

Jan Ziąja*, Krzysztof Baniak**

**ANALIZA TECHNICZNA
TECHNOLOGII WYKONANIA PRZEWIERTU HORYZONTALNEGO
POD RZEKĄ USZWICĄ W BRZESKU OKOCIMIU*****

1. WSTĘP

Przekroczenie rzeki Uszwicy w Brzesku Okocimiu miało na celu połączenie rurociągu sanitarnego po obu stronach rzeki. W celu wykonania tego zadania wykorzystano technologię horyzontalnego przewiertu sterowanego. Wiercenie na odcinku około 90 metrów wykonano maszyną Ditch Witch JT 1720 o maksymalnej sile uciągu 77 100 N i maksymalnej wydajności pompy płuczkowej 136 litrów/minutę. Rura przewodowa o średnicy 90 mm wykonana z polietylenu wciągana była w rurze osłonowej o średnicy 160 mm także wykonanej z polietylenu. Realizacja zadania trwała 2 dni, przy czym w dniu pierwszym wykonany został otwór pilotowy o średnicy 110 mm, natomiast w drugim dniu realizowano rozwiercanie do średnicy 300 mm z równoczesnym wciąganiem przygotowanych rurociągów.

**2. PARAMETRY WIERCENIA I POMIARY
WYKONANE PODCZAS PRZEWIERTU**

Podczas prac przekraczania rzeki Uszwicy technologią horyzontalnego przewiertu sterowanego wykonano pomiary głównych parametrów wiercenia takich, jak:

- czas wiercenia,
- ciśnienie toczenia płuczki,
- ciśnienie pchania i uciągu,
- odczyty z sondy pomiarowej.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Poszukiwania Nafty i Gazu „Nafta” Sp. z o.o. w Pile

*** Praca powstała w ramach badań statutowych w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii WWNiG AGH

Przeprowadzono również pomiary gęstości płuczki zatłaczanej oraz płuczki wypływającej z otworu i ich lepkości lejkiem Marsha. Ponadto pobrano próbki płuczek z różnych etapów wiercenia (wiercenie pilotowe, rozwiercanie) oraz próbki przewiercanego gruntu w celu przeprowadzenia dokładniejszych badań laboratoryjnych.

Wiercenie pilotowe

Parametry technologiczne zebrane podczas wiercenia pilotowego zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1
Główne parametry wiercenia zanotowane podczas wiercenia pilotowego

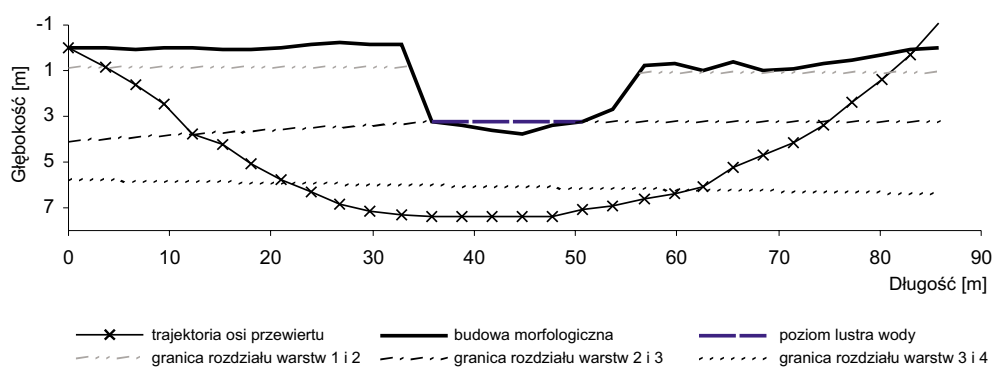
Numer kolejnej żerdzi	Czas wiercenia i -tą żerdzią T_{wi} , s	Ciśnienie tłoczenia płuczki $p_{pl} \cdot 10^5$ Pa	Ciśnienie pchania $p_w \cdot 10^5$ Pa
1	60	10	–
2	120	20	50
3	120	20	5
4	180	20	5
5	120	20	10
6	180	15	5
7	240	15	25
8	480	20	35
9	420	15	80
10	480	15	85
11	420	30	75
12	480	20	120
13	480	20	50
14	600	20	50
15	480	20	15
16	180	20	10
17	300	20	10
18	360	20	10
19	480	15	30
20	420	15	30
21	420	15	20
22	300	20	20
23	300	15	35
24	120	20	35
25	120	20	5
26	240	15	45
27	180	15	45

