

**Stanisław Dąbrowski  
Jan Przybyłek**

**Metodyka próbnych pompowań  
w dokumentowaniu zasobów  
wód podziemnych**

**Poradnik metodyczny**



**Warszawa 2005**

Recenzent  
Andrzej Szczepański

Ilustracje  
Zespół autorski

Komputerowe opracowanie ilustracji  
Beata Janiszewska

Korekta  
Piotr Rumatowski

Opracowanie zamówione przez Ministra Środowiska

Wykonane przez:  
HYDROCONSULT Sp. z o.o. Biuro Studiów Badań Hydrogeologicznych  
i Geofizycznych, 60-161 Poznań, ul. Smardzewska 15

Sfinansowano ze środków  
Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

© Copyright by Ministerstwo Środowiska

ISBN 83-86564-53-9

Skład i łamanie:  
Bogucki Wydawnictwo Naukowe  
Górna Wilda 90  
61-576 Poznań  
e-mail: bogucki@bogucki.com.pl  
www.bogucki.com.pl

Druk i oprawa:  
Edica S.A.  
ul. Forteczna 3/5  
61-362 Poznań

## Spis treści

Przedmowa . . . . .	7
1. Znaczenie próbnych pompowań w badaniach hydrogeologicznych . . . . .	15
2. Podstawowe wiadomości o dynamice wód podziemnych . . . . .	19
2.1. Prawo Darcy'ego i wodoprzepuszczalność skał . . . . .	19
2.2. Rodzaje warstw wodonośnych . . . . .	21
2.3. Parametry hydrodynamiczne . . . . .	26
2.4. Równania przepływu wód podziemnych . . . . .	28
2.4.1. Równania ogólne . . . . .	28
2.4.2. Równania dopływu do studni zupełnej . . . . .	29
2.4.2.1. Równania dopływu ustalonego . . . . .	29
2.4.2.2. Równania dopływu nieustalonego . . . . .	34
2.4.3. Wznios zwierciadła wody . . . . .	41
2.5. Granice warstw wodonośnych . . . . .	44
3. Zasady wykonywania próbnego pompowania . . . . .	48
3.1. Przygotowanie badań . . . . .	48
3.2. Zaprojektowanie otworów rozpoznawczych . . . . .	48
3.2.1. Przewidywana wydajność i depresja . . . . .	49
3.2.2. Konstrukcja otworu . . . . .	49
3.2.3. Dobór pompy i odprowadzenie wody z pompowania . . . . .	50
3.3. Otwory obserwacyjne (piezometry) . . . . .	51
3.3.1. Rozmieszczenie, liczba otworów obserwacyjnych . . . . .	51
3.3.2. Odległości otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego . . . . .	54
3.3.3. Głębokość posadowienia filtrów w otworach obserwacyjnych . . . . .	57
3.3.4. Konstrukcje piezometrów . . . . .	58
3.4. Pomiar w czasie próbnego pompowania . . . . .	59
3.4.1. Organizacja i prowadzenie pomiarów . . . . .	59
3.4.2. Pomiar wydajności i zwierciadła wody . . . . .	59
3.4.3. Inne pomiary . . . . .	61
3.5. Zmiany wydajności, przerwy w pompowaniu . . . . .	61
3.6. Czas trwania pompowania . . . . .	62
3.7. Dzienniki próbnego pompowania . . . . .	63
3.8. Wykresy próbnego pompowania . . . . .	66
4. Wyznaczanie parametrów hydraulicznych studni . . . . .	76
4.1. Próbnego pompowania kilkustopniowe z czasem trwania każdego stopnia powyżej doby . . . . .	79
4.2. Krótkotrwałe pompowania jednostopniowe powtarzalne . . . . .	82

5. Metody interpretacji wyników próbnych pompowań w warstwach wodonośnych o nieograniczonym zasięgu . . . . .	87
5.1. Warstwa wodonośna o zwierciadle naporowym . . . . .	87
5.1.1. Nieustalony stan strumienia w warstwie o szczelnym stropie i spągu . . . . .	87
5.1.1.1. Metoda podwójnie logarytmiczna Theisa . . . . .	87
5.1.1.2. Metoda przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba . . . . .	92
5.1.2. Nieustalony stan strumienia w warstwie ze stałym przesiąkaniem . . . . .	95
5.1.2.1. Metoda podwójnie logarytmiczna Waltona . . . . .	95
5.1.2.2. Metoda przybliżenia logarytmicznego Hantusha . . . . .	100
5.1.3. Warstwa wodonośna z nieustalonym przesiąkaniem . . . . .	104
5.1.3.1. Metoda podwójnie logarytmiczna Hantusha . . . . .	104
5.1.3.2. Możliwość zastosowania do obliczeń metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba . . . . .	108
5.1.4. Quasi-ustalony i ustalony stan strumienia . . . . .	110
5.1.4.1. Metoda Dupuita-Thiema . . . . .	110
5.1.4.2. Metoda podwójnie logarytmiczna De Glee . . . . .	113
5.2. Warstwy wodonośne o zwierciadle niezupełnie swobodnym . . . . .	116
5.2.1. Nieustalony stan strumienia – metoda podwójnie logarytmiczna Boultona . . . . .	116
5.2.2. Możliwość zastosowania do obliczeń metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba . . . . .	120
5.3. Warstwy wodonośne o zwierciadle swobodnym . . . . .	121
5.3.1. Pompowanie hydrowęzłowe na wysokim tarasie rzeki Brdy . . . . .	122
5.3.2. Pompowania hydrowęzłowe w Pradolinie Pomorskiej . . . . .	126
5.3.3. Pompowanie hydrowęzłowe warstwy wodonośnej z podwójną porowatością (porowo-szczelinowa) . . . . .	131
6. Metody interpretacji wyników próbnych pompowań w warstwach wodonośnych ograniczonych jednostronnie . . . . .	139
6.1. Warstwa wodonośna z granicą zasilania . . . . .	139
6.2. Warstwa wodonośna z granicą szczelną . . . . .	146
7. Zasady interpretacji wyników pompowań prowadzonych w pojedynczych otworach . . . . .	152
7.1. Wpływ pojemności studni na wyniki obserwacji opadania i wzniosu zwierciadła wody . . . . .	152
7.2. Zeskok zwierciadła i jego określenie z krzywych opadania i wzniosu . . . . .	154
7.2.1. Straty ciśnienia – zeskok zwierciadła wody w otworze pompowanym . . . . .	154
7.2.2. Określenie zeskoku zwierciadła wody . . . . .	155
7.2.2.1. Analiza krzywej $s = f(\lg r)$ . . . . .	155
7.2.2.2. Analiza krzywych $s = f(\lg t)$ z pompowania studni . . . . .	156
7.2.2.3. Analiza krzywej wzniosu $s' = f(\lg t')$ . . . . .	156

---

7.3. Zasady interpretacji filtracji nieustalonej z pompowań pojedynczych otworów . . . . .	157
7.3.1. Różnice między opadaniem i wzniosem zwierciadła wody w otworach pompowanych w porównaniu z otworami obserwacyjnymi . . . . .	157
7.3.2. Informacje hydrogeologiczne uzyskiwane z interpretacji opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworach pompowanych . . . . .	159
7.4. Przykłady interpretacji próbnych pompowań z pojedynczych otworów . . . . .	160
8. Interpretacja wyników próbnych pompowań w złożonych warunkach hydrogeologicznych . . . . .	173
8.1. Warstwy wodonośne o zmienności facjalnej osadów . . . . .	173
8.2. Warstwy wodonośne w pobliżu okien hydrogeologicznych . . . . .	179
8.3. Warstwy wodonośne w dolinach kopalnych . . . . .	184
8.4. Warstwy wodonośne w dolinach rzek . . . . .	198
8.5. Masywy skał szczelinowych . . . . .	210
9. Interpretacja wyników próbnych pompowań zespołowych . . . . .	221
9.1. Kenozoiczne struktury hydrogeologiczne . . . . .	221
9.1.1. Warstwa wodonośna w strefie Wysoczyzny Leszczyńskiej . . . . .	221
9.1.2. Warstwa wodonośna w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej . . . . .	228
9.1.3. Warstwy wodonośne na Pojezierzu Zachodniopomorskim . . . . .	230
9.2. Mezozoiczne masywy skał szczelinowych . . . . .	235
9.2.1. Masyw górnojurajski w rejonie Rawy Mazowieckiej . . . . .	235
9.2.2. Masyw triasowy w rejonie Skarżyska-Kamiennej . . . . .	239
10. Próbne pompowania w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych . . . . .	245
10.1. Wykorzystanie wyników próbnych pompowań do sporządzania prognoz zasobowych . . . . .	247
10.2. Wykorzystanie wyników próbnych pompowań w modelowaniu matematycznym . . . . .	250
11. Programy komputerowe do interpretacji próbnych pompowań . . . . .	255
Literatura źródłowa i uzupełniająca . . . . .	260
Indeks haseł . . . . .	267
Dodatki . . . . .	271
Nomogramy . . . . .	293



## PRZEDMOWA

Próbne pompowania są doświadczeniami terenowymi, na podstawie których oblicza się parametry filtracyjne, określa się schemat zasilania badanej warstwy, formułuje wnioski dotyczące ustalenia zasobów wód podziemnych. Ze względu na ich ważność, a także koszty, muszą one być przedsięwzięciami przemyślanymi, dającymi konkretne efekty badawcze i ekonomiczne. Pierwsze wydanie metodyki ukazało się w 1980 r. i firmowane było przez ówczesny Centralny Urząd Geologii.

Intencją autorów niniejszej metodyki jest przekazanie hydrogeologom praktykom sprawdzonych podczas wieloletnich doświadczeń metod interpretacji próbných pompowań, zasad ich projektowania i wykonywania. W opracowaniu poradnika oprócz materiałów własnych wykorzystano terenowe materiały doświadczalne przedsiębiorstw z całego kraju z badań wykonanych przez: Zbigniewa Balcerkiewicza, Irenę Chęcińską, Krystynę Czaplíńską-Smalczyńską, Czesława Gaika, Leokadię Jałowic, Emilię Jelińską, Mikołaja Karpę, Tadeusza Kłyżę, Marka Kurosza, Henryka Lamperskiego, Dobrochnę Maszońską, Włodzimierza Matuszaka, Wandę Oldyńską, Jana Prażaka, Witolda Rynarzewskiego, Lucjana Safadera, Jądwigę Strumiłło, Jerzego Szenica, Janusza Wojciechowskiego, Grażynę Wójcik, Eugenię Zboralską, Annę Zielińską, Arkadiusza Żarowskiego. Autorzy wyrażają serdeczne podziękowania tym wszystkim koleżankom i kolegom, którzy prowadząc badania terenowe, przyczynili się do uzyskania dokładnych obserwacji z przebiegu próbných pompowań wykorzystanych w niniejszym poradniku.

W poradniku podano zespół podstawowych metod służących do interpretacji wyników pompowań w warunkach filtracji nieustalanej i ustalanej. W stosunku do wydania z 1980 r. poszerzono treść obecnego poradnika o interpretację wyników filtracji nieustalanej z pompowań pojedynczych otworów, wyznaczanie parametrów hydrogeologicznych studni, a także o nowe metody interpretacji prezentowanych wcześniej zagadnień, łącznie z analizą parametryczną wzniosu zwierciadła wody.

W pierwszej części pracy podano podstawowe wiadomości o dynamice wód podziemnych, zasady wykonywania próbných pompowań oraz badania hydrauliki studni. W drugiej części przedstawiono podstawowe metody obliczeń parametrów filtracji w warstwach wodonośnych o nieograniczonym zasięgu wraz z przykładami, metody interpretacji próbných pompowań w warstwach ograniczonych jednostronnie oraz w złożonych układach hydrogeologicznych, w tym pompowań zespołowych. W rozdziale końcowym podano przykłady wykorzystania wyników próbných pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych i identyfikacji modeli matematycznych. Zaprezentowano również przykład możliwości wykorzystania biblioteki programowej w zakresie interpretacji wyników próbných pompowań.

Do pracy dołączono tabele wartości funkcji wykorzystywanych w obliczeniach hydrogeologicznych oraz ich nomogramy, umożliwiające niezależną od bibliotek programowych interpretację wyników pompowań.

Przedmiotowa metodyka jest szczegółowym poradnikiem w zakresie pompowań zasygnalizowanych w „Metodyce określania zasobów eksploatacyjnych ujęć zwykłych wód podziemnych” z 2004 r. Dla jednolitego odbioru treści o badaniach hydrauliki studni, w obu poradnikach przywołano identyczne treści odnoszące się do tego zagadnienia. Jednocześnie Autorzy podkreślają, że oferowany Poradnik metodyczny nie wyczerpuje stopnia złożoności zjawisk opisywanych w szczegółowej literaturze. Z tych względów przytoczono szeroki zestaw zarówno literatury źródłowej jak i uzupełniającej.



