- parametry urządzenia wiertniczego,
- stopień oczyszczenia otworu w trakcie wciągania rury,
- siła wyporu i ciężar rzeczywisty,
- współczynnik oporu,
- parametry płynu wiertniczego.

Wytyczne AGA podane przez Johna Hair'a [7] stanowią doskonałą metodologię montażu rurociągów w otworach wiertniczych. Wytyczne podają współczynniki oporu i tarcia, na ogół klasyczne, toteż w większości wypadków można je złagodzić. Uwzględnione zostały również siły reakcji powstające na ścianie otworu przy wciąganiu rury przez odcinki zakrzywione otworu.

Najważniejszym parametrem jest ciężar rury. Oczywiście, obciążenie ciągnięcia (opór) jest funkcją rzeczywistego ciężaru pomnożonego przez współczynnik oporu. Im bardziej neutralny ciężar, tym niższa siła instalacji.

Kontrola wyporu jest kluczem do sukcesu przy wciąganiu rur w długich przewiertach metodą HDD. Oddziaływanie wyporu pokazuje rys. 7. Można to zmodyfikować poprzez regulację wyporu: dobór grubości ścianki rury, zastosowanie płaszcza betonowego czy rur HDPE (albo



stalowych) wypełnionych wodą, umieszczonych tymczasowo wewnątrz rury docelowej podczas procesu instalacji.

Rurociąg wraz z powłoką można zaprojektować na konkretne obciążenia ciągnięcia. Ograniczenia dotyczą urządzenia wiertniczego, jego zakotwienia, technologii płuczki wiertniczej i warunków gruntowych.

### Zagadnienie gruntu miękkiego i gruntu twardego

Przy projektowaniu długich przewiertów metodą HDD ważna jest świadomość istnienia znacznej różnicy pomiędzy przewiertem HDD w gruncie miękkim i w gruncie twardym. W gruncie twardym, takim jak skała lub bardzo twarda glina, można uzyskać stabilny otwór. Parametry wiercenia otworu pilotowego, poszerzania otworu i instalacji rury można przewidzieć z większą pewnością niż w przypadku przewiertu w gruncie miękkim.

Z wierceniem w gruncie miękkim (słabo zwiężłym) związane są następujące problemy:

- W celu utrzymania otwartego otworu potrzebna jest płuczka wiertnicza, którą trzeba kondycjonować, gdyż w przeciwnym razie może stracić swoje właściwości (często tylko przejściowo), powodując zapadnięcie się otworu i zablokowanie rury wiertniczej lub rury produktowej.
- Często trudniej jest usunąć zwierciny z otworu w gruncie miękkim, ponieważ istnieje możliwość nadmiernego, miejscowego powiększenia średnicy, spadku prędkości w przestrzeni pierścieniowej, utrudniające jego rzeczywiste oczyszczenie.
- Na przewodzie wiertniczym i rurze docelowej obserwowany jest znacznie większy opór hydrauliczny z powodu większej ilości zwiercin w płuczce wiertniczej.
- Duże siły tarcia generowanego przez przewód wiertniczy mogą spowodować jego wejście w ścianę otworu, zaklinowanie się, wycięcie większego otworu i wzrost sił oporu, potęgując tym samym omawiany problem.
- Wyboczenie rury wiertniczej w gruncie miękkim może stanowić istotny problem przy wierceniu pilotowym otworu lub poszerzaniu typu *forward reaming*. Obciążenia boczne wywierane przez rurę mogą przewyższyć wytrzymałość na ściskanie formacji gruntowej.
- W otworze w gruncie miękkim nie można zastosować wiercenia obrotowego stabilizowanego.
- W otworze w gruncie miękkim intensywność ostrych skrzywień jest na ogół większa.