Pomiary gęstości płuczki wypływającej w trakcie wiercenia wykonano połową wagą ramienną typu Baroid. Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2
Gęstość płuczki wypływającej z otworu

Numer żerdzi, przy której wykonany był pomiar	Gęstość płuczki wypływającej $\rho_{pw} \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	Lepkość względna η_s, s	Uwagi
4	1,07	–	Płuczka pobrana w punkcie wejścia pilota
5	1,12	–	Płuczka pobrana w punkcie wejścia pilota
8	1,16	44	Płuczka pobrana w punkcie wejścia pilota
9	1,10	37	Płuczka pobrana z przebiecia nr 1 – odstana
10	1,20	49	Płuczka pobrana z przebiecia nr 1
11	1,13	43	Płuczka badana zaraz po wznowieniu wiercenia
12	1,15	–	Płuczka pobrana z przebiecia nr 1
13	1,18	58	Płuczka pobrana z przebiecia nr 2
15	1,17	50	Płuczka pobrana z przebiecia nr 2
16	1,13	42	Płuczka po chwilowym odstaniu

Pomiary kąta nachylenia i głębokości pilota wykonywano po odwierceniu kolejnych odcinków o długości jednej żerdzi (3 metry), sondą radiową typu SubSide i na podstawie tych pomiarów wykreślono rzeczywistą trajektorię osi przewiertu. Wykonane zostały również pomiary niwelacyjne na trasie przewiertu pozwalające na przedstawienie ukształtowania terenu (rys. 1).



Rys. 1. Trajektoria osi przewiertu i ułożenie warstw w osi przewiertu

Parametry technologiczne zebrane podczas rozwiercania i równoczesnego wciągania rury osłonowej przedstawiono w tabelach 3, 4.

Tabela 3

Główne parametry wiercenia zanotowane podczas rozwiercania i równoczesnego wciągania

Numer żerdzi	Czas wiercenia <i>i</i> -tą żerdzią $T_w \cdot 60$ s	Ciśnienie tłoczenia płuczki $p_{pl} \cdot 10^5$ Pa	Ciśnienie ciągnięcia $p_c \cdot 10^5$ Pa
1	–	–	–
2	–	–	–
3	3	20	–
4	3	20	75
5	4	20	90
6	3	20	90
7	4	20	90
8	4	25	75
9	4	25	75
10	4	30	80
11	4	35	75
12	5	30	75
13	4	30	75
14	5	35	50
15	4	35	50
16	5	30	45
17	4	35	75
18	5	30	75
19	5	35	55
20	4	30	50
21	5	35	80
22	4	35	50
23	4	35	35
24	2	30	20
25	3	25	20
26	2	20	25
27	3	25	25
28	2	25	10
29	1	25	–

Tabela 4
Gęstość płuczki wypływającej – rozwieranie

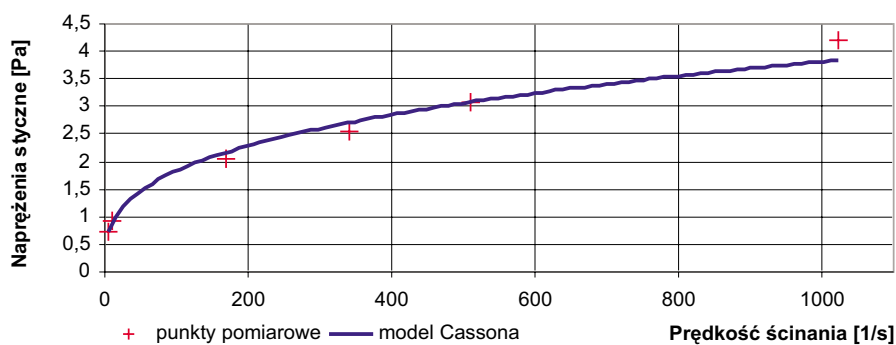
Numer żerdzi, przy której wykonany był pomiar	Gęstość płuczki wypływającej $\rho_w \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	Uwagi
3	1,41	–
4	1,39	Zmiana koloru wypływającej płuczki
5	1,47	–
6	1,41	–
7	1,46	–
8	1,41	–
9	1,38	–
10	1,29	Płuczka odstana
11	1,35	–
12	1,43	–