## Oznaczenia literowe

### 1. Parametry geometryczne

- $m$  miąższość naporowej warstwy wodonośnej [L], (*m*, nr hasła 492\*)
- $m'$  miąższość warstwy słabo przepuszczalnej [L],
- $h, H$  miąższość swobodnej warstwy wodonośnej, wysokość zwierciadła wody nad spągiem warstwy swobodnej, wysokość naporu hydrostatycznego lub piezometrycznego w warstwie wodonośnej nad poziomem odniesienia [L], (*h*, nr hasła 492\*)
- $L$  szerokość strumienia wód podziemnych [L],
- $v$  prędkość filtracji [ $LT^{-1}$ ], (*v*, nr hasła 740\*)
- $F$  powierzchnia przekroju filtracyjnego [ $L^2$ ]
- $l$  droga filtracji, długość filtru [L]

### 2. Parametry filtracyjne

- $k$  współczynnik filtracji [ $LT^{-1}$ ], (*k*, nr hasła 1287\*)
- $k'$  współczynnik filtracji pionowej warstw słabo przepuszczalnych i półprzepuszczalnych [ $LT^{-1}$ ], (*k'* – w wykazach oznaczeń,  $k_2$ , nr hasła 1288\*)
- $\mu$  współczynnik odsączalności grawitacyjnej, (współczynnik odsączalności, nr hasła 1295\*)
- $\mu_s$  współczynnik odsączalności sprężystej (zasobności sprężystej, magazynowania), (współczynnik pojemności wodnej, współczynnik zasobności – *S*, nr hasła 1297\*)
- $\mu'$  współczynnik odsączalności warstw słabo przepuszczalnych,
- $T$  przewodność [ $L^2T^{-1}$ ], (przewodność warstwy – *T*, nr hasła 794\*)
- $a$  współczynnik piezoprzewodności warstw naporowych lub współczynnik przewodności warstw swobodnych [ $L^2T^{-1}$ ], (przenikliwość hydrauliczna, dyfuzywność hydrauliczna, piezoprzewodność –  $a = T/\mu_s$ , nr hasła 778\*)
- $D = \frac{m'}{k'}$  opór hydrauliczny przesiąkania [T], (oporność filtracyjna pionowa  $\Phi$ , nr hasła 628\*)
- $T' = \frac{k'}{m'}$  współczynnik przeciekania; parametr przesiąkania [ $T^{-1}$ ], (przewodność pionowa warstwy rozdzielającej – *T'*, nr hasła 797\*)
- $J$  spadek hydrauliczny, (gradient hydrauliczny, spadek hydrauliczny – *J*, nr hasła 263\*)

### 3. Parametry obliczeniowe studni

- $Q$  wydajność (wydatek) studni lub ujęcia, objętość przepływu strumienia [ $L^3T^{-1}$ ], (wydajność studni – *Q*, nr hasła 1314\*, natężenie przepływu – *Q*, nr hasła 537\*)
- $q$  wydajność jednostkowa studni, przepływ jednostkowy strumienia [ $L^2T^{-1}$ ] (wydatek jednostkowy studni – *q*, nr hasła 1316\*, przepływ jednostkowy – *q*, nr hasła 781\*)

- $s$  depresja [L], (*depresja zwierciadła wody – s, nr hasła 157\**)  
 $s_w$  depresja rzeczywista (mierzona w warstwie wodonośnej w strefie przyfiltrowej studni, występuje we wzorach na dopływ do studni [L]  
 $\Delta s$  depresja dodatkowa (zeskok hydrauliczny w studni) [L]  
 $s_c$  depresja całkowita =  $s_w + \Delta s$  [L]  
 $s_1, s_2, \dots, s_n$  depresja w kolejnych otworach obserwacyjnych lub na kolejnych stopniach dynamicznych pompowania [L]  
 $r_o$  promień studni [L], (*promień efektywny (studni) –  $r_o$ , nr hasła 760\**)  
 $d$  średnica studni, rozstaw między studniami lub odległość do granicy warstwy [L], (*d, nr hasła 1040\**)  
 $r_1, r_2, \dots, r_n$  odległość otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego [L]  
 $R$  promień leja depresyjnego [L], (*R, nr hasła 762\*, lej depresji, nr hasła 434\**)

#### 4. Funkcje

$K_o\left(\frac{r}{B}\right) = K_o(x)$  zmodyfikowana funkcja Bessela II stopnia rzędu zerowego

$W(u) = -E_i(u)$  całkowa funkcja wykładnicza, zwana funkcją Theisa dla warstw naporowych

$u$  argument funkcji charakterystycznej:  $u = \frac{r^2 \mu}{4Tt} = \frac{r^2}{4at}$

$W\left(u, \frac{r}{B}\right)$  funkcja charakterystyczna Hantusha dla schematu przesiąkania

$W(u, \psi)$  funkcja przesiąkania (przesączania) Hantusha z uwzględnieniem odsączania wody z warstwy słabo przepuszczalnej

$E\left(z, \frac{r}{B}\right)$  zmodyfikowana funkcja Theisa i Hantusha do obliczeń

$z$  argument funkcji  $E\left(z, \frac{r}{B}\right)$ ,  $z = \frac{1}{4u}$

$W\left(u_A, u_V, \frac{r}{B}\right)$  funkcja Boultona dla warstw swobodnych z opóźnionym odsączaniem

$\phi = \left(u, \frac{r}{d}\right)$  funkcja studni dla warstw jednostronnie ograniczonych

$d$  odległość otworu obserwacyjnego od granicy warstwy wodonośnej [L]

$B = \sqrt{\frac{T \cdot m'}{k'}}$  współczynnik przesiąkania (przesączania) [L]

$B_1 = \sqrt{\frac{T}{\alpha \mu}}$  współczynnik opóźnionego odsączania warstw swobodnych

$$\psi = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{TD}} \cdot \frac{\mu'}{\mu_s} \text{ argument funkcji } W = (u, \psi)$$

$$\frac{1}{\alpha}$$

wskaznik opóźnienia we wzorze Boultona

$c$

współczynnik kierunkowy prostej w rozwiązaniach na wykresach półlogarytmicznych







$A$

poprawka Jacoba

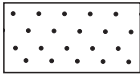


\* (wg Słownika hydrogeologicznego, PIG Warszawa 2002)

## Oznaczenia graficzne






### 1. Otwory hydrogeologiczne

	otwory rozpoznawcze
	otwory obserwacyjne (piezometry)
	inne otwory hydrogeologiczne
	środek ciężkości eksploatacji zespołu studzien
	przedziały filtrowania otworów rozpoznawczych i piezometrów
	linie przekrojów geologicznych

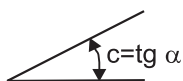
### 2. Typy warstw

	warstwy wodonośne
	warstwy słabo przepuszczalne
	warstwy nieprzepuszczalne

### 3. Znaki hydrodynamiczne

	kierunek przepływu wody w warstwie wodonośnej
	przepływ wody w warstwie słabo przepuszczalnej
	ustalone zwierciadło wody podziemnej
	linia ciśnień piezometrycznych
	wielkość naporu (ciśnienia piezometrycznego) w warstwach wodonośnych

#### 4. Oznaczenia na wykresach



nachylenie prostej odpowiadającej względem osi  
odciętych na wykresach półlogarytmicznych



punkty arbitralne „A” na wykresach doświadczalnych  
podwójnie logarytmicznych

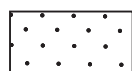
#### 5. Znaki litologiczne



gleba



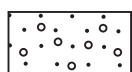
piaski drobnoziarniste



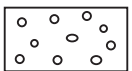
piaski średnioziarniste



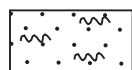
piaski gruboziarniste



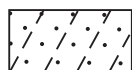
piaski ze żwirem



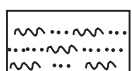
żwir



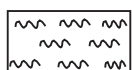
piaski mułkowate



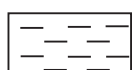
piaski zaglinione



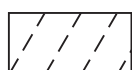
muły i mułki piaszczyste




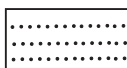
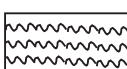
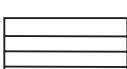
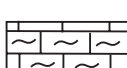
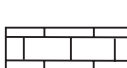


muły i mułki



iły



gliny

	gliny morenowe
	piaskowce
	mułowce
	iłowce
	margle
	wapienie
	torfy
	węgle brunatne

## 6. Znaki stratygraficzne

H	holocen	plejstocen	czwartorzęd, Q
G <sub>IV</sub>	złodowacenie bałtyckie (Wisły)		
J <sub>III/IV</sub>	interglacjał eemski		
G <sub>III</sub>	złodowacenia środkowopolskie		
J <sub>II/III</sub>	interglacjał wielki (mazowiecki)		
G <sub>II</sub>	złodowacenia południowopolskie		
Trp	górny miocen i pliocen	neogen	trzeciorzęd, Tr
Trm	miocen		
Tro	oligocen	paleogen	
Kg	kreda górna	kreda, K	
Kd	kreda dolna		
Jm	malm	jura, J	
Jd	dogger		
Jl	lias		
█	uskoki		

# 1. ZNACZENIE PRÓBNYCH POMPOWAŃ W BADANIACH HYDROGEOLOGICZNYCH

Próbne pompowania w praktyce hydrogeologicznej są stosowane powszechnie. Nie ma właściwie regionu hydrogeologicznego (poza obszarami górskimi), na którym tego typu badania nie byłyby prowadzone. Z drugiej jednak strony sposób przeprowadzania pompowań oraz zakres stosowanych metod interpretacji ich wyników w wielu jeszcze przypadkach nie odpowiada współczesnym potrzebom badawczym.

Podstawowym zadaniem dla próbnego pompowania jest uzyskanie, poprzez czerpanie wody ze studni, hydrodynamicznej reakcji warstwy wodonośnej, która to reakcja umożliwi identyfikację parametrów filtracyjnych warstwy, parametrów funkcjonowania studni i warunków jej zasilania. Konieczność i waga tego typu badań nie podlega dyskusji. Autorzy podręczników z dziedziny hydrogeologii stosowanej podkreślają potrzebę wysokiej staranności przy wykonaniu próbnego pompowań (Castany 1968, 1982). Równorzędnym zadaniem w trakcie próbnego pompowania jest pobór próbek wody podziemnej z uaktywnionej strefy jej dopływu do otworu rozpoznawczego. Woda ta jest poddawana następnie laboratoryjnej analizie fizyczno-chemicznej i bakteriologicznej, a często również analizie technologicznej w związku z koniecznością określenia technicznych warunków jej uzdatniania. Całość badań hydrodynamicznych i hydrochemicznych prowadzonych w trakcie próbnego pompowań ma na celu ustalenie ilości i jakości wody podziemnej, stanowiącej zasoby eksploatacyjne dokumentowanego ujęcia oraz określenie warunków jego eksploatacji i ochrony.

Poprzez próbne pompowania mogą być zrealizowane następujące cele badawcze ze wzrastającym stopniem ich złożoności:

- określenie charakterystyk w zakresie interakcji: studnia – warstwa wodonośna,
- zbadanie studni w aspekcie jej przyszłego wyposażenia eksploatacyjnego i racjonalnej eksploatacji,
- terenowe pomiary parametrów hydrodynamicznych warstwy wodonośnej: przewodności hydraulicznej ( $T$ ), współczynnika filtracji, współczynnika odsączalności grawitacyjnej ( $\mu$ ) lub odsączalności sprężystej ( $\mu_s$ ),
- ilościowa ocena szczególnych charakterystyk warstwy wodonośnej, jak: proces przesiąkania wody z warstw sąsiednich, test jej warunków granicznych, heterogeniczność osadów wodonośnych itd.,
- przeprowadzenie terenowych, a więc bezpośrednich testowych obserwacji skutków poboru wody z warstwy wodonośnej, w tym identyfikacja rozwoju depresji w zależności od wydatku studni oraz określenie wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęcia wód podziemnych, w tym ich parametrów jakościowych,
- współdziałanie studni i ujęć.

Część z tych celów może być osiągnięta wyłącznie poprzez przeprowadzenie pompowania w węzłach hydrogeologicznych zawierających – oprócz pompowanej studni – co najmniej jeden piezometr.

Ważne jest naświetlenie już w tym miejscu ogólnego mechanizmu powstawania lejów depresji w wyniku pompowania studni, aby wskazać na możliwości, które stwarza ten rodzaj badań terenowych. Założenia wynikające ze stosowanych metod interpretacji próbnych pompowań wymagają, aby początkowa statyczna powierzchnia zwierciadła wody podziemnej była pozioma; w praktyce prawie pozioma (o minimalnym spadku hydraulicznym). Wówczas oś tworzącego się lejów depresji zbiega się z osią studni wierconej i powstaje obraz o koncentrycznym układzie okręgów względem osi studni, wyrażających wielkości depresji, malejącej przy oddalaniu się od studni. W warstwie wodonośnej o zwierciadle swobodnym poborowi wody towarzyszy jej osuszenie w strefie objętej wpływem lejów depresji. W przypadku warstwy naporowej układ linii ekwipotencjalnych ma charakter fizycznie fikcyjny, warstwa ta bowiem nadal pozostaje naporowa, a więc jest całkowicie zawadniona, jedynie ma miejsce zmiana potencjału hydrodynamicznego, wyrażona obniżeniem ciśnienia piezometrycznego panującego w danej warstwie wodonośnej o napiętym zwierciadle wody. Lej depresji jest przedstawiony na przekroju przez krzywą depresji. Doświadczenie w postaci próbnego pompowania ze stałym wydatkiem polega w pierwszym etapie na pomiarach opadania zwierciadła wody podziemnej w czasie jego trwania i śledzeniu tendencji do powstania ruchu quasi-ustalonego. Po zatrzymaniu pompowania ma miejsce drugi etap badawczy, polegający na przeprowadzeniu pomiarów **wzniosu** zwierciadła podczas okresu, w którym warstwa wodonośna wraca do stanu swojej pierwotnej równowagi hydrodynamicznej (rys. 1.1). Zmieniający się w trakcie pompowania poziom zwierciadła wody podziemnej jest nazywany „poziomem dynamicznym”.

Czynnikami decydującymi o wymiarach lejów depresji przy stałym wydatku pompowania są:

- parametry hydrodynamiczne: przewodność hydrauliczna ( $T$ ) i współczynnik odsączalności grawitacyjnej ( $\mu$ ) lub odsączalności sprężystej ( $\mu_s$ ), czas pompowania ( $t_p$ ),
- charakter przepływu (laminarny, turbulentny, nieustalony, quasi-ustalony).

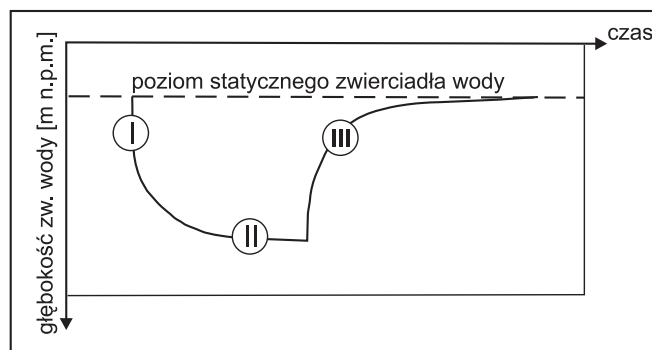
Poza nielicznymi przypadkami bardzo wysokiej przewodności warstwy wodonośnej lub występowania w sąsiedztwie ujęcia granicy zasilającej, ustalanie się warunków przepływu wód podziemnych jest procesem bardzo długotrwałym.

Ze względu na uprzednio wymienione cele oraz sposób wykonania badań przyjmuje się następujący podział próbnych pompowań:

- pompowania indywidualne,
- pompowania hydrowęzłowe,
- pompowania zespołowe.

**Pompowania indywidualne** prowadzi się w pojedynczych otworach rozpoznawczych w celu określenia zależności między wydatkiem i depresją, co pozwala ustalić hydrauliczne cechy ujęcia i orientacyjne parametry hydrogeologiczne warstwy wodonośnej w otoczeniu otworu.





Rys. 1.1. Wykres próbnego pompowania  $s=f(t)$ : I – krzywa opadania, II – odcinek stabilizacji dynamicznej, najczęściej nie osiągną w czasie krótszych pompowań, III – krzywa wzniosu

**Pompowania hydrowęzłowe** prowadzi się w pojedynczych otworach rozpoznawczych lub w określonych przypadkach w grupie otworów blisko siebie położonych ( $r < m$ ) przy jednoczesnej obserwacji zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych. Pompowania te są testami warstw wodonośnych i mają na celu identyfikację ich typu hydrodynamicznego, określenie parametrów filtracyjnych i często charakteru granic badanej struktury.

