



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE  
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW



# Analiza warunków wynoszenia zwiercin podczas wiercenia super głębokiego otworu geotermalnego

**Albert Złotkowski**  
**Iwona Kowalska Kubsik**

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu

Obrotowe wiercenie otworów wiąże się z koniecznością stosowania płuczki wiertniczej do wynoszenia zwiercin z dna otworu.

Transport zwiercin jest uzależniony od parametrów reologicznych przepływającej cieczy, ale także od warunków hydraulicznych istniejących w przestrzeni pierścieniowej otworu w danej głębokości.

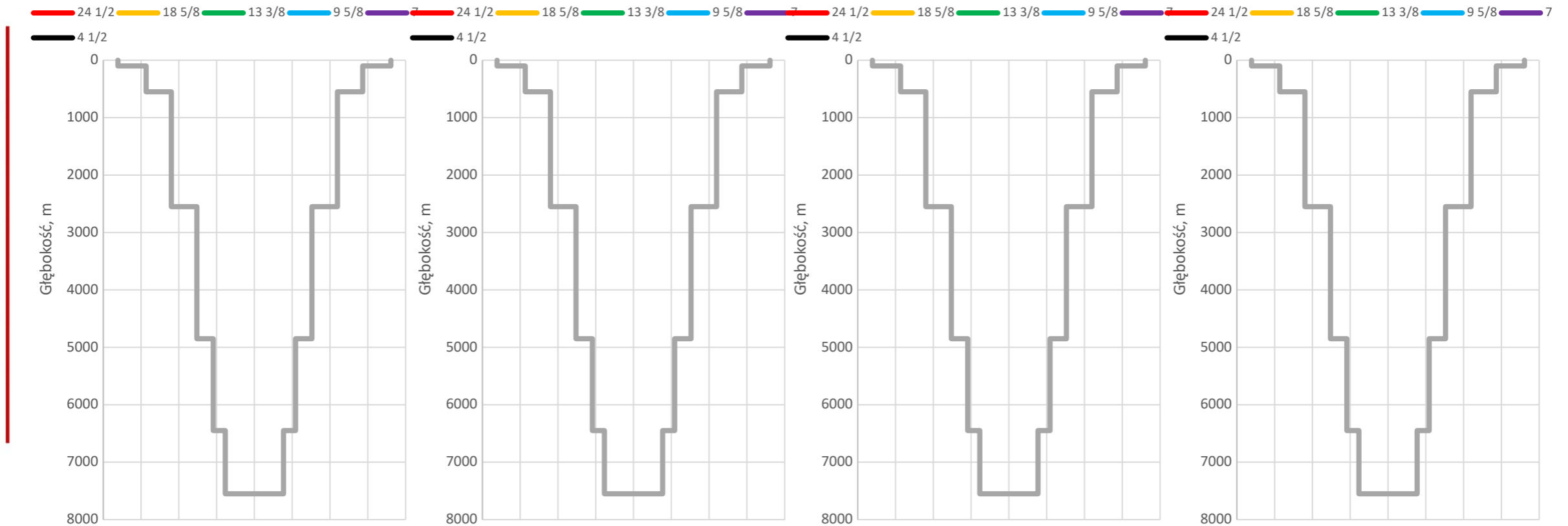
Szczególnie wykonywanie głębokich otworów geotermalnych związane jest z zastosowaniem konstrukcji otworu z wykorzystaniem traconych kolumn rur okładzinowych oraz z koniecznością zastosowania stopniowego przewodu wiertniczego.

W tak skomplikowanej geometrycznie sytuacji wyzwanie stanowi uzyskanie odpowiednich parametrów przepływu płuczki i wynoszenia z otworu zwiercin.

# ZADANIA PŁUCZKI WIERTNICZEJ

1. Usuwanie zwiercin ze spodu otworu,
2. **Wynoszenie zwiercin na powierzchnię terenu,**
3. Chłodzenie oraz smarowanie świdra i przewodu wiertniczego,
4. Wytwarzanie na ścianie otworu warstwy osadu o niskiej przepuszczalności,
5. Równoważenie ciśnienia górotworu (geostatycznego),
6. Równoważenie ciśnienia złożowego,
7. Zmniejszenie uszkodzenia strefy przyotworowej,
8. Przekazywanie informacji o przewiercanych skałach.
9. Przekazywanie informacji o trajektorii otworu,
10. Przekazywanie na świder mocy hydraulicznej.

# KONSTRUKCJA OTWORÓW



**Rys. 1.** Otwór uzbrojony w 6 kolumn rur okładzinowych, zapuszczonych do wierzchu

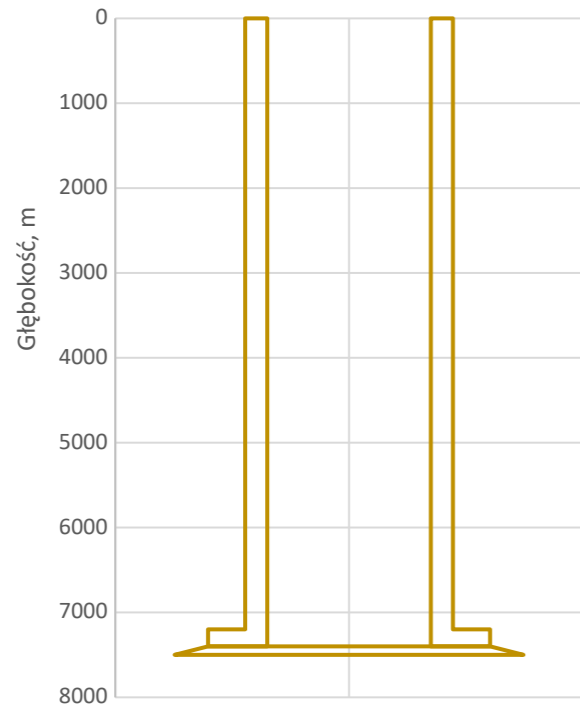
**Rys. 2.** Otwór uzbrojony w 6 kolumn rur okładzinowych, kolumna eksploatacyjna tracona