3. POMIARY I BADANIA LABORATORYJNE

Z poszczególnych etapów wiercenia pobrano próbki płuczki do dalszych badań laboratoryjnych, które obejmowały pomiary następujących parametrów:

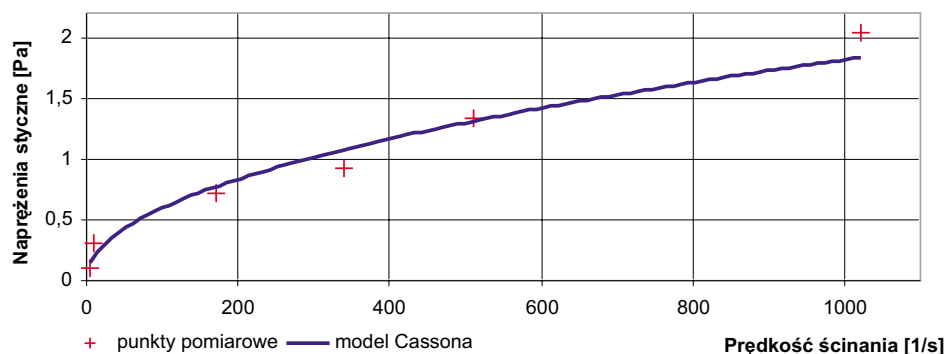
- lepkości dla różnych prędkości ścinania,
- wytrzymałości strukturalnej,
- gęstości,
- filtracji,
- pH.

Na podstawie otrzymanych wyników i za pomocą programu Flow-Fluid Coef wyznaczono model reologiczny badanej cieczy [1]. Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 2).



Rys. 2. Wykres modelu reologicznego dla płuczki zatłaczanej

Model reologiczny płuczki zatłaczanej do otworu to model Cassona. Również dla płuczki wychodzącej z otworu uzyskano model Cassona (rys. 3).



Rys. 3. Wykres modelu reologicznego dla płuczki wypływającej – wiercenie pilotowe

4. BADANIA GEOTECHNICZNE

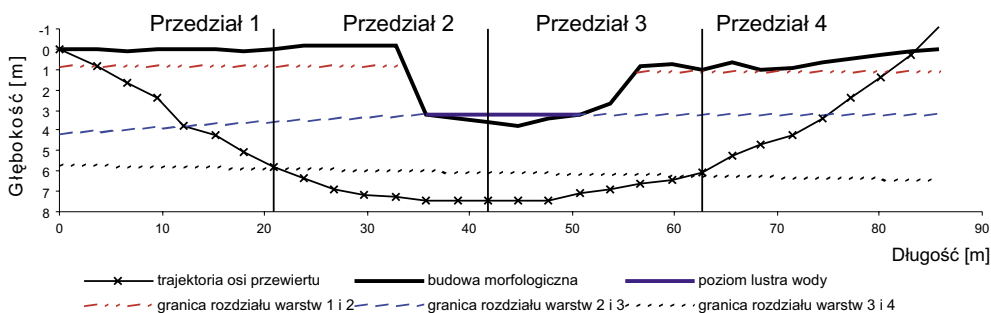
W celu określenia rodzaju przewiercanego gruntu na trasie przewiertu pobrano próbki gruntu z różnej głębokości. Do badania pobrano trzy próbki. Pierwsza pochodziła z głębokości ok. 30 cm z okolicy punktu wejścia, natomiast dwie kolejne ze zbocza z głębokości 1,5 metra od powierzchni i z poziomu lustra wody. Badania geotechniczne gruntów wykonano zgodnie z normą PN-88/B-04481. Klasyfikacje przebadanych próbek gruntów przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5
Klasyfikacja badanych gruntów