**Pompowania zespołowe** prowadzi się przy eksploatacji większej liczby otworów rozpoznawczych, które są przeznaczone do wykorzystania jako studnie przyszłego ujęcia w celu doświadczalnego sprawdzenia wydajności i ustalenia wielkości depresji w warunkach użytkowej eksploatacji tego ujęcia oraz w celu określenia składników zasilania jego zasobów eksploatacyjnych.

Wybór rodzaju pompowania jest związany z zamierzonym zadaniem dokumentacyjnym oraz stopniem skomplikowania warunków hydrogeologicznych.

Próbne pompowania w ocenie parametrów warstw wodonośnych są nie do zastąpienia, ponieważ dostarczają danych z natury rzeczy uśrednionych – przestrzennych, a więc w skali, w której parametry te funkcjonują w późniejszej eksploatacji ujęcia. Fakt ten jest często podkreślany przez hydrogeologów zajmujących się oceną zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych (Pleczyński, Przybyłek, 1974; Szymanko, 1972, 1980). Sternberg (1971), analizując metody oceny parametrów warstw wodonośnych, wskazuje, że badania laboratoryjne próbek skalnych mogą dostarczyć wprawdzie informacji o porowatości, odsączalności i współczynniku filtracji, które nazywa się mikrowłaściwościami wodonośca, lecz nawet wielka liczba tych próbek nie jest w stanie zrównoważyć wartości parametrów uzyskiwanych z próbnymi pompowaniami w hydrowęzłach, które są reprezentatywne dla całej warstwy wodonośnej i jej otoczenia. Parametry te nazywa się makrowłaściwościami wodonośca.

Y. Emsellem (1975) wskazuje na istotne znaczenie średnich wartości typu „makro” przy dyskretyzacji obszaru, przy czym zwraca uwagę, że przyroda wykazuje o wiele większą niejednorodność w skali „mikro”. Przepuszczalność skał jest bardzo zmienna, gdy się bada i porównuje sąsiadujące ze sobą bloki o boku 1 m, natomiast średnia przepuszczalność bloków górotworu o boku 500 m wykazuje zmienność o wiele mniejszą. B.W. Borewski (1971) podkreśla, że wśród obliczeniowych para-

Tabela 1.1. Parametry hydrogeologiczne

Parametry warstwy	Parametry wody	Parametry filtracyjne i hydrodynamiczne
- Miąższość $m$	- Ciężar właściwy $\gamma$	- Wysokość hydrauliczna $H$
- Współczynnik porowatości $n$	- Gęstość $\rho$	- Przewodność $T$
- Współczynnik przepuszczalności $k_p$	- Współczynnik ściśliwości $\beta_w$	- Współczynnik filtracji $k$
- Współczynnik ściśliwości $\beta_s$	- Współczynnik rozszerzalności cieplnej $\beta_t$	- Współczynnik odsączalności sprężystej $\mu_s$
	- Lepkość dynamiczna $\eta$	- Współczynnik odsączalności grawitacyjnej $\mu$
	- Moduł sprężystości wody $E_w$	- Współczynnik piezoprzewodności $a = \frac{T}{\mu_s}$ lub
		przewodności $a = \frac{T}{\mu}$
		- Współczynnik jednostkowej pojemności sprężystej $\beta$

metrów hydrogeologicznych (tab. 1.1), określających cechy skały wodonośnej, właściwości i parametry cieczy oraz parametry filtracyjne środowiska hydrogeologicznego, te ostatnie (kolumna trzecia tab. 1.1) są możliwe do oceny wyłącznie na drodze analizy hydrodynamicznej, i to głównie przez obserwację zjawisk wywołanych próbnym pompowaniem.

Równie ważne jak określenie parametrów ujętej warstwy wodonośnej jest określenie granic strukturalnych i hydrodynamicznych oraz warunków zasilania ujęcia w badanej strukturze hydrogeologicznej w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych. Zasoby eksploatacyjne w strukturach ograniczonych są bowiem zależne od parametrów osadów otaczających i nadległych, a w strukturach otwartych od zdolności i wielkości infiltracji. Zjawiska te mogą być zbadane podczas prowadzenia dłuższych pompowań hydrowęzłowych lub przez wykonywanie pompowań zespolonych, a także analizy eksploatacji czynnych ujęć.

## 2. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O DYNAMICE WÓD PODZIEMNYCH

Wody podziemne są w stałym ruchu, przebywając drogę w przepuszczalnych formacjach skalnych z różną prędkością i natężeniem od stref zasilania do stref drenażu naturalnego lub sztucznego. Ruch wody w ośrodkach porowatych i szczelinowatych nazywamy filtracją, jeżeli zachowany jest przepływ o charakterze laminarnym, a nawet linearnym. Proces filtracji rozwija się wskutek zaistnienia różnicy ciśnień (wysokości hydraulicznych) w granicach systemu hydrodynamicznego. A ponieważ próbną pompowanie zawsze wywołują zróżnicowanie wysokości hydraulicznych poprzez obniżenie zwierciadła wody (zjawisko depresji) wskutek jej poboru z warstwy wodonośnej, nieodzowne jest przypomnienie podstawowych wiadomości z dynamiki wód podziemnych.

### 2.1. Prawo Darcy'ego i wodoprzepuszczalność skał

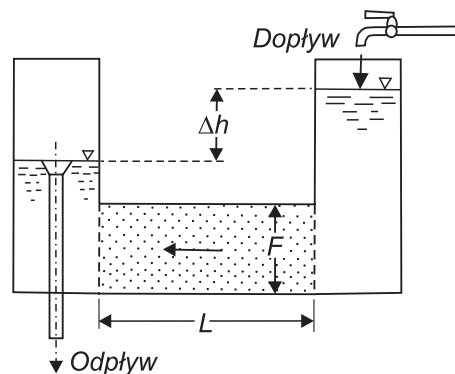
Ilustracją filtracji wód podziemnych jest doświadczenie H. Darcy'ego z 1856 r. (rys. 2.1), który pierwszy eksperymentalnie określił wydatek strumienia filtracyjnego  $Q$  [ $L^3T^{-1}$ ], łącząc ten wydatek w zależność równania liniowego z powierzchnią pola filtracji  $F$  [ $L^2$ ] (np. przekrój poprzeczny warstwy wodonośnej) i wielkością spadku hydraulicznego  $J$  [-]:

$$Q = k \cdot F \cdot J \quad [2.1]$$

Podana w równaniu [2.1] wielkość  $k$  [ $LT^{-1}$ ] – miara proporcjonalności – nazwana została współczynnikiem filtracji, który w sposób istotny zależy od rodzaju skały, właściwości cieczy i od stopnia nasycenia skały. Właściwości filtracyjne samej skały charakteryzuje współczynnik przepuszczalności  $k_p$ , który ze współczynnikiem filtracji związany jest zależnością  $k_p = k \cdot \left(\frac{\eta}{\rho}\right)$ .

W podanej zależności  $\eta$  oznacza lepkość dynamiczną [ $ML^{-1}T^{-1}$ ], a symbol  $\rho$  – gęstość [ $ML^{-3}$ ].

Po wprowadzeniu do równania [2.1] pojęcia prędkości  $v$  otrzymamy



Rys. 2.1. Doświadczenie Darcy'ego (z Bieske, 1973)

matematyczny wyraz podstawowego prawa filtracji, zwanego liniowym prawem filtracji lub krótko prawem Darcy'ego:

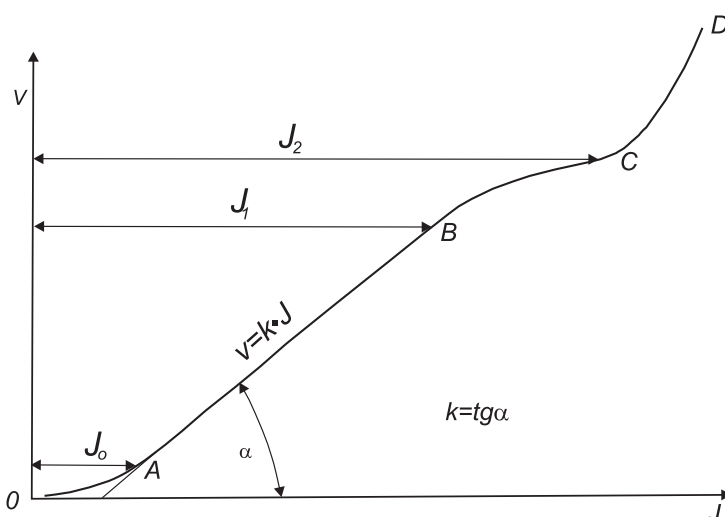
$$v = \frac{Q}{F} = k \cdot J \quad [2.2]$$

Na prawie tym opiera się dynamika wód podziemnych w środowisku hydrogeologicznym, z tym zastrzeżeniem, że jest ono ważne jedynie dla ruchu laminarnego. Istnieją bowiem granice stosowalności prawa Darcy'ego. Na rysunku 2.2 przedstawiono wykres  $v = f(J)$ , a więc zależność prędkości filtracji od gradientu ciśnienia (wysokości hydraulicznej). Na wykresie zaznaczono trzy krytyczne punkty A, B, C oraz odpowiadające im gradienty krytyczne  $J_0, J_1, J_2$  i prędkości filtracji  $v_0, v_1, v_2$ . Prawo Darcy'ego nie ma zastosowania w skałach o wysokiej przepuszczalności, a więc w osadach żwirowo-kamienistych oraz w skałach makroszczelinowatych, w których prędkość przepływu jest wysoka (wycinek BC); w tych skałach ruch laminarny jest zastąpiony przez ruch turbulentny.

Ruch turbulentny został w przepływie wód podziemnych związany z pojęciem współczynnika fluacji  $k_f$  [L/T], który jest zawarty w równaniu nieliniowym Chezy-Krasnopolskiego (Pazdro, Kozerski, 1990; Kulma, 1995):

$$v = k_f \sqrt{J} \quad [2.3]$$

Stwierdzono przy tym, że przy bardzo dużych gradientach ciśnienia (wysokości hydraulicznej) i prędkości przepływu zachodzi intensywne wymywanie cząstek skalnych i niekiedy znaczny wzrost prędkości przepływu przy małych przyrostach gradientu (wycinek CD). Dolna granica stosowalności prawa Darcy'ego przebiega w osadach bardzo słabo przepuszczalnych, w których na skutek dodatkowego od-



Rys. 2.2. Zależność prędkości filtracji od gradientu ciśnienia wg Wierygina i in. (1977)

działywania sił molekularnych może nastąpić również przepływ o charakterze nieliniowym (wycinek OA). Część badaczy (Ossowski, 1985) wykazuje, że w osadach bardzo słabo przepuszczalnych (iły) przy zachowaniu nieruchomości szkieletu gruntowego, filtracja odbywa się zgodnie z liniowym prawem Darcy'ego i nie występuje początkowy spadek hydrauliczny  $J_0$ .

Niezgodności zjawisk przepływu w stosunku do prawa Darcy'ego na obszarze dużych prędkości mają na ogół charakter lokalny (strefy przyfiltrów wokół studni) lub dotyczą rzadko spotykanych warunków hydrogeologicznych (np. masywy skał magmowych z makroszczelinami). Na obszarach małych prędkości odchylenia od liniowego prawa filtracji dotyczą głównie utworów półprzepuszczalnych i słabo przepuszczalnych i mają znaczenie przy analizie przepływu z przesiąkaniem się wody z warstw sąsiednich do ujętej warstwy wodonośnej w trakcie próbnego pompowania studni i później przy jej użytkowej eksploatacji.

Bliższy opis wyników badań i analiz granic stosowalności prawa Darcy'ego znajdzie Czytelnik w pracach Macioszczyka (1973), Szczepańskiego (1977), Kulmy (1995) i Ossowskiego (1985).

W hydrogeologicznych klasyfikacjach skał bierze się pod uwagę ich wodoprzepuszczalność wyrażoną współczynnikiem filtracji poziomej ( $k$ ) przy określaniu wodonośności ujmowanych warstw oraz współczynnikiem filtracji pionowej ( $k_z=k'$ ) w przypadku określania cech hydraulicznych nadkładu nad ujmowaną warstwą wodonośną (izolacyjność, przesiąkalność). W tabeli 2.1 przytoczono przykład tego rodzaju klasyfikacji, która może być również przydatna dla wstępnej schematyzacji środowiska hydrogeologicznego stwierdzonego w wykonanych otworach rozpoznawczych przed przystąpieniem do zaprojektowania w nich próbnych pompowań.

## 2.2. Rodzaje warstw wodonośnych

Przy schematyzacji warunków hydrogeologicznych dla potrzeb opisowych i obliczeniowych bierze się pod uwagę zarówno wzajemne powiązania, jak i odrębności pomiędzy stwierdzonymi w wierceniach zespołami skalnymi, które w szeroko rozumianym środowisku hydrogeologicznym decydują o warunkach uprzywilejowanego przepływu wód podziemnych. Powszechnie przyjętym terminem jest pojęcie: warstwa wodonośna, którą zdefiniowano (Pazdro, Kozerski, 1990; Dowgiałło i in., 2002) jako zbiorowisko wód podziemnych związane z warstwowanymi utworami skalnymi o znacznym rozprzestrzenieniu i o określonej miąższości, ograniczone od góry zwierciadłem wód podziemnych (warstwy o zwierciadle swobodnym) lub nieprzepuszczalnym stropem (warstwy naporowe), a od dołu nieprzepuszczalnym spągłem (lub podstawą). W szerszym znaczeniu za warstwę wodonośną uznaje się też strefę utworów przepuszczalnych nasyconych wodą nie związaną z uwarstwieniem skał (np. strefa spękań w obrębie margli i wapieni kredowych, strefa skrasowienia utworów węglanowych) cechujących się pojemnością i przewodnością dostateczną do tworzenia się strumienia wód podziemnych i ujęcia tych wód dla celów eksploatacyjnych.