**Rys. 3.** Otwór uzbrojony w 6 kolumn rur okładzinowych, kolumna III techniczna i eksploatacyjna tracona

**Rys. 4.** Otwór uzbrojony w 6 kolumn rur okładzinowych, kolumna II oraz 3 techniczna i eksploatacyjna tracona

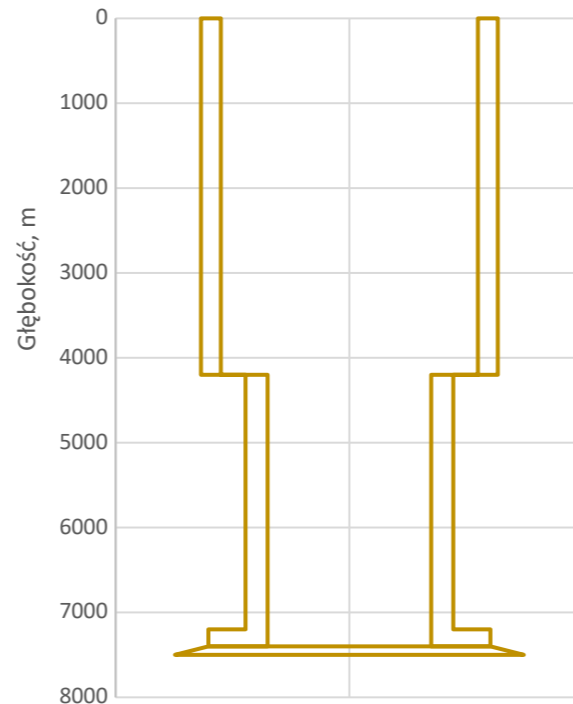
# PROCES GŁĘBIENIA OTWORU

24 1/2 18 5/8 13 3/8 9 5/8  
7 5 7/8 DP 3 1/2+DC 4 3/4



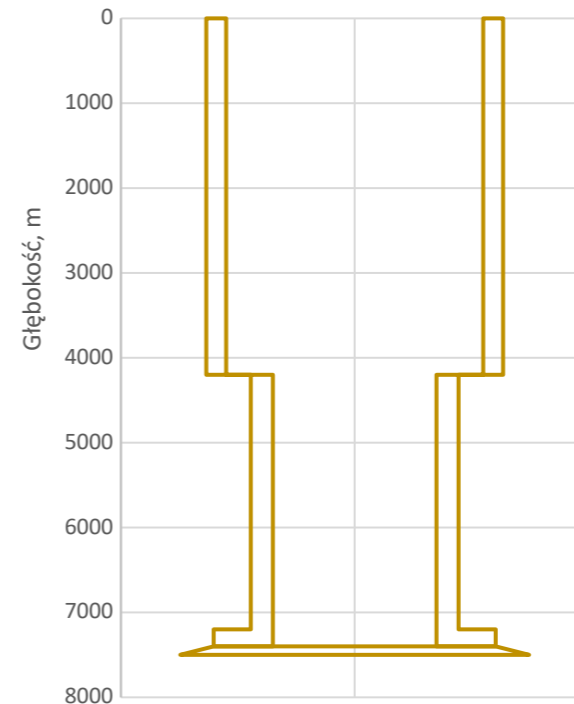
**Rys. 5.** Wiercenie z zastosowaniem jednostopniowego przewodu wiertniczego

24 1/2 18 5/8 13 3/8 9 5/8  
7 5 7/8 DP 5+DP 3 1/2+DC 4 3/4



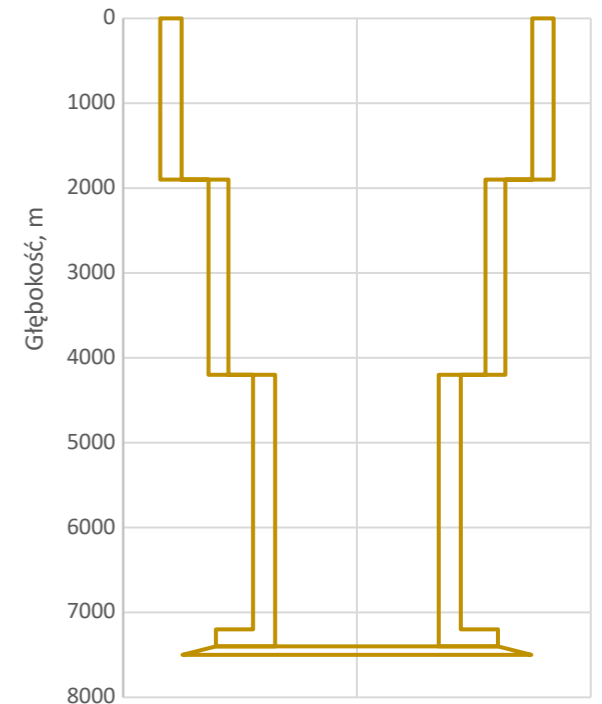
**Rys. 6.** Wiercenie z zastosowaniem dwustopniowego przewodu wiertniczego

9 5/8 24 1/2 18 5/8 13 3/8 9 5/8  
7 5 7/8 DP 5+DP 3 1/2+DC 4 3/4



**Rys. 7.** Wiercenie z zastosowaniem dwustopniowego przewodu wiertniczego

9 5/8 24 1/2 18 5/8 13 3/8 9 5/8  
7 5 7/8 DP 6 5/8+5+3 1/2+DC 4 3/4



**Rys. 8.** Wiercenie z zastosowaniem trzystopniowego przewodu wiertniczego

# PROCES WYNOSENIA ZWIERCIN

Warunkiem koniecznym wynoszenia zwiercin jest uzyskanie prędkości przepływu płuczki zapewniającej ich transport, w każdej wielkości przestrzeni pierścieniowej.