Próbka	I		II		III	
	Rodzaj/ Nazwa gruntu	Symbol	Rodzaj/ Nazwa gruntu	Symbol	Rodzaj/ Nazwa gruntu	Symbol
Nazwa gruntu	głina piaszczysta	Gp	głina	G	głina piaszczysta	Gp
Barwa	brązowa	–	jasnobrązowa	–	niebieskoszara	–
Według uziarnienia	drobnoziarnisty	D	drobnoziarnisty	D	drobnoziarnisty	D
Według spoistości I_p	średnio spoisty	ss	mało spoisty	ms	mało spoisty	ms
Wskaźnik niejednorodności U	równoziaarnisty	–	równoziaarnisty	–	równoziaarnisty	–
Według wilgotności naturalnej w_n	mało wilgotny	mw	mało wilgotny	mw	wilgotny	w
Głębokość pobrania próby, m	0,3	–	1,5	–	3,5	–
Gęstość naturalna, $\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	1,534	–	1,594	–	1,574	–

5. ANALIZA PROCESU WIERCENIA

W celu przeprowadzenia analizy procesu wiercenia przewiertu podzielono go na cztery przedziały ze względu na rodzaj przewiercanego gruntu (rys. 4).



Rys. 4. Podział przewiertu na przedziały

Pomierzone wartości technologiczne uśredniono w obrębie każdego przedziału. Cały przewiert podzielono na dwa etapy dla których obliczono mechaniczne parametry wiercenia według poniższej procedury:

1. wiercenie pilotowe,
2. rozwiercanie.

Wartości prędkości wiercenia, wydatku płuczki i siły pchania lub uciągu dla poszczególnych przedziałów są wartościami średnimi ważonymi z danych uzyskanych podczas przewiertu. Wagą jest czas, a średnia dla prędkości jest liczona ze wzoru [3]

$$\bar{v}_w = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1)$$

Analogicznie zostały policzone wartości ciśnienia tłoczenia płuczki i ciśnienia pchania i uciągu.

6. WYDATEK TŁOCZONEJ PŁUCZKI

Wydatek płuczki liczony jako iloczyn średniego ciśnienia tłoczenia płuczki dla przedziału i ilości litrów przypadających na jednostkę ciśnienia

$$\bar{Q}_{pl} = \bar{p}_{pl} Q \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (2)$$

Parametry pomp płuczkowych podawane przez producenta odnoszą się zwykle do wydatku w litrach na minutę i maksymalnego ciśnienia tłoczenia. Są to parametry zmierzone podczas testu i przy użyciu wody, której lepkość wynosi około 27 s (pomiar lejkiem Marsha). Oznacza to, że wartość wydatku podawaną przez producenta należy zmniejszyć odpowiednio o 1% dla każdej sekundy powyżej lepkości wody [5].

Mając dane techniczne pompy i pomiary lepkości płuczki, można obliczyć ilość tłoczonych płuczki na jednostkę ciśnienia ze wzoru

$$Q = \frac{(1-s) Q_{\max, \text{wody}}}{p_{\max}} \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{Pa}} \quad (3)$$

gdzie s podawane jest w ułamku dziesiętnym $s_{pl} - s_{plw}$ [%].

7. SIŁA PCHANIA LUB UCIĄGU

Mając policzone średnie ciśnienie pchania (uciągu) p_{ws} dla przedziału i posiadając dane techniczne o maksymalnym ciśnieniu pchania (uciągu), można obliczyć średnią siłę pchania (uciągu) dla przedziału ze wzoru

$$\bar{F}_{ws} = \bar{p}_{ws} \frac{F_{\max}}{p_{\max}} \text{ [N]} \quad (4)$$

8. TEORETYCZNA PRĘDKOŚĆ WIERCENIA

Dla określenia prawidłowości wykonania otworu obliczono teoretyczną maksymalną prędkość wiercenia v_{wt} dla zastosowanego wydatku tłoczenia płuczki, jak również minimalny teoretyczny wydatek tłoczenia płuczki Q_{\min} dla zanotowanej prędkości wiercenia. W obliczeniach posłużono się zasadą, że ilość tłoczonych płuczki powinna być 4 razy większa od ilości generowanego urobku.