Tabela 2.1. Klasyfikacja właściwości filtracyjnych skał (według Witczak, Adamczyk, 1994 – zmodyfikowana)

Rodzaj skał	Filtracja pozioma		Filtracja pionowa		
	Współczynnik filtracji [m/s]	Klasa przepuszczalności	Współczynnik filtracji [m/s]	Klasa	
				izolacyjność	prześlakalność
Rumosze, żwiry, żwiry piaszczyste, piaski gruboziarniste, skały zwięzłe z bardzo gęstą siecią szczelin i spękań, skrasowiałe	$> 10^{-3}$	bardzo wysoka (bardzo dobrze przepuszczalne)	$> 10^{-6}$	nieizolujące	bardzo dobra
Piaski grubo-, różnoziarniste, słabo spojone piaskowce, skały zwięzłe z gęstą siecią spękań i szczelin nadkapilarnych	$10^{-4}-10^{-3}$	wysoka (dobrze przepuszczalne)			
Piaski drobnoziarniste jednorodne, różnoziarniste niejednorodne, lessy, skały zwięzłe z siecią szczelin nadkapilarnych	$10^{-5}-10^{-4}$	średnia (średnio przepuszczalne)			
Piaski pylaste i gliniaste, pyły piaszczyste, mułki, skały zwięzłe z rzadką siecią szczelin i spękań	$10^{-6}-10^{-5}$	słaba (słabo przepuszczalne)			
Gliny piaszczyste, ily piaszczyste, namuły, mułowce, skały słabo szczelinowe, mikroporowate	$10^{-8}-10^{-6}$	niska (bardzo słabo przepuszczalne)	$10^{-8}-10^{-6}$	bardzo słabo izolujące	dobra
Gliny pylaste, ily piaszczyste, iłowce, łupki ilaste, skały zwięzłe niespękane, mikroporowate	$10^{-12}-10^{-8}$	bardzo niska (półprzepuszczalne)	$10^{-10}-10^{-8}$	słabo izolujące	średnia
Iły, skały zwięzłe niespękane, bez szczelin			$10^{-12}-10^{-10}$	dobrze izolujące	słaba
Iły zwięzłe, b. grube kompleksy skał zwięzłych niespękanych, bez szczelin	$< 10^{-12}$	nieprzepuszczalne	$< 10^{-12}$	bardzo dobrze izolujące	brak

Z praktyki badań hydrogeologicznych wynika, że warstwy wodonośne ze względu na charakter swojego spągu i stropu oraz warunki zasilania mogą istnieć jako warstwy pojedyncze lub wchodzić w związki z innymi warstwami, tworząc poziomy wodonośny: dwu- i wielowarstwowe. Z hydrodynamicznego punktu widzenia poziom wodonośny tworzy zespół dwu lub więcej warstw, które pozostają ze sobą w więzi hydraulicznej. Na rysunku 2.3 przedstawiono, oprócz warstw pojedynczych (fig. 1a i fig. 1b) spotykane poziomy dwuwarstwowe o zróżnicowanym stopniu wzajemnej więzi hydraulicznej.

Rysunek 2.3, figury 2a i 2b, pokazuje poziomy wodonośny tworzące układy złożone z warstw o pełnej więzi hydraulicznej, co ma najczęściej miejsce, gdy na siebie są nałożone osady wodonośne różnych cykli sedymentacyjnych i pięter strukturalnych, różniących się parametrami filtracyjnymi lub charakterem występowania wód, np. wody porowe na kontakcie z wodami szczelinowymi. Liczne przykłady tego typu poziomów związane są z dolinami rzecznyymi, w których podłożu występują skały szczelinowe kredy lub jury.

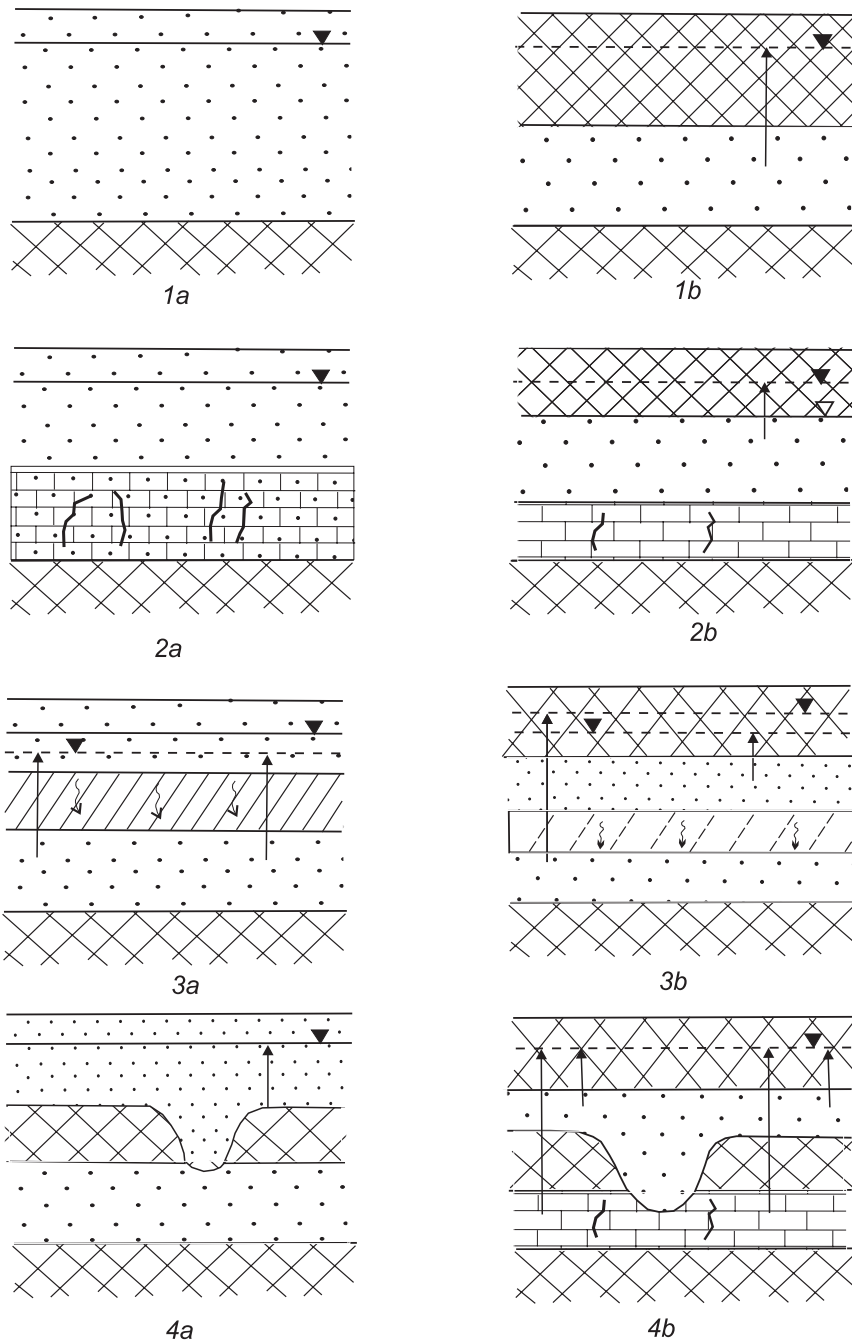
Rysunek 2.3, figury 3a i 3b, pokazuje poziomy wodonośny tworzące układy złożone z warstw o ograniczonej więzi hydraulicznej poprzez osady słabo przepuszczalne (półprzepuszczalne – proces przesiąkania).

Rysunek 2.3, figury 4a i 4b, ilustruje poziomy wodonośny o strefowej więzi hydraulicznej warstw wodonośnych poprzez okna hydrogeologiczne (4a) czy też strefowe nieciągłości erozyjne w warstwie rozdzielającej (4b).

Wracając do schematu poziomów wodonośnych o ograniczonej więzi hydraulicznej (rys. 2.3, figury 3a i 3b), należy pamiętać, że pojęcie warstwy słabo przepuszczalnej jest bardzo szerokie, ponieważ przedział przepuszczalności skał pomiędzy osadami nieprzepuszczalnymi i przepuszczalnymi jest bardzo wielki, rzędu  $10^5$  (patrz: tabela 2.1). W rozważaniach hydrodynamicznych za warstwy słabo przepuszczalne uznaje się te, których współczynnik filtracji jest ponad 100-krotnie mniejszy od współczynnika filtracji przyległej warstwy wodonośnej, lecz jednocześnie cechują się znaczną pojemnością wody wolnej (Neuman, 1975; Boulton, Streltsova, 1975). Pojęcie warstwy półprzepuszczalnej wprowadzono dodatkowo – w związku z rozpatrywaniem przepływów międzywarstwowych – dla oznaczenia warstwy słabo przepuszczalnej, w której pojemność wody wolnej jest znikoma i nie uwzględnia się w niej przepływu poziomego, lecz jedynie pionowy, przy czym  $k' \leq k$ . Warstwa półprzepuszczalna odgrywa więc w przepływach międzywarstwowych jedynie rolę przekaźnika wody, przenoszonej z jednej do drugiej warstwy wodonośnej, w warunkach zaistnienia różnicy ciśnień hydrodynamicznych.

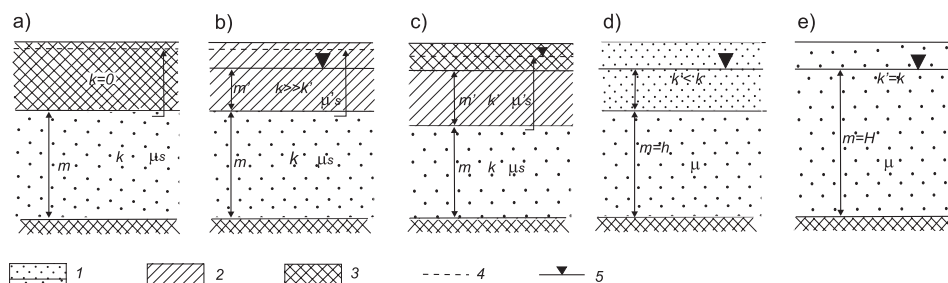
Na podstawie zróżnicowania cech warstw wodonośnych i ich nadkładu wydziela się zwykle pięć podstawowych typów hydrodynamicznych (rys. 2.4).

**Warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym (naporowym rys. 2.4.a).** W jej spągu i stropie występują warstwy nieprzepuszczalne ( $k' = 0$ ). Ponieważ ciśnienie wody na strop warstwy przewyższa ciśnienie atmosferyczne, poziom wody w studniach ujmujących warstwę o zwierciadle naporowym podnosi się ponad spąg górnej warstwy izolującej, odzwierciedlając wysokość naporu w danym punkcie strumienia wody podziemnej.



Rys. 2.3. Warstwy wodonośne pojedyncze (1a, 1b) oraz poziomy wodonośne dwuwarstwowe o pełnej (2a, 2b) lub ograniczonej (3a, 3b) więzi hydraulicznej oraz o więzi strefowej przez okna hydrogeologiczne (4a, 4b)





Rys. 2.4. Typy hydrodynamiczne warstw wodonośnych wg G.P. Krusemana i I.A. de Riddera (1973): warstwy naporowe: a – o zwierciadle napiętym, b – o zwierciadle niezupełnie napiętym; c – o zwierciadle wewnątrznie niezupełnie napiętym, warstwy swobodne: d – o zwierciadle niezupełnie swobodnym, e – o zwierciadle swobodnym; 1 – osady wodonośne, 2 – osady słaboprzepuszczalne, 3 – osady nieprzepuszczalne, 4 – linia ciśnienia piezometrycznego, 5 – swobodne zwierciadło wody

**Warstwa wodonośna o zwierciadle niezupełnie napiętym (rys. 2.4.b)** ma w spągu warstwę nieprzepuszczalną, a w stropie warstwę półprzepuszczalną ( $k' < k$ ). Ciśnienie panujące w warstwie wodonośnej powoduje wnikanie jej wody w nadkład półprzepuszczalny na pewną wysokość, znacznie jednak mniejszą, aniżeli wynosi wielkość naporu zmierzona w studni. Warstwa półprzepuszczalna charakteryzuje się wprawdzie ograniczoną przepuszczalnością, ale możliwą do zmierzenia i odgrywającą niepoślednią rolę w warunkach regionalnego zasilania i drenażu warstw wodonośnych. Ze względu na niską przepuszczalność pomija się w obliczeniach przepływ poziomy w warstwie półprzepuszczalnej.

**Warstwa wodonośna o wewnątrznie niezupełnie napiętym zwierciadle wody (rys. 2.4.c)** posiadająca w stropie i spągu warstwy nieprzepuszczalne. Warstwa tego typu cechuje się zróżnicowaną wodoprzepuszczalnością, przy czym warstwa podstawowa ma charakter uprzywilejowany w przepływie poziomym, a warstwa towarzysząca jest o gorszej przepuszczalności bez stosunkowo dużej pojemności.

**Warstwa wodonośna o zwierciadle niezupełnie swobodnym (rys. 2.4.d)** występuje wówczas, gdy wodoprzepuszczalność osadów w jej nadkładzie różni się znacząco, o jeden lub dwa rzędy wielkości ( $k' < k$ ), lecz nie wielokrotnie ( $k' \ll k$ ) od przepuszczalności warstwy podstawowej. Pojemność wody wolnej słabiej przepuszczalnego nadkładu tej warstwy jest wtedy na tyle duża, że ujawnia się w trakcie pompowania w postaci uzupełniającego dopływu, a następnie zjawiska opóźnionej odsączalności grawitacyjnej.

**Warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym (rys. 2.4.e)** jest częściowo wypełniona wodą. Spąg jej stanowi nieprzepuszczalne podłoże, a zwierciadło wody jest powierzchnią graniczną strefy pełnego nasycenia. Jest ono swobodne, ponieważ jego ułożenie jest uwarunkowane stanem równowagi wobec sił działających na wodę podziemną – przede wszystkim siły ciężkości i oporu środowiska (Pazdro, Kozerski, 1990). Zwierciadło wody w studni występuje na tej samej wysokości, co w warstwie wodonośnej.

### 2.3. Parametry hydrodynamiczne

**Przewodność warstwy wodonośnej**  $T$  określa ilość wody przepływającej w jednostce czasu przez warstwę o miąższości  $m$ , przy szerokości strumienia 1 m i spadku hydraulicznym równym jedności. Jest to iloczyn współczynnika filtracji  $k$  i miąższości warstwy wodonośnej  $m$ :

$$T = k \cdot m [L^2 T^{-1}].$$

Można ją wyznaczyć na podstawie wyników próbnego pompowania lub obliczyć.

**Współczynnik odsączalności sprężystej**  $\mu_s$  jest własnością naporowej warstwy wodonośnej. Odzwierciedla jej zdolność do uwolnienia określonej objętości wody z jednostkowego słupa warstwy wodonośnej wskutek obniżenia naporu.

Jest iloczynem ciężaru objętościowego wody, współczynnika jednostkowej pojemności sprężystej i miąższości warstwy wodonośnej:

$$\mu_s = \gamma \cdot \beta \cdot m.$$

Z kolei współczynnik jednostkowej pojemności sprężystej  $\beta$  jest opisany zależnością (Szczepański, 1977, za Szczelkaczewem):

$$\beta = (\beta_s + n \cdot \beta_w) \gamma,$$

gdzie:

$n$  – współczynnik porowatości skały w warunkach naturalnych,

$\beta_s$  – współczynnik ściśliwości skały,

$\beta_w$  – współczynnik ściśliwości wody,

$\gamma$  – ciężar właściwy wody.

Sprężystość naporowych warstw wodonośnych powoduje, że zmiana ciśnienia w dowolnym punkcie warstwy nie przenosi się na całą warstwę od razu, lecz obserwuje się przemieszczanie zmian ciśnienia. Gdy  $\mu_s \rightarrow 0$ , układ nabiera częściowych cech sztywności, np. masywy skał szczelinowych.