Warunek ten jest zachowany, gdy zachodzi zależność:

$$v_u = v_{pp} + a \cdot v_o$$

gdzie:

$v_u$  – prędkość unoszenia (wynoszenia) zwiercin; [m/s],

$v_o$  – prędkość opadania zwiercin; [m/s],

$v_{pp}$  – prędkość przepływu płuczki; [m/s].

$$a \in (1,13 \div 1,14)$$

Stąd prędkość unoszenia winna być większa od zera.

$$v_u > 0$$

# PROCES WYNOŠZENIA ZWIERCIN

Prędkość opadania zwiercin można wyznaczyć z wzorów Pigot'a:

- przepływ laminarny i kulisty kształt

$$v_0 = 0,545 \frac{d_z^2 (\rho_{sk} - \rho_{pl})}{\mu}$$

- przepływ laminarny i płaska cząstka

$$v_0 = 0,212 \frac{d_z^2 (\rho_{sk} - \rho_{pl})}{\mu}$$

- przepływ turbulentny i kulisty kształt

$$v_0 = 4,97 \sqrt{d_z \frac{\rho_{sk} - \rho_{pl}}{\rho_{pl}}}$$

- przepływ turbulentny i płaska cząstka

$$v_0 = 1,93 \sqrt{d_z \frac{\rho_{sk} - \rho_{pl}}{\rho_{pl}}}$$

# PROCES WYNOSENIA ZWIERCIN

Dla przyjętych wielkości fizycznych płuczki i przewiercanych skał:

- Gęstość płuczki – 1200 kg/m<sup>3</sup>
- Gęstość zwiercanej skały – 2400 kg/m<sup>3</sup>
- Lepkość pozorna płuczki – 17,5 mPas

prędkości opadania zwiercin w zależności od ich wielkości wynoszą odpowiednio:

Wielkość zwierciny, mm	Przepływ płuczki			
	Laminarny		Turbulentny	
	Cząstka kulista	Cząstka płaska	Cząstka kulista	Cząstka płaska
1	0,04	0,01	0,16	0,06
2	0,15	0,06	0,22	0,09
3	0,34	0,13	0,27	0,11
4	0,60	0,23	0,31	0,12
5	0,93	0,36	0,35	0,14

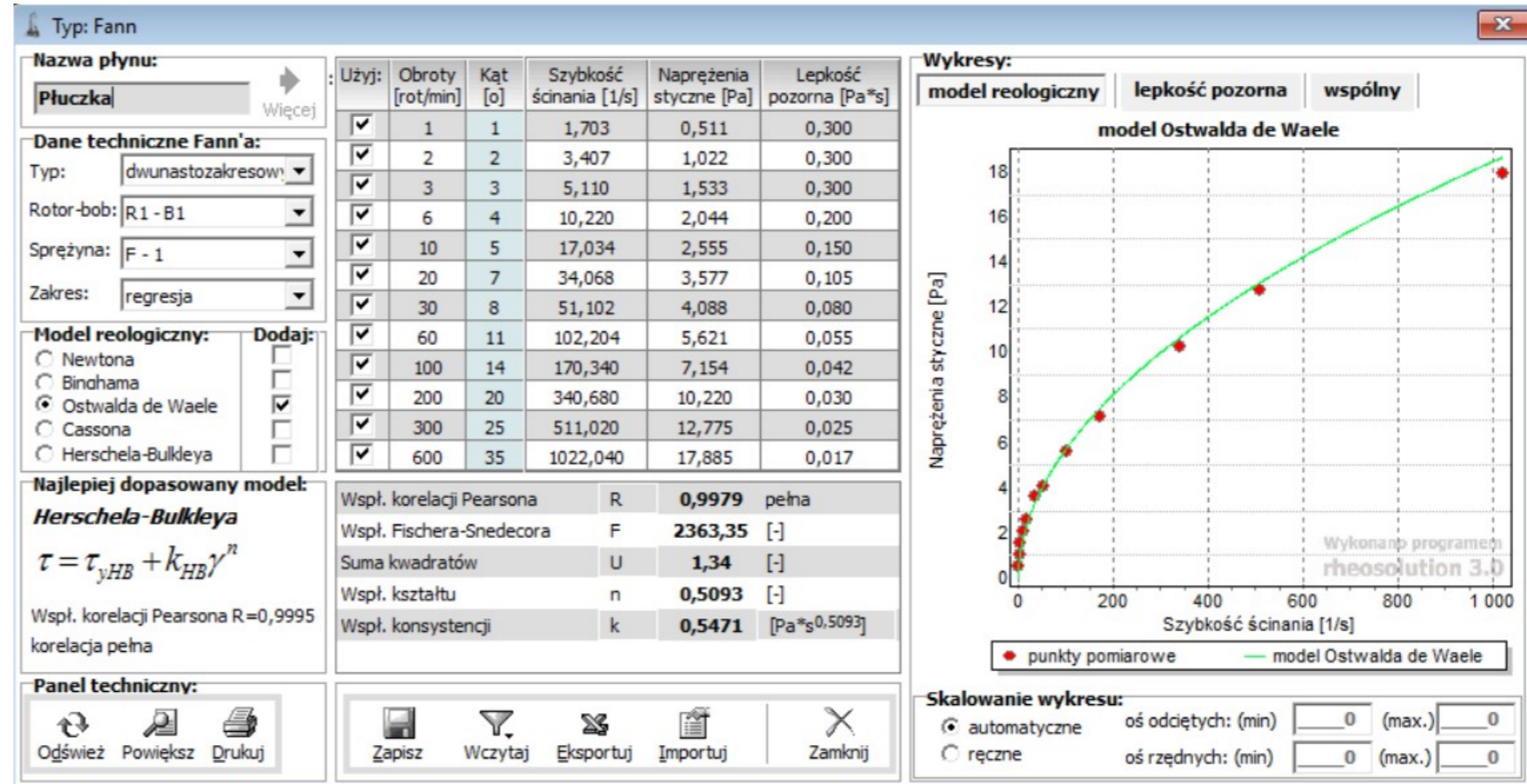
# PROCES WYNOSENIA ZWIERCIN

Zatem minimalna prędkość przepływu płuczki w przestrzeni pierścieniowej, przy której wynoszone jest większość zwiercin powinna wynosić  $0,5 \div 0,6$  m/s.

Jednocześnie, aby nie wypłukiwać skał ze ściany otworu, prędkość przepływu płuczki nie powinna być większa niż  $2,5 \div 3,0$  m/s.