$$v_{wt} = \frac{\bar{Q}_{pl}}{V_{pl}} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5)$$

$$V_{pl} = 4 V_{otw} \frac{\text{m}^3}{\text{m}} \quad (6)$$

$$V_{otw} = \frac{D_o^2}{4} L_{otw} \frac{\text{m}^3}{\text{m}} \quad (7)$$

gdzie V_{otw} i V_{pl} zostały obliczone na 1 metr długości otworu.

$$Q_{\min} = \bar{v}_w V_{pl} \frac{m^3}{s} \quad (8)$$

Dodatkowo obliczono wartości maksymalnej dopuszczalnej prędkości wiercenia v_{wdop} zakładając, że wypływająca płuczka o danym wzbogaceniu w zwierciny o gęstości ρ_{sk} przyjętym jak dla przedziałów i przy zastosowanym wydatku tłoczenia płuczki do otworu Q_{pl} była w stanie wytransportować cały wygenerowany urobek.

$$v_{wdop} = \frac{4Q_{pl}(\rho_{pw} - \rho_{pl})}{D_o^2(\rho_{sk} - \rho_{pw})} \frac{m}{s} \quad (9)$$

9. WIERCENIE PILOTOWE

Na podstawie otrzymanych wyników badań geotechnicznych i po uśrednieniu ich dla przyjętych przedziałów, wartości gęstości skały przyjęto jak w tabeli 6.

Tabela 6
Gęstość gruntu ρ_{sk} dla wiercenia pilotowego

Numer przedziału	Gęstość gruntu ρ_{sk} , kg/m ³
1	1575
2	2327
3	2327
4	1572

Wyniki obliczeń według przedstawionej procedury zamieszczono w tabeli 7.

Tabela 7

Wartości technologiczne uśrednione dla przedziałów oraz średnie teoretyczne wskaźniki poprawności wykonania otworu – wiercenie pilotowe

Przedział	Średnia prędkość wiercenia $v_w \cdot 10^{-2}$ m/s	Teoretyczna prędkość wiercenia $v_{wt} \cdot 10^{-2}$ m/s	Teoretyczna maks. dop. prędkość wiercenia $v_{wdop} \cdot 10^{-2}$ m/s	Średni wydatek płuczki $Q_{pl} \cdot 10^{-5}$ m ³ /s	Teoretyczny min. strumień tłoczenia płuczki $Q_{\min} \cdot 10^{-5}$ m ³ /s
1	2,05	1,11	0,63	43,36	77,95
2	0,63	1,28	0,63	48,60	23,65
3	0,80	1,13	0,58	42,72	30,11
4	1,42	1,09	0,61	41,85	54,08

Analizując otrzymane dane i porównując je ze średnimi wskaźnikami uzyskanymi z przewiertu dla wiercenia pilotowego, można stwierdzić, że:

- prędkość wiercenia pilotowego v_w dla przedziałów 1 i 4 była zbyt duża – przewiert wykonywany nieprawidłowo pod względem oczyszczania otworu;
- wartości strumieni tłoczonych płuczki Q_{pl} dla 1 i 4 przedziału były zbyt małe aby płuczka odpowiednio oczyściła otwór ze zwiercin;
- dopuszczalna prędkość wiercenia v_{wdop} była prawidłowa tylko dla przedziału 2, a więc na tym odcinku ilość tłoczonych płuczki była wystarczająca dla całkowitego wytransportowania urobku.

Kolejnym punktem analizy wykonanego przewiertu jest określenie stopnia oczyszczenia otworu ze zwiercin oraz obliczenie ilości urobku wyniesionego na powierzchnię i pozostałego w otworze. Wyniki zaprezentowano w tabeli 8.