**Współczynnik odsączalności grawitacyjnej**  $\mu$  jest własnością warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym. Odzwierciedla jej zdolność do uwolnienia określonej objętości wody ( $V_w$ ), która może wypłynąć i wysączyć się z objętości skały ( $V$ ) pod wpływem siły ciężkości. Współczynnik odsączalności grawitacyjnej jest wielkością niemianowaną:

$$\mu = \frac{V_w}{V}$$

**Współczynnik piezoprzewodności**  $a$  jest własnością naporowej warstwy wodonośnej i charakteryzuje prędkość, z jaką następuje rozprzestrzenianie się zmian

ciśnienia. Określa go stosunek przewodności  $T$  do współczynnika odsączalności sprężystej  $\mu_s$ :

$$a = \frac{T}{\mu_s}$$

W warstwach wodonośnych o zwierciadle swobodnym jego odpowiednikiem jest współczynnik przewodności (Szczepański, 1977), nazywany także współczynnikiem poziomoprzewodności (lit. ros.) lub współczynnikiem zmian poziomu (Wieczysty, 1970). Określa go stosunek przewodności  $T$  do współczynnika odsączalności grawitacyjnej  $\mu$ :

$$a = \frac{T}{\mu}, \quad T = k \cdot h_{sr}.$$

**Opór hydrauliczny** przesiąkania  $D = \frac{m'}{k'}$  jest własnością warstwy słabo przepuszczalnej, przeważnie w nadkładzie warstwy wodonośnej. Oznacza opór, jaki stawia warstwa słabo przepuszczalna o miąższości  $m'$  i współczynniku  $k'$  przy pionowym przepływie wody. Wielkość odwrotna  $\frac{k'}{m'}$  jest nazywana **współczynnikiem przesiąkania** (Nielubowicz, 1969, za Waltonem) albo parametrem przesiąkania (Forkasiewicz, 1973, Pazdro, 1977).

**Współczynnik przesiąkania**  $B = \sqrt{T \frac{m'}{k'}} = \sqrt{T \cdot D}$  to parametr charakteryzujący efekt przesiąkania się wody z sąsiedniej warstwy wodonośnej (wyżej lub niżej leżącej) do warstwy eksploatowanej przez rozdzielające osady słabo przepuszczalne. Jest to pierwiastek kwadratowy iloczynu przewodności pompowanej warstwy wodonośnej  $T$  i hydraulicznego oporu przesiąkania  $D = \frac{m'}{k'}$  warstwy rozdzielającej. Wielkość ta została wprowadzona w celu udogodnienia obliczeń. Określa zasięg strefy warstwy wodonośnej, która musi ulec zdepresjonowaniu, aby uzyskać efekt ustalonego przesiąkania. Wysoka wartość liczbowa tego współczynnika oznacza niskie przesiąkanie i odwrotnie.

**Współczynnik opóźnionego odsączania**  $B_1 = \sqrt{\frac{1}{\alpha} \frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{1}{\alpha}} a$  to parametr charakteryzujący warstwy wodonośne o zróżnicowanej odsączalności w warunkach niezupełnie swobodnego zwierciadła wody. Współczynnik opóźnionego odsączania określa w tych warunkach zasięg strefy warstwy wodonośnej, w której występuje obniżenie zwierciadła wody wywołujące odsączanie. Wysoka jego wartość świadczy o przewadze odsączania sprężystego, a niska – o odsączaniu grawitacyjnym. Jest to pierwiastek kwadratowy iloczynu stałej empirycznej, zwanej wskaźnikiem opóźnienia Boultona  $\frac{1}{\alpha}$  i współczynnika przewodności  $a$ . Pojęcia współczyn-

ników przesiąkania B (Hantush, 1956, 1960) i opóźnionego odsączania  $B_1$  (Boulton, 1954, 1963) są do siebie bardzo zbliżone, tyle że zostały zdefiniowane w różny sposób i określone dla różnych systemów hydrogeologicznych (warstw).

## 2.4. Równania przepływu wód podziemnych

### 2.4.1. Równania ogólne

W badaniach dynamiki wód podziemnych prawo Darcy'ego stworzyło podstawy do dalszego rozwoju teorii filtracji. Jak podaje Kordas (1971), istotny krok w rozwoju tej teorii uczynił Dupuit (1863), wprowadzając pojęcie lokalnego spadku hydraulicznego:

Wychodząc z prawa Darcy'ego [2.4] w postaci:

$$v = k \frac{dh}{ds} \quad [2.4],$$

stworzono hydrauliczną teorię filtracji. Istotnym elementem tej teorii była stacjonarność badanych przepływów. Przyjmowano bowiem, że dominującym stanem ruchu wód podziemnych jest stan ustalony, niezmienny w czasie. Według tej teorii, stworzonej w drugiej połowie XIX w., rozwiązano szereg zagadnień praktycznych, jak np. dopływ do rowu, studni i in.

Kolejny krok w rozwoju badań dynamiki wód podziemnych uczynił C. Schlichter, wprowadzając pojęcie składowych prędkości filtracji:

$$\begin{aligned} v_x &= k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \\ v_y &= k_y \frac{\partial h}{\partial y}, \\ v_z &= k_z \frac{\partial h}{\partial z}. \end{aligned} \quad [2.5]$$

Stało się to podstawą do powstania hydrodynamicznej teorii filtracji, w której C. Schlichter założył istnienie w obszarze filtracji ciągłego pola ciśnienia  $h(x, y, z)$  oraz odpowiadającego mu ciągłego pola prędkości  $v = k \text{ grad } h$ . Opis hydrodynamiczny ruchu wód podziemnych polega więc na charakterystyce pól wielkości fizycznych, takich jak ciśnienie czy prędkość w postaci równań przepływu, opisujących mechanizm badanego procesu.

W literaturze hydrogeologicznej wyprowadza się oraz podaje następujące równania ogólne w zakresie dynamiki wód podziemnych:

– równanie Laplace’a:

$$\frac{\partial^2(k_x h)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(k_y h)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(k_z h)}{\partial z^2} = 0, \quad [2.6]$$

stanowiące ogólne równanie filtracji cieczy nieściśliwej w ośrodku porowatym w warunkach przepływu laminarnego i ustalonego w warstwie o zwierciadle naporowym (Macioszczyk, 1971);

– równanie Boussinesqa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial h}{\partial t}, \quad [2.7]$$

opisujące nieustalony ruch wód podziemnych, zmienny w czasie i przestrzeni w warunkach swobodnego zwierciadła wody (Kordas, 1971);

– równanie Fouriera:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad [2.8]$$

opisujące nieustalony ruch wód podziemnych w warstwie naporowej. Równanie to stanowi zlinearyzowaną postać równania Boussinesqa, w związku z czym często bywa wykorzystywane do przybliżonego rozwiązywania zagadnień filtracji nieustalonych w warunkach swobodnego zwierciadła wody (Kordas, 1971).

Podane ogólne równania przepływu w układzie współrzędnych prostokątnych są podstawą do budowy modeli matematycznych w hydrogeologii, a sprowadzone do układu współrzędnych biegunowych posłużyły do wyprowadzenia szeregu równań na dopływ do studni przy określonych warunkach brzegowych.

## 2.4.2. Równania dopływu do studni zupełnej

Próby matematycznego opisu procesu dopływu wody podziemnej do studni mają swoją bogatą historię. Przez okres stu pięćdziesięciu lat od czasu sformułowania liniowego prawa filtracji Darcy’ego trwa bowiem bardzo intensywny rozwój metod obliczeń i wzorów na dopływ wody do studni, uwzględniających różne typy warstw wodonośnych, granic, warunki przepływu, rodzaje otworów itp. Metod podstawowych, służących do interpretacji wyników próbnych pompowań przy rozpoznawaniu parametryczno-zasobowym warstw wodonośnych, jest jednak tylko kilka.

### 2.4.2.1. Równania dopływu ustalonego

Wzory na ustalony dopływ wody do studni wprowadził Dupuit (1863). Wzory te są słuszne przy następujących założeniach (Szczepański, 1977): (1) przepływ

jest ustalony, zgodny z liniowym prawem Darcy'ego, (2) woda i skała są nieściśliwe, (3) ośrodek filtracyjny jest jednorodny i izotropowy  $k_x = k_y = k_z = \text{const}$ , (4) filtracja odbywa się w warstwie nieograniczonej, a właściwie ograniczonej przez pas wody o stałej wysokości  $H$  w stałej odległości  $R$ , (5) warstwa leży poziomo, jej przewodność  $T = k \cdot m = \text{const}$ ,

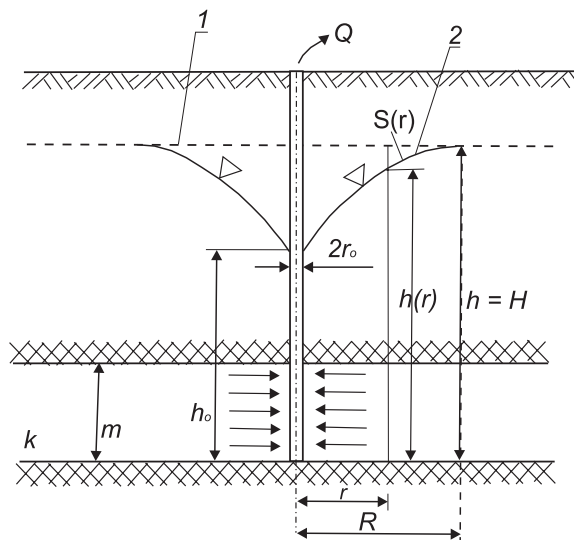
**Naporowy strumień wód podziemnych.** Na rysunku 2.5 przedstawiono studnię zupełną, ujmującą warstwę o miąższości  $m$  i współczynniku  $k$ , pracującą ze stałą wydajnością  $Q$ . Zgodnie ze znanym prawem ciągłości strumienia przepływu wody do studni przez powierzchnię cylindra o wysokości  $m$  i promieniu  $r$  można wyrazić w postaci równania:

$$Q = 2\pi \cdot r \cdot m \cdot k \cdot \frac{dh}{dr}. \quad [2.9]$$

Całkując równanie [2.9] w granicach od  $h_0$  do  $h$  przy  $r$  zmiennym od  $r_0$  do dowolnej wartości  $r$ , otrzymamy:

$$h - h_0 = \frac{Q}{2\pi \cdot k \cdot m} \ln \frac{r}{r_0} = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{r}{r_0}, \quad \text{gdź } T = k \cdot m. \quad [2.10]$$

Z równania [2.10] wynika, że ze wzrostem  $r$  wielkość  $h$  powinna się zwiększać do nieskończoności, lecz przecież fizycznie ma ona górny przedział  $H$ , którym jest ciśnienie początkowe – pierwotne. Równanie [2.10] jest zatem słuszne tylko dla stacjonarnych warunków filtracji w ograniczonym granicą zasilania ( $H = \text{const}$ ) poziomie wodonośnym, w warstwie nieograniczonej bowiem przepływ ustalony



Rys. 2.5. Dopływ do studni zupełnej w warstwie o zwierciadle naporowym, wg Beara i in. (1971): 1 – początkowa powierzchnia piezometryczna, 2 – krzywa depresji

jest teoretycznie niemożliwy (Bear, Zaslavsky, Irmay, 1971). Zgodnie z tym w odległości  $r = R$  jest spełniony warunek  $h = H$ , a więc  $s = 0$ . Możemy zatem zapisać następujące postaci równań:

– na depresję w studni:

$$s_o = H - h_o = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{R}{r_o} = \frac{Q}{2,73 \cdot T} \lg \frac{R}{r_o}, \quad [2.11]$$

– na depresję w dowolnej odległości  $r$ :

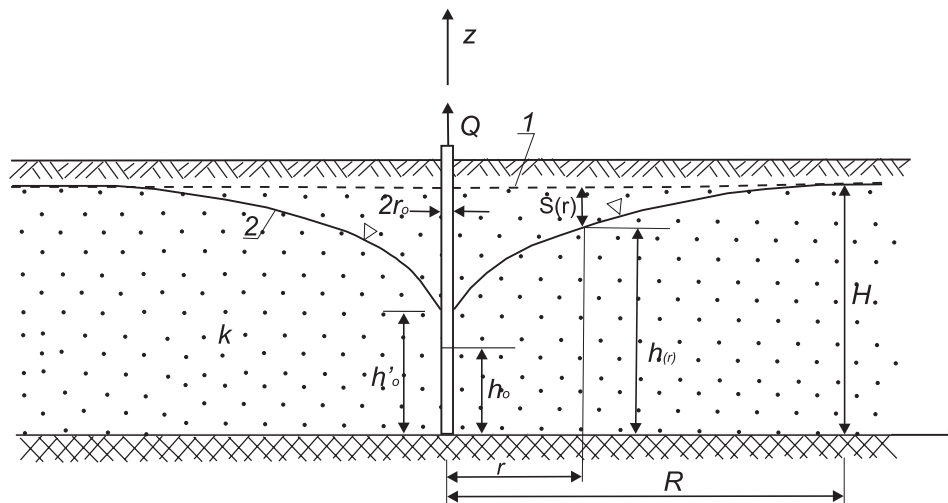
$$s = H - h = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{R}{r} = \frac{Q}{2,73 \cdot T} \lg \frac{R}{r}, \quad [2.12]$$

– na różnicę ciśnień pomiędzy dwoma punktami  $r_1$  i  $r_2$  na krzywej depresji:

$$s_2 - s_1 = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{Q}{2,73 \cdot T} \lg \frac{r_2}{r_1} \quad [2.13]$$

Równanie [2.13] nazywane jest również równaniem Thiema, ponieważ Thiem (1906) pierwszy zastosował badania hydrowęzłowe z dwoma i więcej otworami obserwacyjnymi do określania przepuszczalności osadów.

**Swobodny strumień wód podziemnych.** Na rysunku 2.6 przedstawiono dopływ do studni w warstwie o zwierciadle swobodnym, pompowanej ze stałą wydajnością  $Q$ . Dopływ wody do otworu ma charakter sferyczno-radialny, zachodzi bowiem wzdłuż linii krzywych, których krzywizna wzrasta w miarę zbliżania się do



Rys. 2.6. Dopływ do studni w warstwie o zwierciadle swobodnym wg Beara i in. (1971):  
1 – początkowa powierzchnia zwierciadła swobodnego, 2 – krzywa depresji

studni. Jest to zjawisko nieliniowe, bardzo trudne do określenia za pomocą wzorów i dlatego do rozwiązania analitycznego należy przyjąć pewne uproszczenia. Takie uproszczenie zastosował Dupuit, pomijając składową pionową prędkości filtracji, a więc nie uwzględniając rzeczywistej krzywizny linii strumienia w pobliżu studni. W praktyce sprowadza się to do linearyzacji równania przepływu w obrębie leja depresji, w którym  $m = h_{sr} = \frac{H + h_o}{2}$ .