Wielkość zwierciny, mm	Przepływ płuczki			
	Laminarny		Turbulentny	
	Cząstka kulista	Cząstka płaska	Cząstka kulista	Cząstka płaska
1	0,04	0,01	0,16	0,06
2	0,15	0,06	0,22	0,09
3	0,34	0,13	0,27	0,11
4	0,60	0,23	0,31	0,12
5	0,93	0,36	0,35	0,14

# PARAMETRY REOLOGICZNE PŁUCZKI



Współczynnik kształtu –  $k = 0,51$  [-]

Współczynnik konsystencji –  $n = 0,55$  Pas<sup>0,51</sup>

Lepkość plastyczna – 10 mPas

Lepkość pozorna – 17,5 mPas

Granica płynięcia – 15 lb/100ft<sup>2</sup>

Dla modelu Ostwalda de Waele liczba Reynoldsa obliczana jest z wzoru:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v^{2-n} (D-d)^n}{k \cdot 8^{n-1}}$$

Wartość krytycznej liczby Reynoldsa uogólnionej wyznaczyć należy ze wzoru:

$$\text{Re}_{kr} = 3470 - 1370 \cdot n$$

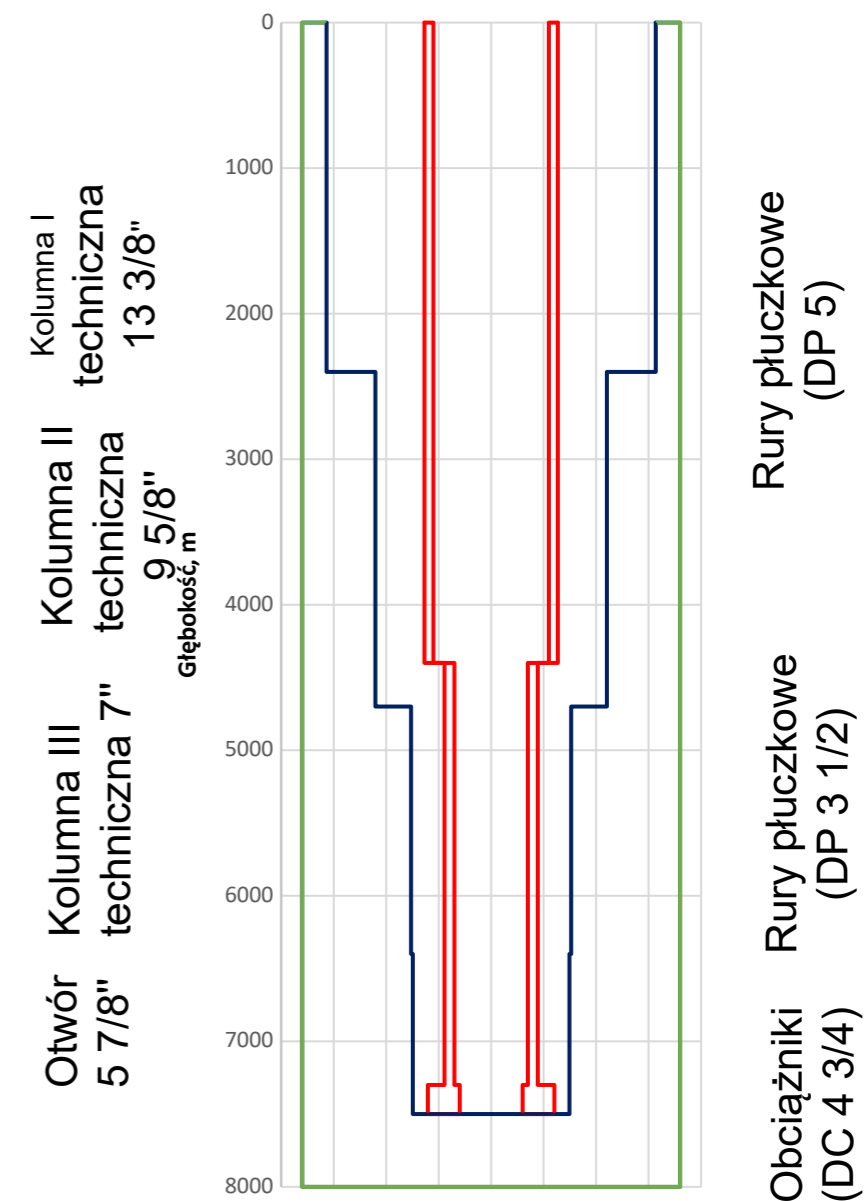
Dla stosowanej płuczki wynosi ona:

$$\text{Re}_{kr} = 3470 - 1370 \cdot 0,55 = 2717$$

# GEOMETRIA OBIEGU PŁUCZKI

1. W konstrukcji otworu i przewodu wiertniczego w obiegu cyrkulacyjnym płuczki można wyróżnić:

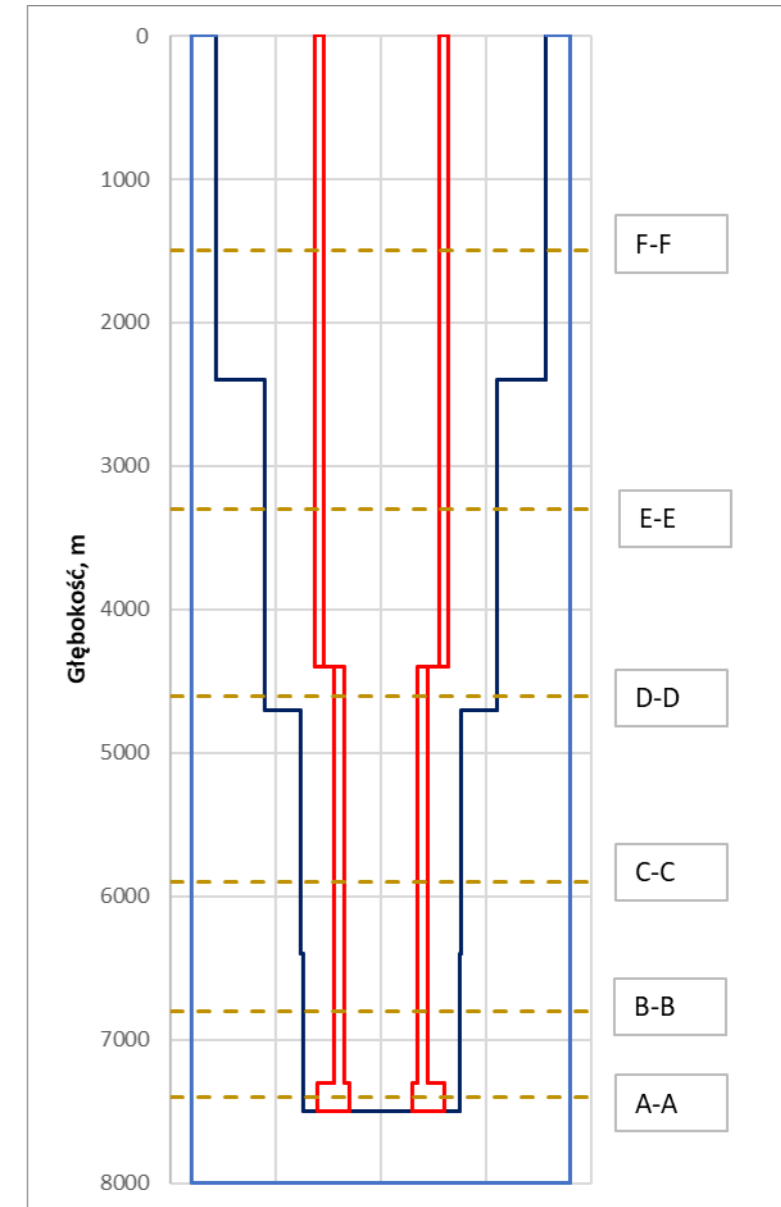
Głębokość od do, m	Nazwa elementu	
0	2500	Kolumna I techniczna 13 3/8"
2400	4800	Kolumna II techniczna 9 5/8"
4700	6400	Kolumna III techniczna 7"
6400	7500	Otwór 5 7/8"
0	4400	Rury płuczkowe (DP 5)
4400	7300	Rury płuczkowe (DP 3 1/2)
7300	7500	Obciążniki (DC 4 3/4)



# PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU PŁUCZKI

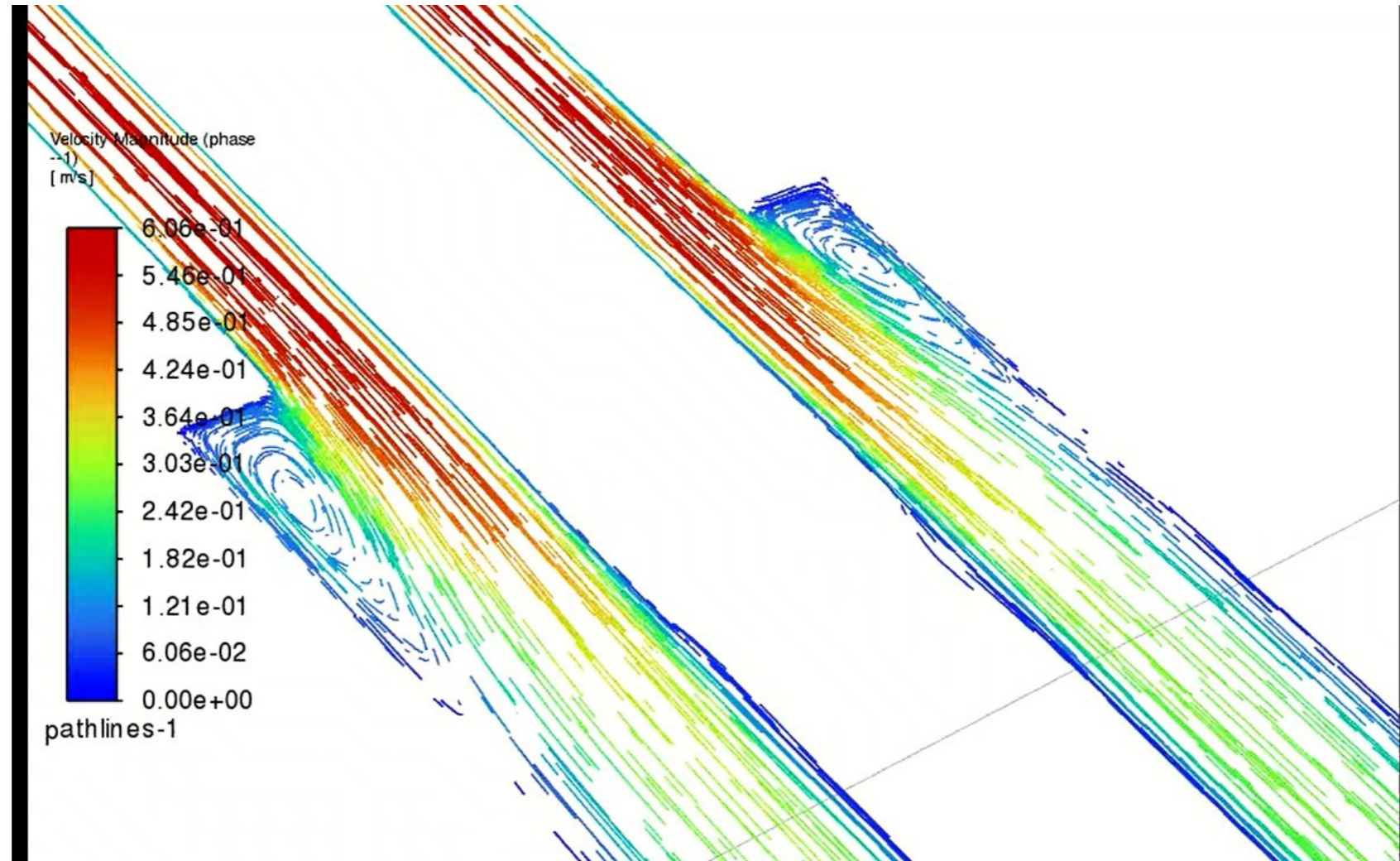
1. Analiza prędkości przepływu płuczki w otworze z zastosowaniem dwustopniowego przewodu wiertniczego przy różnych strumieniach objętości płuczki