Jakie są ograniczenia długości otworów w gruncie miękkim? Najdłuższy otwór w gruncie miękkim wykonany przez firmę Lucas wynosi 2000 m, dla rurociągu o średnicy 914 mm pod Hanzgzhou Bay w Chinach. Parametry wiercenia i obciążenia przy ciągnięciu wstecznym sugerowałyby możliwość osiągnięcia w takich warunkach długości przewiertu 3000, a nawet 4000 m. Dla przewiertów w gruncie miękkim jest to istotna kwestia.

### Wnioski

Metoda sterowanego przewiertu poziomego (HDD) w krótkim czasie przebyła długą drogę. Zaletą obecnej technologii jest to, że dzięki ułożeniu rurociągów głęboko pod przeszkodami nie tylko umożliwia ominięcie terenów niebezpiecznych i geozagrożeń, ale przyczynia się również do ochrony środowiska, co jest obecnie sprawą priorytetową.

Przy zastosowaniu sprawdzonych technik z dziedziny wiertnictwa naftowego można znacznie podwyższyć pułap praktycznej długości przewiertów metodą HDD. Przy dobrej technologii i w odpowiednich warunkach gruntowych możliwe jest wykonanie otworów o długości ponad 5, a nawet 10 km.

Przy dostępności odpowiednio zmodyfikowanych technik wiertniczych dla projektantów rurociągów przewiertu metodą HDD nie powinny być już dłużej „czarną magią”. Mają oni teraz doskonałą sposobność, by zapoznać się z „nowym myśleniem” i wykorzystać zalety sprawdzonej technologii sterowanego przewiertu poziomego do sprostania wyzwaniom terenów niebezpiecznych i geozagrożeń.

W przypadku długich „problemowych” przewiertów współpraca pomiędzy projektantami rurociągów a wykonawcami robót wymaga czegoś więcej niż tylko skonfrontowania wartości ryczałtowej kontraktu. Projektanci, wykonawcy, specjaliści z dziedziny geoinżynierii i ochrony środowiska oraz inwestorzy muszą ze sobą współpracować, badając granice roztaczających się przed nimi możliwości. ■

*Przedrukowano za zgodą AJ Lucas Group Limited. Sydney, Australia*

### LITERATURA:

- [1] Tony Meader, Frank Allen, Graham Riley To the Limit and Beyond - The Secret of World-Class Extended-Reach Drilling Performance at Wytch Farm IADC/SPE 59204.
- [2] J.H. Gammage, S.Modi, G.W. Klop Beyond 8 km Departure Wells: The Necessary Rig & Equipment SPE/IADC Paper 37600.
- [3] S.Modi, C.J.Mason, P.J. Tooms, G.Conran Meeting the 10 km Challenge. SPE paper 38583.
- [4] M.D.Green, C.R. Thomesen, L.Wolfson, P.A.Bern An Integrated Solution of Extended-Reach Drilling Problems in the Niakuk Field Alaska: Part II- Hydraulics, Cuttings Transport and PWD, SPE paper 56564.
- [5] D.A.Cocking, P.N.Bezant, P.J.Tooma Pushing the Envelope at Wytch Farm SPE/IADC Paper 37618.
- [6] M.A.Colebrook, S.R.Peach, F.M. Allen, G.Conran Application of Steerable Rotary Drilling Technology to Drill Extended Reach Wells IADC/SPE Paper 39327.
- [7] Hair, Capozzilli Installation of Pipelines by Horizontal Directional Drilling, An Engineering Design Guide, Contract No. PR-227-9424 prepared for the Offshore and Onshore Design Applications Supervisory Committee of the Pipeline Research Committee at the American Gas Association.
- [8] Lukas, A.J. Impact Of Tortuosity In Drilling And Reaming Of Long HDD Holes In Hard Rock. American Society of Civil Engineers Conference, Baltimore 2003.
- [9] Johhancsik, C.A., Friesen, D.B., Dawson,R., Torque and Drag in Directional Wells – Prediction and Measurement. JPT, June 1984 .
- [10] API Recommended Practice 7G “Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits” Sixteenth Edition, August 1998.
- [11] Xkmjun He, Age Kyllingstad Helical Buckling and Lock-Up Conditions for Coiled Tubing in Curved Wells SPE paper no. 25370.
- [12] C.J. Mason & A. Judzis, Extended-Reach Drilling - What is the Limit? SPE paper No. 48943.
- [13] Robert F. Mitchell, Stephan Miska Helical Buckling of Pipe with Connectors and Torque IADC/SPE 87205
- [14] TH Hill Associates Drill Stem Design 1998.