Po uwzględnieniu tego założenia, a więc przy dopływie płasko-radialnym, strumień wody podziemnej napływający do studni z cylindra warstwy o promieniu  $r$  można opisać równaniem:

$$Q = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot k \frac{dh}{dr} . \quad [2.14]$$

Całkując równanie [2.14] w granicach od  $h = h_o$  przy  $r = r_o$  do  $h = H$  przy  $r = R$ , otrzymamy:

$$H^2 - h_o^2 = \frac{Q}{\pi \cdot k} \ln \frac{R}{r_o} = \frac{Q}{1,36 \cdot k} \lg \frac{R}{r_o} , \quad [2.15]$$

– dla dowolnego punktu na krzywej depresji:

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi \cdot k} \ln \frac{R}{r} = \frac{Q}{1,36 \cdot k} \lg \frac{R}{r} , \quad [2.16]$$

– dla dwóch punktów na krzywej depresji:

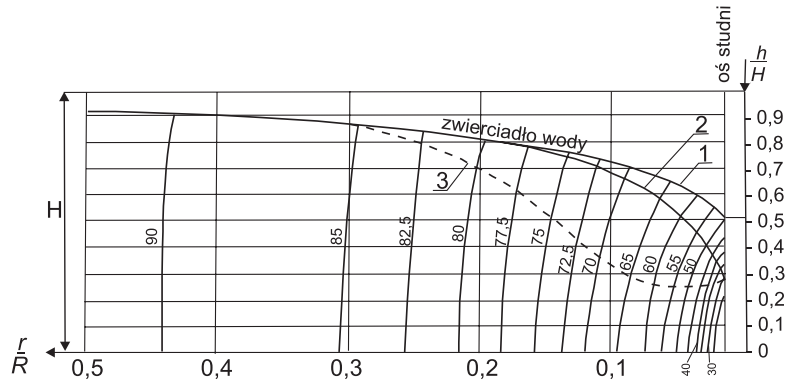
$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi \cdot k} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{Q}{1,36 \cdot k} \lg \frac{r_2}{r_1} . \quad [2.17]$$

Równanie [2.16] jest nazywane równaniem krzywej depresji dla wód o swobodnym zwierciadle.

Ponieważ założenia Dupuita nie uwzględniają rzeczywistej krzywizny linii strumienia (rys. 2.7), dokładne wyniki otrzymuje się dla obliczeń przy zachowaniu odległości  $r > 1,5$  (m, H), wówczas bowiem składowa pionowa prędkości filtracji może być pominięta, albo gdy filtry otworów obserwacyjnych w strefie  $r < 1,5$  (m, H) są posadowione na głębokości, na której mierzone ciśnienia są zgodne z linią Dupuita (rys. 2.7).

**Strumień wód podziemnych w warunkach ustalonego przesiąkania.** Dotychczas rozpatrzone schematy dopływu wody do studni związane były wyłącznie z zasilaniem od strony kolistej granicy zewnętrznej, położonej w odległości  $R$ , na której  $H = \text{const.}$ , tj. w warstwie o nieograniczonym rozprzestrzenieniu zasilanej lateralnym przepływem wody. Natomiast w przypadkach, kiedy otoczenie warstwy wodonośnej stanowią zalegające w jej stropie lub spągu osady słabo przepuszczal-





Rys. 2.7. Rozkład ciśnienia przy dopływie do studni w warstwie o swobodnym zwierciadle wody (z Jarodzkiego, 1972): 1 – zwierciadło wody, 2 – krzywa Dupuita, 3 – głębokość, na której ciśnienia są zgodne z linią Dupuita

ne może następować w obrębie lejki depresyjnego (poprzez te osady) przesiąkanie wody z sąsiednich warstw wodonośnych do warstwy eksploatowanej. W latach 30. XX wieku zagadnienie to było przedmiotem rozważań badaczy holenderskich, wśród których wymienia się de Glee, Steggewentza, van Hesa, a w okresie powojennym badaczy amerykańskich Jacoba i Hantusha.

Ustalony dopływ do studni z udziałem przesiąkania zachodzi wówczas, gdy przesiąkanie jest proporcjonalne do wielkości depresji, co oznacza, że poziom zwierciadła wody w warstwie zasilającej (nadległej lub podległej) nie zmienia się, a gradient hydrauliczny w warstwach słabo przepuszczalnych ustala się zgodnie z nowym rozkładem ciśnień, wywołanych pompowaniem. Jeśli te warunki nie będą spełnione, dla warstwy nieograniczonej filtracja będzie miała charakter nieustalony. Przy wyprowadzaniu równania dopływu uwzględniającego ciągłe i ustalone przesiąkanie możliwe jest otrzymanie prostego, przybliżonego rozwiązania przy założeniu, że strumień w warstwie półprzepuszczalnej skierowany jest prostopadle w dół, a w warstwie przepuszczalnej jest on płasko-radialny (rys. 2.8).

Równanie zwane wzorem de Glee przyjmuje wówczas postać:

$$s = \frac{Q}{2\pi \cdot T} K_0 \left( \frac{r}{B} \right); \quad B = \sqrt{T \cdot \frac{m'}{k'}}, \quad [2.18]$$

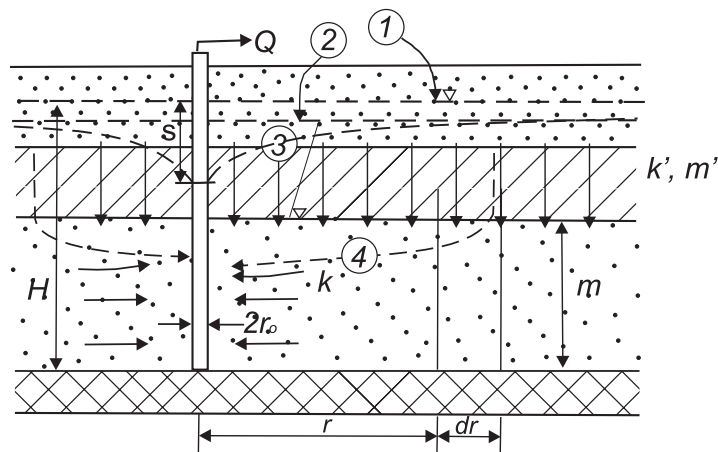
gdzie:

$K_0 \left( \frac{r}{B} \right)$  jest funkcją Bessela, której wartości podano w dodatku 3 oraz na planszy II,

B – współczynnik przesiąkania.

Gdy  $r \ll B$ , równanie [2.18], dzięki przybliżeniu logarytmicznemu funkcji Bessela, znacznie się upraszcza:

$$s = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln 1,12 \frac{r}{B} \quad [2.19]$$



Rys. 2.8. Schemat dopływu do studni w warunkach przesiąkania, wg Beara i in. (1971):  
 1 – swobodne zwierciadło wody, 2 – piezometryczne zwierciadło wody, 3 – dynamiczne zwierciadło wody, 4 – linia prądu wód przesiąkających się

przy dokładności obliczeń do 5% przy  $\frac{r}{B} < 0,35$  i 1% przy  $\frac{r}{B} < 0,18$  (Bear, Zaslavski, Irmay, 1971).

Przyrównując stronami równanie [2.19] z równaniem Dupuita [2.12], otrzymamy wzór na zasięg leja depresji w warunkach ustalonego przepływu i przesiąkania:

$$R = 1,12 B. \quad [2.20]$$

#### 2.4.2.2. Równania dopływu nieustalonego

**Naporowy strumień wód podziemnych.** Równanie nieustalonego dopływu do studni w warstwie o zwierciadle naporowym sformułował Theis (1935). Wykorzystał w tym celu analogię między przepływem ciepła (równanie przewodnictwa cieplnego – znane jako równanie Fouriera; patrz: wzór [2.8]) a przepływem wód podziemnych. Równanie to określa związek między obniżaniem się poziomu piezometrycznego (depresja  $s$ ) a wielkością ( $Q$ ) i czasem trwania ( $t$ ) poboru wody ze studni:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u); \quad u = \frac{r^2}{4at}. \quad [2.21]$$

Do tego wzoru Theis przyjął następujące założenia: (1) warstwa wodonośna jest jednorodna i izotropowa  $k_x = k_y = k_z = \text{const.}$ , o równej miąższości w całej strefie będącej pod wpływem pompowania ( $T = k \cdot m = \text{const}$ ), (2) rozprzestrzenienie poziome warstwy jest nieograniczone, (3) strop i spąg warstwy są nieprzepuszczalne (o braku zasilania), (4) sprężyste uwalnianie wody przez ośrodek porowaty

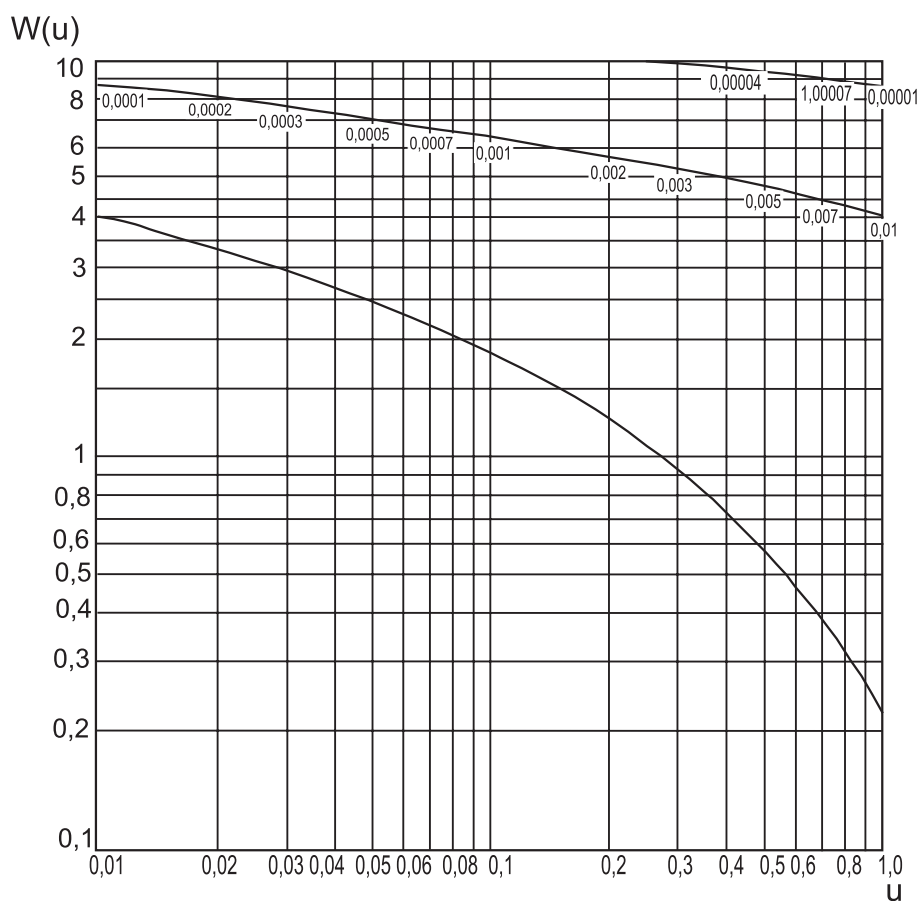
następuje wskutek obniżania ciśnienia i jest natychmiastowe, (5) studnia jest zupełna, (6) promień studni, a więc i jej pojemność, jako bardzo małe można pominąć, (7) wydajność pompowania jest stała. Podana we wzorze [2.21] funkcja:

$$W(u) = -E_i(-u) = \ln \frac{1}{u} - 0,557 + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} + \dots \quad [2.22]$$

nazywana jest funkcją charakterystyczną studni w schemacie obliczeniowym Theisa. Jej wartości zestawiono w dodatku 1, a postać na rysunku 2.9.

Z ogólnego zapisu funkcji charakterystycznej [2.22] wynika, że przy małych wartościach argumentu ma ona logarytmiczne przybliżenie:

$$W(u) = \ln \frac{1}{u} - 0,577 = \ln \frac{2,25at}{r^2}. \quad [2.23]$$



Rys. 2.9. Wykres funkcji Theisa  $W(u)$

Błąd przybliżenia jest zależny od wartości argumentu  $u$ . Z dokładnością 1–5% można je stosować po spełnieniu warunku, że:

$$u = \frac{r^2}{4at} < 0,03 - 0,10, \quad [2.24]$$

a więc dla bliżej położonych otworów obserwacyjnych.

Po zastosowaniu przybliżenia logarytmicznego [2.23] ogólne równanie Theisa [2.21] można zapisać w postaci:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \ln \frac{2,25at}{r^2} = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25at}{r^2}; \quad a = \frac{T}{\mu_s}. \quad [2.25]$$

Równanie [2.25], wyrażone w tej postaci przez Jacoba (1946), nazywane jest w literaturze hydrogeologicznej wzorem przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba.

Przyrównując stronami równanie [2.25] zapisane w postaci:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \ln \frac{2,25at}{r^2} = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{1,5\sqrt{at}}{r} = \frac{Q}{2,73T} \lg \frac{1,5\sqrt{at}}{r} \quad [2.26]$$

z równaniem Dupuita [2.12], można stwierdzić, że umowny promień strefy zasilenia wynosi:

$$R = 1,5\sqrt{at} . \quad [2.27]$$

Jeżeli natomiast chcemy określić różnicę depresji pomiędzy dwoma dowolnymi punktami na przekroju strumienia w czasie  $t > 0$ , to posługując się równaniem [2.26], otrzymamy:

$$s_2 - s_1 = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \left( \ln \frac{1,5\sqrt{at}}{r_2} - \ln \frac{1,5\sqrt{at}}{r_1} \right) = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{Q}{2,73T} \lg \frac{r_2}{r_1} . \quad [2.28]$$

Równanie to jest równaniem profilu depresji i jest identyczne z równaniem Dupuita-Thiema [2.13]. Jeśli więc spełniony jest warunek [2.24], filtracja ma charakter quasi-ustalony, co oznacza, że zjawisko obniżania się naporu zachodzi przy zachowaniu równoległości kolejnych krzywych depresji.

**Swobodny strumień wód podziemnych.** Teoria nieustalonego dopływu do studni pompowanych w warstwach o swobodnym zwierciadle wody jest opracowana znacznie słabiej, a zastosowanie wzoru Theisa [2.21] w tych warunkach jest bardzo ograniczone. Jacob (1946) dopuszcza stosowanie tego wzoru i jego pochodnych w przypadkach, gdy  $s < 0,02$  H. Praktycznie osiąga się jeszcze poprawne wyniki, gdy  $s < 0,25$  H (Bremond, 1965), stosując poprawkę Jacoba. Poprawkę tę wpro-

wadza się do wzoru Theisa i na wykresach, odejmując od zmierzonej depresji poprawkę  $\Delta = \frac{s^2}{2H}$ .