Przekrój	Średnica elementu		Przepływ							
			15 l/s		20 l/s		25 l/s		30 l/s	
	D	d	v	Re	v	Re	v	Re	v	Re
	m	m	m/s	[-]	m/s	[-]	m/s	[-]	m/s	[-]
F-F	13 3/8	5	0,23	292	0,31	448	0,39	625	0,46	819
E-E	9 5/8	5	0,59	817	0,78	1255	0,98	1750	1,18	2296
D-D	9 5/8	3 1/2	0,47	695	0,63	1067	0,78	1488	0,94	1953
C-C	7	3 1/2	1,24	2053	1,66	3151	2,07	4395	2,49	5766
B-B	5 7/8	3 1/2	1,33	2206	1,77	3387	2,22	4723	2,66	6197
A-A	5 7/8	4 3/4	2,48	3807	3,30	5845	4,13	8151	4,95	10695

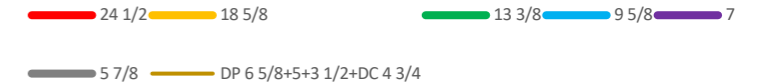


# PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU PŁUCZKI

Lokalny spadek prędkości przepływu płuczki

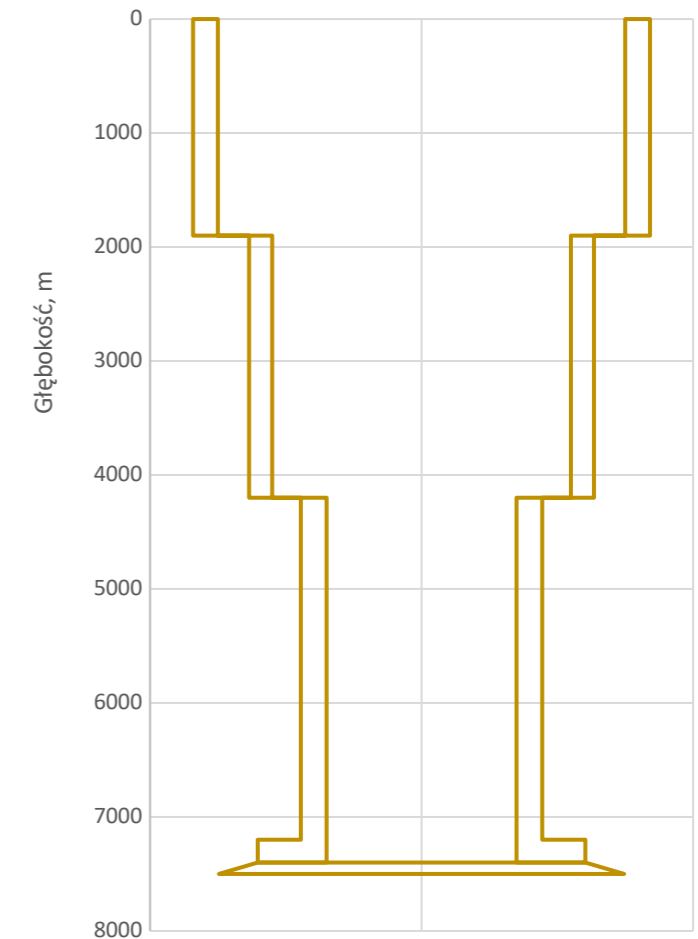


# PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU PŁUCZKI



## 2. Zastosowanie trzystopniowego przewodu wiertniczego

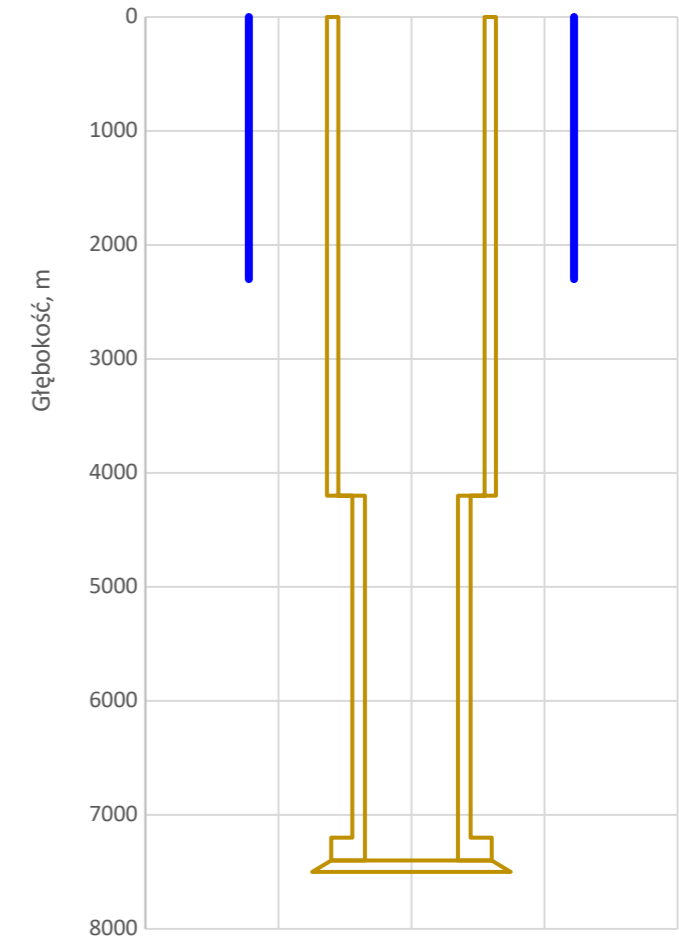
Głębokość od do, m		Nazwa elementu
0	2500	Kolumna I techniczna 13 3/8"
2400	4800	Kolumna II techniczna 9 5/8"
4700	6400	Kolumna III techniczna 7"
6400	7500	Otwór 5 7/8"
0	1800	Rury płuczkowe (DP 6 5/8)
1800	4400	Rury płuczkowe (DP 5)
4400	7300	Rury płuczkowe (DP 3 1/2)
7300	7500	Obciążniki (DC 4 3/4)



# PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU PŁUCZKI

## 3. Zastosowanie dodatkowej kolumny rur 9 5/8" oraz dwustopniowego przewodu wiertniczego

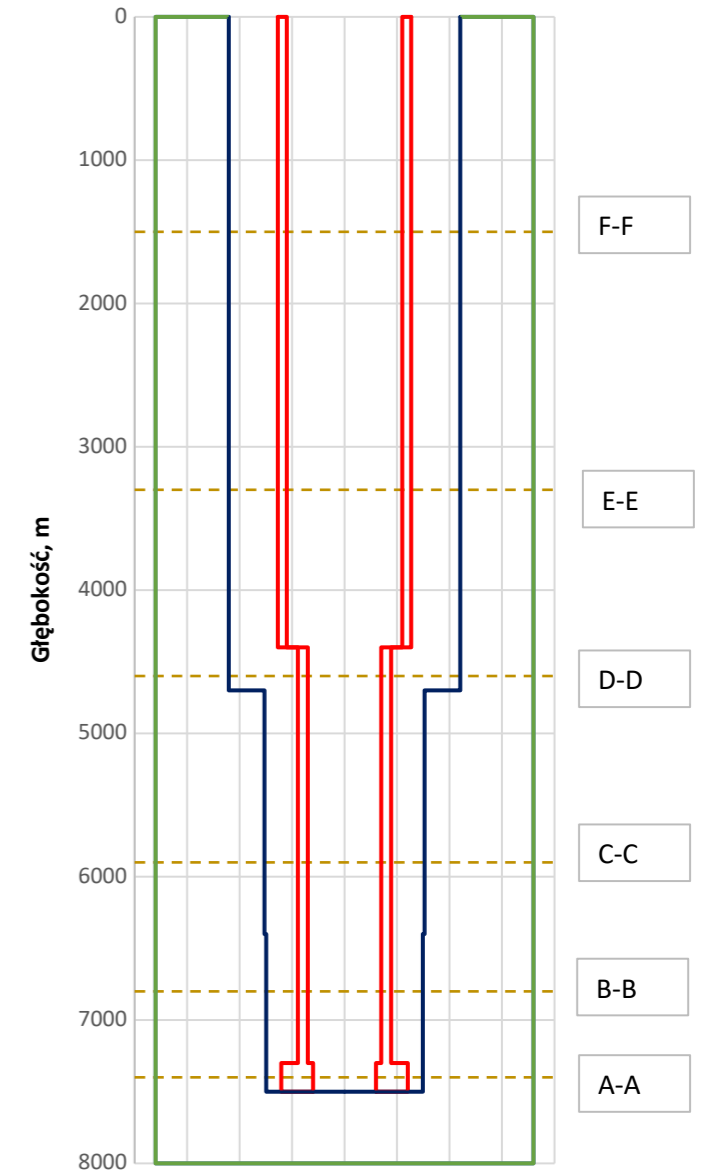
Głębokość od do, m		Nazwa elementu
0	2500	Kolumna I techniczna 13 3/8"
0	4800	Kolumna II techniczna 9 5/8"
4700	6400	Kolumna III techniczna 7"
6400	7500	Otwór 5 7/8"
0	4400	Rury płuczkowe (DP 5)
4400	7300	Rury płuczkowe (DP 3 1/2)
7300	7500	Obciążniki (DC 4 3/4)



# PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU PŁUCZKI

3. Analiza prędkości przepływu płuczki w otworze z zastosowaniem dwustopniowego przewodu wiertniczego z dodatkową kolumną 9 5/8", przy różnych strumieniach objętości płuczki

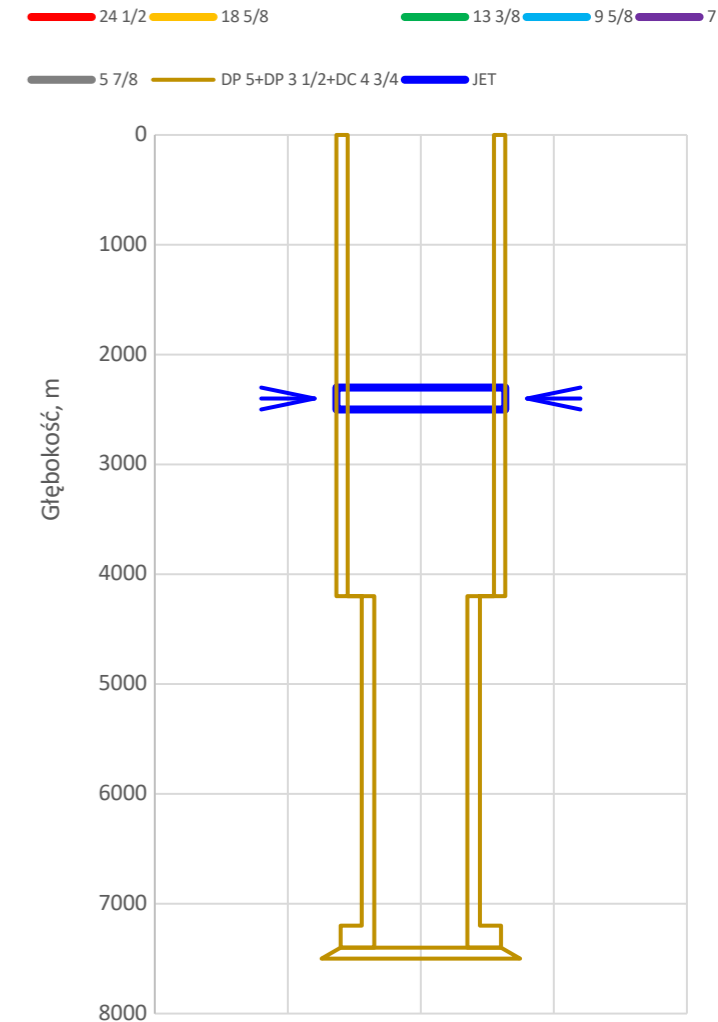
Przekrój	Średnica elementu		Przepływ							
			15 l/s		20 l/s		25 l/s		30 l/s	
	D	d	v	Re	v	Re	v	Re	v	Re
	m	m	m/s	[-]	m/s	[-]	m/s	[-]	m/s	[-]
F-F	9 3/8	5	0,59	817	0,78	1255	0,98	1750	1,18	2296
E-E	9 5/8	5	0,59	817	0,78	1255	0,98	1750	1,18	2296
D-D	9 5/8	3 1/2	0,47	695	0,63	1067	0,78	1488	0,94	1953
C-C	7	3 1/2	1,24	2053	1,66	3151	2,07	4395	2,49	5766
B-B	5 7/8	3 1/2	1,33	2206	1,77	3387	2,22	4723	2,66	6197
A-A	5 7/8	4 3/4	2,48	3807	3,30	5845	4,13	8151	4,95	10695



# PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU PŁUCZKI

## 4. Zastosowanie dwustopniowego przewodu wiertniczego oraz dodatkowej dyszy wprowadzającej płuczkę do przestrzeni pierścieniowej

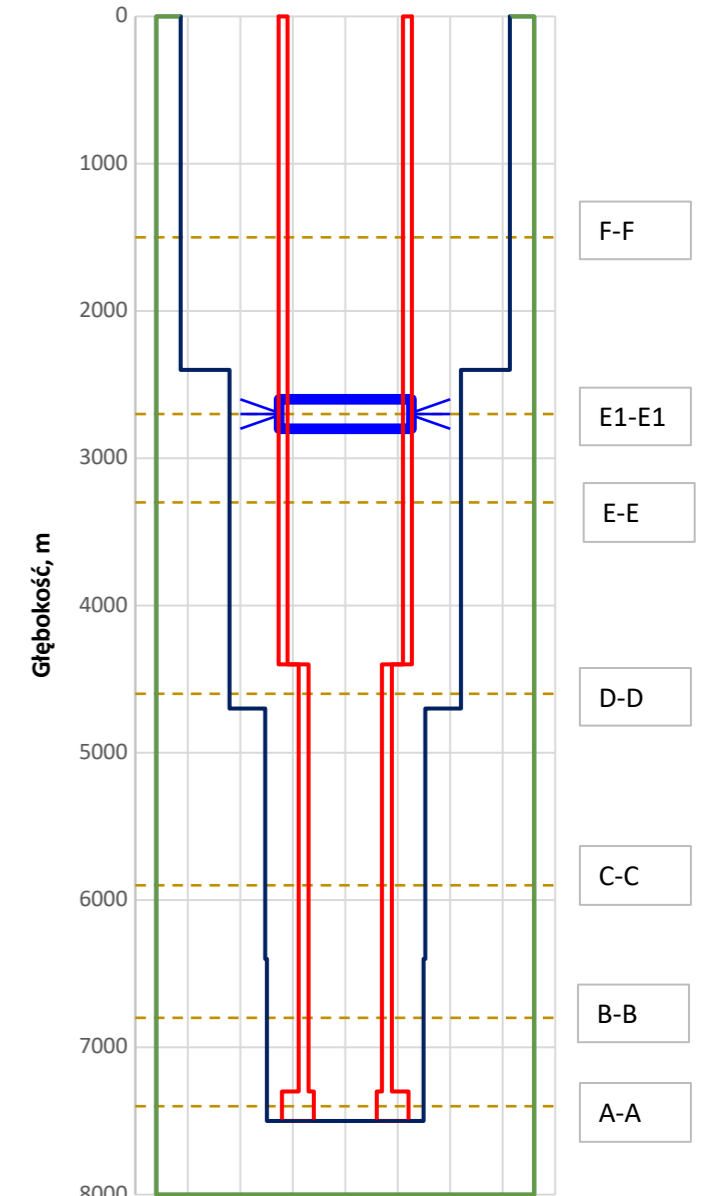
Głębokość od do, m		Nazwa elementu
0	2500	Kolumna I techniczna 13 3/8"
2400	4800	Kolumna II techniczna 9 5/8"
4700	6400	Kolumna III techniczna 7"
6400	7500	Otwór 5 7/8"
	2500	Łącznik z dodatkową dyszą płuczkową
0	4400	Rury płuczkowe (DP 5)
4400	7300	Rury płuczkowe (DP 3 1/2)
7300	7500	Obciążniki (DC 4 3/4)



# PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU PŁUCZKI

4. Analiza prędkości przepływu płuczki w otworze z zastosowaniem dwustopniowego przewodu wiertniczego oraz dodatkowej dyszy, która rozdziela strumień płuczki na dwa równe strumienie

Przekrój	Średnica elementu		Przepływ – 40 l/s	
	D	d	v	Re
	m	m	m/s	[ - ]
F-F	13 3/8	5	0,57	1120
E1-E1	9 5/8	5	1,45	3138
E-E	9 5/8	5	0,72	1117
D-D	9 5/8	3 1/2	0,58	950
C-C	7	3 1/2	1,53	2806
B-B	5 7/8	3 1/2	1,64	3015
A-A	5 7/8	4 3/4	3,05	5204



# WNIOSKI

1. Proces głębiania otworu jest możliwy tylko, gdy zachodzi odpowiednie oczyszczanie dna otworu ze zwiercin.
2. Stosowanie zbyt dużych strumieni objętości płuczki dla uzyskania efektu wynoszenia zwiercin w największej przestrzeni pierścieniowej może prowadzić do wymywania ściany otworu na odcinku kontaktu obciążników ze skałami.
3. Istnieją metody pozwalające stosować kilka kolumn traconych z jednoczesnym zachowaniem należytej prędkości przepływu płuczki wiertniczej.
4. Zastosowanie trzeciego stopnia przewodu wiertniczego nie rozwiązuje problemu niedostatecznego transportu zwiercin.
5. Zastosowanie dodatkowej kolumny rur okładzinowych pozwala uzyskać oczyszczanie dna otworu, przy zachowaniu umiarkowanych prędkości przepływu płuczki na odcinku kontaktu obciążników ze ścianą otworu.
6. Zastosowanie dodatkowej dyszy w przewodzie wiertniczym i rozdzielenie strumienia objętości płuczki na dwa równe strumienie pozwala uzyskać oczyszczanie dna otworu, przy zachowaniu umiarkowanych prędkości przepływu płuczki na odcinku kontaktu obciążników ze ścianą otworu.

# DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

Analiza warunków wynoszenia zwiercin podczas  
wiercenia super głębokiego otworu  
geotermalnego\*\*

**Albert Złotkowski\***

**Iwona Kowalska Kubsik\***

\*Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu

\*\* Prace badawcze zrealizowano w ramach subwencji oświatowej o nr. 16.16.190.779