## Kompleksowa budowa oraz modernizacja sieci instalacji inżynierskich metodami bezwykopowymi:

- mikrotunelowanie w zakresie średnic 200 do 3000 mm
- swagelining w zakresie 90 do 1000 mm
- cracking statyczny
- sliplining
- renowacja z użyciem chemii budowlanej
- renowacja z użyciem rękawa
- projektowanie i generalne wykonawstwo inwestycji



**PFEIFFER**

Pfeiffer Spółka z o.o.  
ul. Wilimowskiego 6/7  
40-074 Katowice  
tel.: +48 32 781 46 21  
fax. +48 32 781 46 22

e-mail: [biuro@pfeiffer.pl](mailto:biuro@pfeiffer.pl)  
[www.pfeiffer.pl](http://www.pfeiffer.pl)

## BETONSTAL Sp. z o. o.

### WYROBY POLIMEROBETONOWE



- ✓ Rury przeciskowe: DN 600 - 2000 mm  
Wykonujemy ponadto:
- ✓ obudowy przepompowni
- ✓ studzienki kanalizacyjne
- ✓ studzienki wodomierzowe

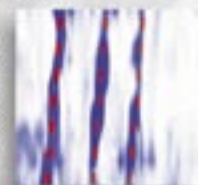
70-807 Szczecin, ul. Wiosenna 1  
tel./fax (091) 464 37 26  
tel. (091) 464 45 15  
tel. (091) 464 45 16

[polimery@betonstal.com.pl](mailto:polimery@betonstal.com.pl)  
[biuro@betonstal.com.pl](mailto:biuro@betonstal.com.pl)  
[www.betonstal.com.pl](http://www.betonstal.com.pl)

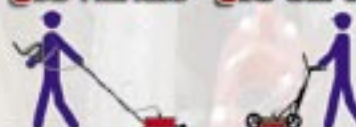
## Najszybsze mappery infrastruktury podziemnej

- W pełni zautomatyzowana technologia georadarowa
- wyniki w czasie rzeczywistym (bez konieczności interpretacji sygnału georadarowego)
- super szybki pomiar
- automatyczne tworzenie map
- mapowanie zbrojenia, kabli, rur, kolektorów, starych murów, niewybuchów ...
- niespotykany zasięg >7m\*
- szkolenie w 30 min.

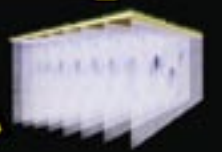
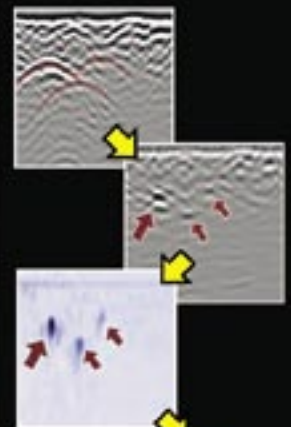
Generowany automatycznie wynik - czytelny plan infrastruktury



geo-handle geo-cart



\* 500 MHz, przy dobrych warunkach geologicznych antena 150 MHz z zestawem geo-handle do 35m!!!



**GEO**  
RADAR

ul. Powst. Śl. 116 p. 22  
53-333 Wrocław  
tel. kom. 50 999 13 13  
[www.geo-radar.pl](http://www.geo-radar.pl)