### Wpływ przesiąkania na warunki dopływu do studni w warstwach o zwierciadle niezupełnie napiętym

Ponieważ warstwy wodonośne o szczelnym nadkładzie lub zupełnie swobodne spotyka się rzadko, natomiast częściej występują warstwy o zwierciadle niezupełnie napiętym, a więc o nieszczelnym, przesiąkliwym nadkładzie lub podłożu, dalszy rozwój teorii filtracji nieustalonej dotyczył tych przypadków. Warstwy wodonośne i osady słabo przepuszczalne występują naprzemianlegle na wielu obszarach aluwialnych: w dolinach rzek nizinnych, dawnych nieckach jeziornych, równinach nadbrzeżnych, deltach itp. W takich warunkach pompowana z warstwy wodonośnej o zwierciadle niezupełnie napiętym woda jest czerpana nie tylko z ujętej warstwy, lecz również z nadległej warstwy słabo przepuszczalnej. Ilość wody przesiąkającej z sąsiednich warstw wodonośnych jest niekiedy tak znaczna, że wykluczona jest poprawna interpretacja wyników próbnych pompowań według uprzednio podanego wzoru Theisa.

Proces przesiąkania ma miejsce, gdy spełnione są następujące warunki (Boczwier, Wierygin, 1961):

$$\frac{k}{k'} \geq 100 - 150 ; \quad \frac{m}{m'} \geq 3 - 5 ,$$

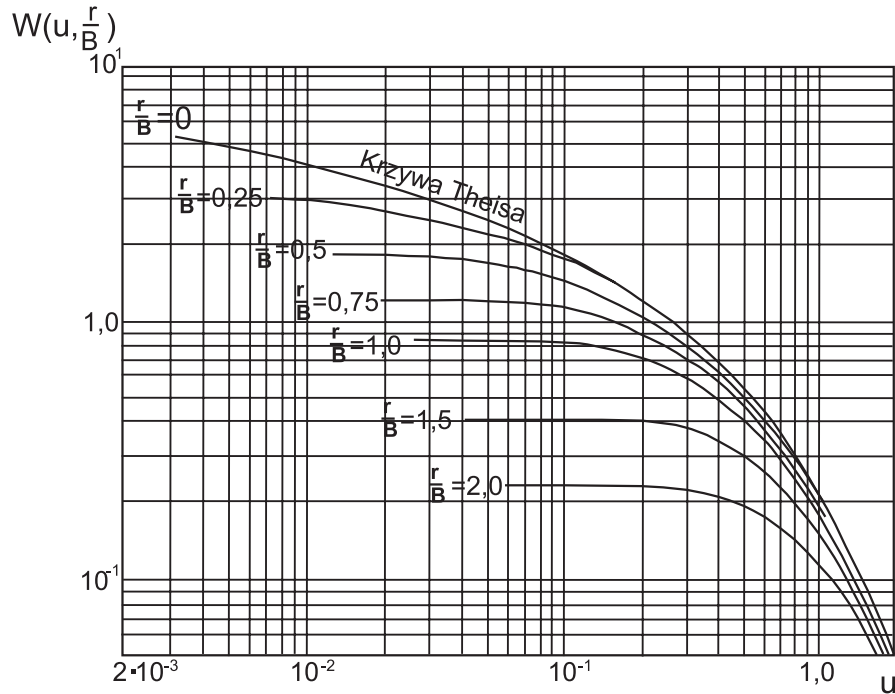
gdzie:

$k'$  i  $k$  – współczynniki filtracji słabo i dobrze przepuszczalnej warstwy, a  $m'$  i  $m$  – miąższości tych warstw.

Zagadnienie dopływu wody do studni pompowanej w warunkach przesiąkania rozwiązyali Hantush i Jacob (1955), przy założeniu następujących uproszczeń: (1) warstwa wodonośna jak w schemacie Theisa ma nieograniczone rozprzestrzenienie w poziomie, stałą miąższość i przewodność i jest jednorodna, (2) zakłada się istnienie w spągu lub stropie utworów półprzepuszczalnych, ograniczających główną warstwę od sąsiednich warstw wodonośnych, (3) studnia jest dogłębiona w głównej warstwie wodonośnej, ma nieskończenie małą średnicę i charakteryzuje się stałym wydatkiem, (4) przesiąkanie na drodze pionowej filtracji jest proporcjonalne do wytworzonej depresji, (5) zakłada się, że do momentu rozpoczęcia pompowania nie ma różnicy ciśnień pomiędzy warstwami znajdującymi się w związku hydraulicznym. Podane przez Hantusha i Jacoba (1955) równanie ma postać:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W\left(u, \frac{r}{B}\right); \quad u = \frac{r^2}{4at}; \quad B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}} \quad [2.29]$$

W stosunku do równania Theisa [2.21] zawiera ono wielkość  $B$  – współczynnik (wskaźnik, czynnik) przesiąkania, który charakteryzuje zasięg strefy objętej przesiąkaniem i wynika z zależności pod pierwiastkiem kwadratowym. Współczynnik



Rys. 2.10. Wykresy funkcji wzorcowych  $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$

$B$  został wprowadzony dla udogodnienia obliczeń. Wysoka jego wartość oznacza małe przesiąkanie. Jak podaje za Waltonem Nielubowicz (1969), w celu scharakteryzowania wielkości przesiąkania (przecieku), czyli filtracji pionowej poprzez warstwę półprzepuszczalną, wprowadzono pojęcie współczynnika przeciekania  $\frac{k'}{m}$ . Jego odwrotność,  $D = \frac{m'}{k'}$ , nazwano oporem hydraulicznym przesiąkania (Kruseman, Ridder, 1979).

Funkcja  $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$  została przez Hantusha stabelaryzowana (dodatek 1), a jej postać podano na rysunku 2.10. Nazywana jest ona w literaturze hydrogeologicznej funkcją studni w warunkach przesiąkania lub od jej autora funkcją Hantusha. Funkcja Theisa  $W(u)$  jest szczególnym przypadkiem funkcji Hantusha dla  $\frac{r}{B} = 0$ .

#### Wpływ opóźnionego odsączania na warunki odpływu do studni w warstwach o zwierciadle niezupełnie swobodnym

Teoria Hantusha również nie obejmuje wszystkich skomplikowanych rzeczywistych procesów filtracji nieustalanej, które zachodzą podczas długotrwałych pompowań w systemie połączonych wodonośców lub w warstwach wodonośnych o zmiennej odsączalności osadów. Okazało się bowiem, że podczas długotrwałych

pompowań lub eksploatacji poziom zwierciadła wody w warstwie zasilającej może ulec znacznemu obniżeniu, co jest sprzeczne z założeniem stałości tego zwierciadła w schemacie Hantusha. Badania nad tą grupą zagadnień związaną ze zmianą swobodnego zwierciadła wody w warstwie zasilającej podjął Boulton, który w pracach z 1963 i 1964 r. podał teorię zjawiska oraz metody obliczeń filtracji nieustalanej w tych warunkach.

W stosunku do założeń, związanych z uprzednio przedstawionym równaniem Hantusha [2.29], Boulton wprowadził dodatkowe założenia:

1. Uwalnianie wody w pompowaniu nie jest natychmiastowe, można bowiem wyróżnić, co najmniej dwa etapy tego procesu:
  - uwalnianie natychmiastowe w wyniku zjawiska dekompresji warstwy wodonośnej;
  - uwalnianie progresywne wody w wyniku przesiąkania się jej z nadległej przestrzeni odwadnianej.
2. Na skutek przesiąkania następuje zjawisko grawitacyjnego odsączenia się wody z kompleksu wodonośnego, co jest związane z obniżaniem się swobodnego zwierciadła wody w procesie pompowania.

Przebieg procesu pompowania w takich warunkach można podzielić na trzy fazy: (1) gdy reaguje warstwa wodonośna w strefie bezpośredniego zafiltrowania, objawiając reżim sprężysty; (2) następuje przesiąkanie wody z warstwy nadległej, dające w efekcie okresową stabilizację zwierciadła wody; (3) reaguje cały kompleks wodonośny już w warunkach odsączenia grawitacyjnego.

Proces określają parametry:

- wskaźnik odsączenia:  $B_1 = \sqrt{\frac{1}{\alpha} \frac{T}{\mu}}$
- stała empiryczna, zwana wskaźnikiem opóźnienia  $\frac{1}{\alpha}$ ,
- współczynnik odsączalności grawitacyjnej  $\mu$ .

Równanie Boultona ma postać (Walton, 1970):

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W\left(u_A, u_Y, \frac{r}{B_1}\right); \quad u_A = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt}; \quad u_Y = \frac{r^2 \mu}{4Tt}. \quad [2.30]$$

W nawiązaniu do uprzednio wymienionych trzech faz pompowania można przyjąć, że pierwszą fazę opisuje równanie:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W\left(u_A, \frac{r}{B_1}\right); \quad u_A = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt},$$

a trzecią fazę równanie:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W\left(u_Y, \frac{r}{B_1}\right); \quad u_Y = \frac{r^2 \mu}{4Tt}.$$

Natomiast faza druga – okresowej stabilizacji lub przynajmniej zmniejszenia nachylenia się wykresu  $\lg s = f(\lg t)$  – jest opisana równaniem de Glee [2.18], po spełnieniu warunku, że

$$\frac{\mu + \mu_s}{\mu_s} \geq 100.$$

Graficzną postać funkcji Boultona w postaci wykresów zespołu krzywych charakterystycznych przedstawiono na planszy IV.

Teoria dopływu wody do studni rozwija się w kierunku dalszego uwzględniania anizotropii układów wodonośnych, a zwłaszcza pojemności wodnej kompleksów słabo przepuszczalnych w nakładzie warstw wodonośnych (Boulton, Streltsowa, 1975; Neuman, 1975; Streltsowa, 1976; Moench, 1995).

**Metoda Neumana** (Neuman, 1975; Rohrich, 2002). Neuman wykazał, że opóźnione odsączanie może być odwzorowane matematycznie przy użyciu stałych wartości  $S$  ( $\mu_s$ ) i  $S_y$  ( $\mu$ ) bez potrzeby uciekania się do przepływu ze strefy nienasyconej. Model ten uwzględnia anizotropię warstwy wodonośnej o swobodnym zwierciadle wody i umożliwia badanie wpływu eksploatacji studni niepełnej na depresję w tych warunkach. Metoda może być wykorzystana do analizy próbnych pompowań studni niepełnych, ale wymaga to każdorazowo odrębnego przygotowania krzywych teoretycznych w zależności od warunków hydrogeologicznych. Pomocne w tym celu są programy komputerowe (patrz: Aquifer Test – rozdz. 11).

Równanie Neumana (1975) ma postać:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u_A, u_B, \beta), \quad [2.30a]$$

gdzie:

$W(u_A, u_B, \beta)$  – funkcja studni w warunkach zwierciadła swobodnego,

$u_A = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt}$  – typ krzywej A dla początkowego okresu pompowania,

$u_B = \frac{r^2 \mu}{4Tt}$  – typ krzywej B dla końcowego okresu pompowania,

$\beta = \frac{r^2 K_v}{D^2 K_h}$  – typ (numer) krzywej w równaniu Neumana,

$\mu_s$  – współczynnik odsączalności sprężystej (w literaturze angielskiej – S),

$\mu$  – współczynnik odsączalności grawitacyjnej (w literaturze angielskiej –  $S_y$ ),

$T$  – przewodność hydrauliczna,

$K_v$  – współczynnik filtracji pionowej,

$K_h$  – współczynnik filtracji poziomej,

$D$  – początkowa miąższość strefy saturacji,

$r$  – odległość otworu obserwacyjnego od pompowanej studni.



Współczynnik filtracji poziomej można określić ze wzoru:

$$K_h = \frac{T}{D},$$

natomiast współczynnik filtracji pionowej ze wzoru:

$$K_v = \frac{\beta D^2 K_h}{r^2}.$$

### 2.4.3. Wznios zwierciadła wody

Dotychczasowe rozważania dotyczyły zjawiska nieustalonego dopływu w okresie trwania pompowania, lecz z praktyki wiadomo, że zjawisko to zachodzi również po wyłączeniu pompy, kiedy następuje faza wzniosu zwierciadła wody. Równanie krzywej wzniosu otrzymuje się przez zastosowanie zasady nakładania się przepływów (rys. 2.11).

Równanie ogólne do określenia depresji liczonej od zwierciadła pierwotnego w danym czasie  $t$  od zatrzymania pompowania ma postać:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \left[ -E_j \left( -\frac{r^2}{4a(t_p + t')} \right) + E_j \left( -\frac{r^2}{4at'} \right) \right], \quad [2.31]$$

gdzie:

$t_p$  – czas trwania próbnego pompowania,

$t'$  – czas po wyłączeniu pomp (wzniosu).