Tabela 8
Stopień oczyszczenia otworu pilotowego z urobku

Parametr	Przedział 1	Przedział 2	Przedział 3	Przedział 4
Masa generowanego urobku m_{sk} , kg	326,34	458,99	458,99	268,98
Masa wytransportowanego urobku m_{skw} , kg	255,62	460,24	397,70	222,62
Masa urobku pozostałego w otworze m_{skp} , kg	70,72	–	61,29	46,36
Ilość wytransportowanego urobku, %	78,33	100,27	86,65	82,76

Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że oczyszczanie otworu było w większości niewystarczające, aby wytransportować cały generowany urobek. Jedynie w przedziale drugim było właściwe oczyszczanie otworu. Wartość powyżej 100% w tym przedziale świadczyć może o tym, że wytransportowana została część urobku z poprzedniego przedziału lub o kawernowaniu ściany otworu przez przepływającą płuczkę.

Tabela 9
Średnie parametry mechaniczne wiercenia pilotowego

Numer przedziału	Maksymalna siła pchania F_{max} , N	Średnia siła pchania \bar{F}_{ws} , N	Maksymalne ciśnienie pchania $p_{max} \cdot 10^5$ Pa	Średnie ciśnienie pchania $\bar{p}_{ws} \cdot 10^5$ Pa
1	77100,00	6511,29	420	35,48
2		12795,85		69,73
3		3764,10		20,51
4		5854,52		31,90

Analizując otrzymane wyniki, stwierdzić można, iż wiercenie na trasie całego przewiertu w fazie wiercenia pilotowego nie odbywało się z wykorzystaniem maksymalnej mocy wiertnicy (tab. 9), co świadczy o wierceniu w gruntach mało lub średnio spoistych oraz o tym, że nie natrafiono podczas wiercenia na trudności geologiczne w postaci twardszych wkładek lub głazów pogłaczalnych.

10. ROZWIERCANIE

Dla rozwiercania przyjęto przedstawione poniżej wartości gęstości gruntu. Wartości te są większe z uwagi na zagęszczanie gruntu dokonane podczas wiercenia otworu pilotowego (tab. 10).

Tabela 10
Wartości gęstości gruntu dla rozwiercania

Numer przedziału	Gęstość gruntu ρ_{sk} , kg/m ³
1	1666
2	2327
3	2327
4	1646

Tabela 11

Wartości technologiczne uśrednione dla przedziałów oraz średnie teoretyczne wskaźniki poprawności wykonania otworu – rozwiercanie

Przedział	Średnia prędkość wiercenia $v_w \cdot 10^{-2}$ m/s	Teoretyczna prędkość wiercenia $v_{wr} \cdot 10^{-2}$ m/s	Teoretyczna maks. dop. prędkość wiercenia $v_{wdop} \cdot 10^{-2}$ m/s	Średni wydatek płuczki $Q_{pl} \cdot 10^{-5}$ m ³ /s	Teoretyczny min. strumień tłoczenia płuczki $Q_{min} \cdot 10^{-5}$ m ³ /s
1	1,46	0,20	1,34	48,82	358,46
2	1,16	0,30	0,44	73,65	284,37
3	1,09	0,33	0,50	80,11	266,60
4	1,89	0,28	2,12	70,33	464,28

Analizując otrzymane wyniki i porównując je ze wskaźnikami rzeczywistymi uzyskanymi dla rozwiercania, można stwierdzić, że (tab. 11):

- prędkość rozwiercania v_w była zbyt duża na całej trasie podczas rozwiercania;
- strumień objętości tłoczonej płuczki Q_{pl} był zbyt mały, aby prawidłowo oczyścić otwór ze zwiercin;
- prędkość postępu robót podczas wykonywania rozwiercania należało zwolnić;
- rozpatrując v_{wdop} stwierdzono, że w przedziale 4 wartości parametrów podczas rozwiercania zachowane były w dopuszczalnych granicach; przy danym strumieniu tłoczenia płuczki otwór został całkowicie oczyszczony ze zwiercin; świadczy to o tym, że zastosowana objętość tłoczonej płuczki była wystarczająca.

Określenie stopnia oczyszczania otworu ze zwiercin przedstawiono w tabeli 12.

Tabela 12
Stopień oczyszczania otworu podczas rozwiercania

Parametr	Przedział 1	Przedział 2	Przedział 3	Przedział 4
Masa generowanego urobku m_{sk} , kg	1528,80	2954,98	2954,98	2416,98
Masa wytransportowanego urobku m_{skw} , kg	1512,04	2229,87	2304,30	2455,43
Masa urobku pozostałego w otworze m_{skp} , kg	16,76	725,11	650,68	–
Ilość wytransportowanego urobku, %	98,90	75,46	77,98	101,59

Przedstawione wartości świadczą o niedostatecznym płukaniu otworu ze zwiercin na odcinkach z przedziałów 1, 2, 3, przez co część urobku pozostała w otworze albo została wciśnięta w ściany otworu. Na odcinku czwartym nastąpiło całkowite oczyszczenie otworu ze zwiercin. Wartość powyżej 100% świadczyć może o tym, że płuczka kawernowała ściany otworu lub zagęszczona strefa po wierceniu pilotowym była większa niż przyjęta do obliczeń.

Tabela 13
Średnie parametry mechaniczne rozwiercania i równoczesnego wciągania rurociągu

Numer przedziału	Maksymalna siła uciągu wiertnicy F_{max} , N	Średnia siła uciągu \bar{F}_{ws} , N	Maks. ciśnienie uciągu wiertnicy $p_{max} \cdot 10^5$, Pa	Średnie ciśnienie uciągu $\bar{p}_{ws} \cdot 10^5$, Pa
1	77100,00	15925,18	420	86,79
2		13120,25		71,50
3		11325,39		61,72
4		5367,38		29,25

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, iż proces rozwiercania i równoczesnego wciągania rurociągu był możliwy do przeprowadzenia w tych warunkach geotechnicznych (tab. 13), a nadwyżka mocy urządzenia pozwalała na uniknięcie ewentualnych komplikacji podczas tego etapu prac.

11. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonej analizy wynika, iż prędkość wiercenia powinna być skorelowana z ilością tłocznej płuczki dla zapewnienia odpowiedniego oczyszczenia otworu z urobku. Ilość tłocznej płuczki dla prawidłowego oczyszczenia otworu uzależniona jest również od

właściwości przewiercanego gruntu i parametrów reologicznych płynu wiertniczego. Nie zawsze niewytransportowanie całego urobku z otworu świadczyć musi o nieprawidłowym doborze parametrów wiercenia (ilość tłoczonej płuczki, prędkość wiercenia), gdyż niewyniesiony urobek jest rozpychany w ściany otworu, zagęszczając tym samym strefę przyotworową. Zagęszczenie takie, jak również tworzący się film na ścianach otworu, wpływa pozytywnie na stabilność ścian otworu i zmniejsza filtrację płuczki w przewiercane grunty. Ułatwia to utrzymanie cyrkulacji płynu w otworze i transport urobku. Utrzymanie stabilności ścian otworu wpływa na prawidłowy przebieg procesu wiercenia oraz na bezawaryjne zakończenie zadania, czyli wciągnięcie rurociągu.

LITERATURA

- [1] Wiśniowski R.: *Metodyka wyznaczania modelu reologicznego cieczy wiertniczej*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 18/1, 2001
- [2] Wiśniowski R., Stryczek S., Ziaja J.: *Wybrane aspekty projektowania i wykonywania horyzontalnych przewiertów sterowanych (HDD) – Horizontal directional drilling – selected design and performance aspects*. Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej, Kielce – Cedzonia 24–25 kwietnia 2003
- [3] Zeliaś A., Pawełek B., Wanat S.: *Metody statystyczne*. Warszawa, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne 2002
- [4] Ziaja J., Wiśniowski R.: *Technologie wykonywania horyzontalnych przewiertów sterowanych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 21/1, 2004
- [5] Wewnętrzne materiały Zakładu Remontowego Urzędzeń Gazowniczych Sp. z o.o. w Pogórskiej Woli