Przy zastosowaniu przybliżenia logarytmicznego [2.23] i po spełnieniu warunku [2.24] równanie wzniosu przybiera następującą postać:

– dla depresji liczonej od pierwotnego zwierciadła wody (Forkasiewicz, 1973):

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \ln \left( 1 + \frac{t_p}{t} \right) = \frac{0,183Q}{T} \lg \left( 1 + \frac{t_p}{t} \right), \quad [2.32]$$

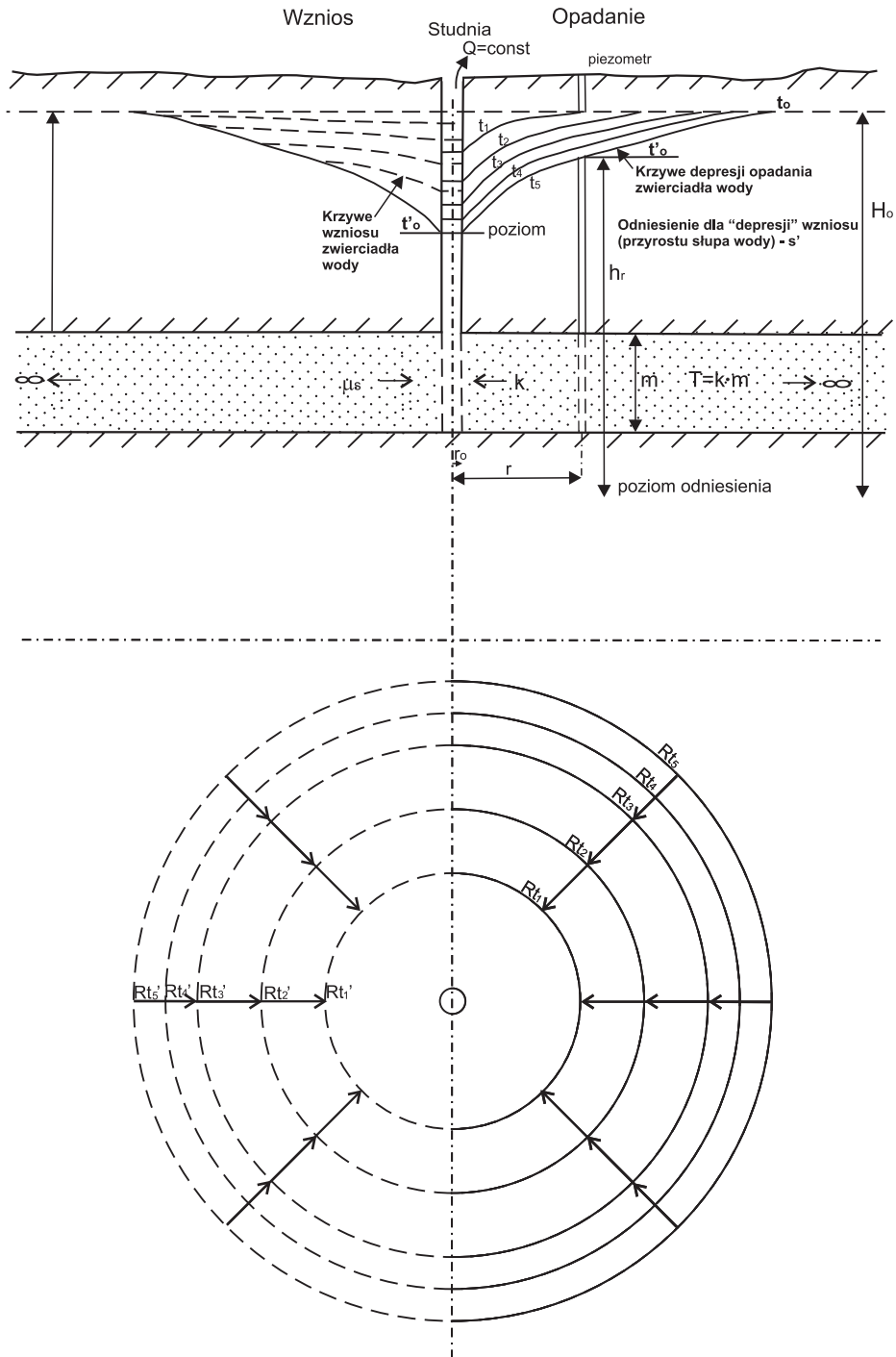
– dla depresji liczonej od poziomu osiągniętego przy końcu pompowania jako przyrost słupa wody (Borewski, 1971):

$$s' = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \ln \frac{2,25at_z}{r^2} = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25at_z}{r^2}, \quad [2.33]$$

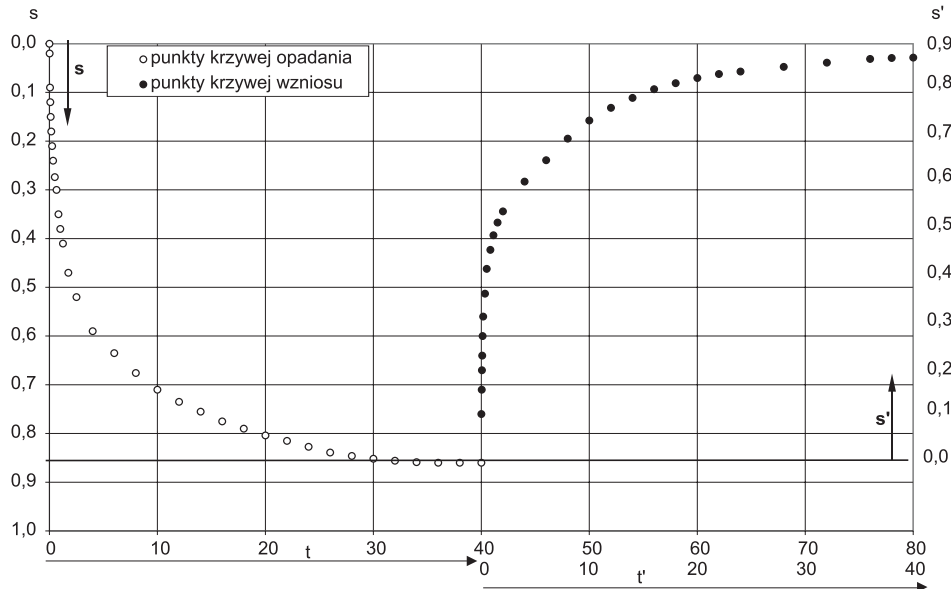
gdzie:

$t_p$  – czas trwania próbnego pompowania,

$t$  – rzeczywisty czas wzniosu,



Rys. 2.11. Opadanie i wznios zwierciadła wody podczas próbnego pompowania studni



Rys. 2.12. Ilustracja przebiegu opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym w trakcie i po zakończeniu pompowania

$$t_z = \frac{t_p t}{t + t_p} - \text{zastępczy (sprowadzony) czas wzniosu.}$$

Podane wzory stosuje się przy krótkim czasie prowadzenia próbnego pompowania. Jeżeli natomiast pompowanie trwało dłuższy czas ( $t_p \gg t'$ ) i przepływ wody przy końcu jego trwania można było przyjąć za ustalony (rys. 2.12), wówczas dla odcinka czasu wzniosu nie przewyższającego 10–12% czasu trwania pompowania (Borewski, 1971) można posługiwać się wzorem uproszczonym:

$$s' = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \ln t' = \frac{0,183Q}{T} \lg t' \quad [2.34]$$

przy czym błąd obliczeń nie przekracza 10%. Wyniki próbnych pompowań dla opadania i wzniosu zwierciadła wody przedstawiane są w układzie współrzędnych liniowo-logarytmicznych; w dalszej części tekstu prezentowane są wspólnie w postaci depresji rzeczywistej (opadania) w czasie  $t$  i depresji odwróconej  $s'$  w czasie  $t'$  przyrostu poziomu zwierciadła wody w stosunku do stanu w chwili wyłączenia pompy (patrz: rys. 2.12).

## 2.5. Granice warstw wodonośnych

Warstwy wodonośne mają zazwyczaj ograniczone rozprzestrzenienie, a wymiana na wody z obszarem otaczającym zależy od tzw. warunków brzegowych (Emsel-

lem, 1975), tzn. od rozkładu potencjału hydraulicznego oraz przepływu, określającego wielkości wydatków, które mogą być stałe, zmienne lub zerowe.

Wpływ stref granicznych ma w wielu przypadkach decydujące znaczenie dla rozkładu ciśnienia i dopływu wód podziemnych do ujęcia i dlatego określenie ich oddziaływania jest bardzo ważne przy prowadzeniu próbnych pompowań studni w pobliżu znanych lub spodziewanych granic. Z punktu widzenia metodyki próbnych pompowań można mówić o dwóch rodzajach granic:

- zasilających –  $H = \text{const}$ ,  $H = f(t)$ ,  $Q = \text{const}$ ;  $Q = f(t, H)$
- szczelnych –  $Q = 0$ .

W stosunku do warstw wodonośnych granicami zasilającymi są ich wychodnie oraz ciekły i zbiorniki wód powierzchniowych, a granicami szczelnymi – strefy niektórych dyslokacji tektonicznych, zbocza dolin kopalnych i współczesnych, wyciętych w osadach nieprzepuszczalnych.

Wpływ granic można określić, stosując „teorię odbić zwierciadłanych” opisaną przez Ferrisa (Ferris i in., 1962, Bear, Zaslavsky, Irmay, 1971; Forkasiewicz, 1973). W skrócie teoria ta przedstawia się następująco: wpływ szczelnej bocznej granicy warstwy wodonośnej na kształtowanie się depresji w otworze pompowanym jest taki sam, jaki wywołałby drugi otwór (w tym przypadku fikcyjny) znajdujący się po przeciwległej stronie nieprzepuszczalnej granicy, symetrycznie w stosunku do otworu rzeczywistego, pompowany z taką samą wydajnością  $+Q$  jak otwór rzeczywisty (rys. 2.13).

Gdy mamy do czynienia z granicą zasilania o stałym poziomie wody, zasada jest ta sama z tą różnicą, że do otworu fikcyjnego, znajdującego się po drugiej stronie granicy, wtłacza się wodę z wydajnością  $-Q$  (rys. 2.14).

W schematach obliczeniowych pojęcie warstwy nieograniczonej jest zastąpione pojęciem warstwy z jednostronną granicą o nieokreślonej długości, prostoliniwną, przecinającą całkowicie warstwę wodonośną. Rozważając przebieg próbnego pompowania warstwy wodonośnej z boczną granicą nieprzepuszczalną w warunkach filtracji nieustalanej opisanej równaniem Theisa [2.21], otrzymamy:

$$s = s_1 + s_2 = \frac{Q}{4\pi \cdot T} [W(u_1) + W(u_2)] \quad [2.35]$$

gdzie:

$$u_1 = \frac{4at}{r^2}; \quad u_2 = \frac{4at}{r_i^2}$$

$r$  – odległość punktu obserwacji od studni rzeczywistej,

$r_i$  – odległość punktu obserwacji od studni fikcyjnej.

Dla szczególnego przypadku, gdy otwór obserwacyjny usytuowany jest na osi prostopadłej do granicy (rys. 2.15), Forkasiewicz (1973) podaje wzór:

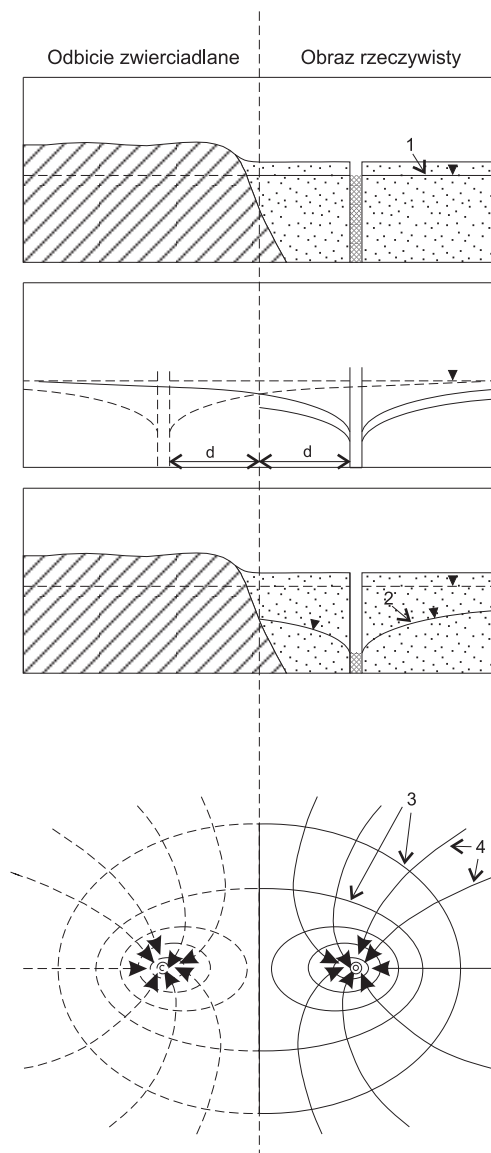
$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \cdot \varphi\left(u_1'; \frac{r}{d}\right) = \frac{0,08}{T} \cdot \varphi\left(u_1'; \frac{r}{d}\right), \quad [2.36]$$

gdzie:

$r$  – odległość otworu obserwacyjnego do studni,

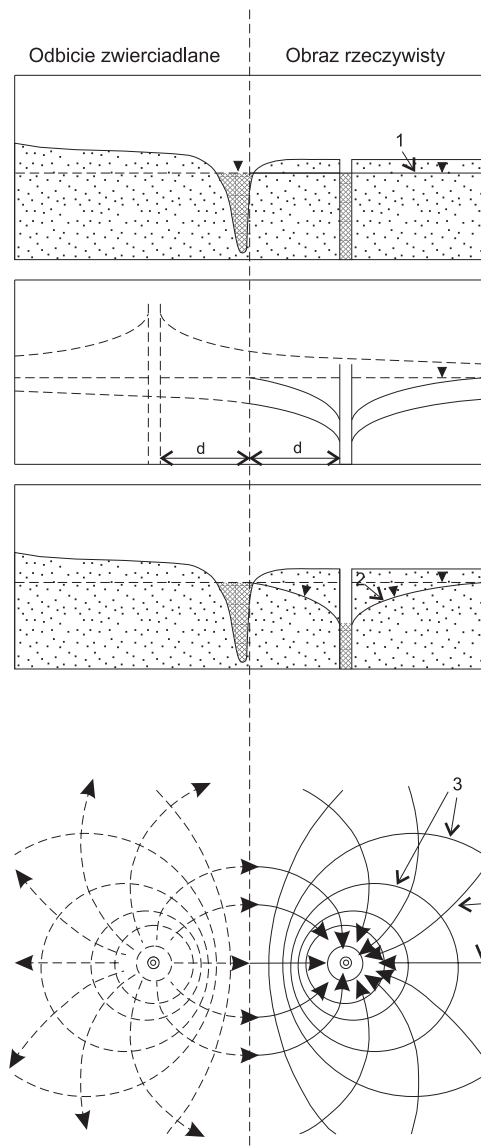
$r_i$  – odległość otworu obserwacyjnego do studni fikcyjnej,

$d$  – odległość tego otworu od granicy.

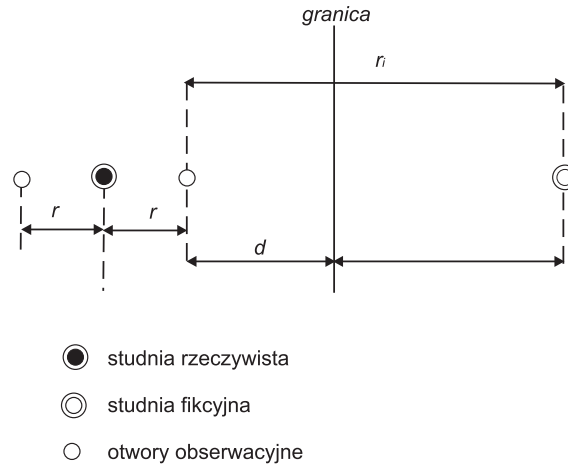


Rys. 2.13. Dopływ do studni w pobliżu granicy nieprzepuszczalnej wg Beara i in. (1971):  
 1 – początkowe zwierciadło wody, 2 – krzywa depresji, 3 – linie ekwipotencjalne, 4 – linie prądu

Dla wzoru [2.36] opracowano zespół krzywych teoretycznych  $\varphi\left(u'_1; \frac{r}{d}\right)$  (plansza V). Funkcja  $\varphi\left(u'_1; \frac{r}{d}\right)$  została obliczona z funkcji Theisa przy uwzględnieniu wpływu granicy nieprzepuszczalnej i zasilającej położonych w różnych odległościach od pompowanej studni.



Rys. 2.14. Dopływ do studni w pobliżu granicy zasilającej wg Beara i in. (1971): 1 – początkowe zwierciadło wody, 2 – krzywa depresji, 3 – linie ekwipotencjalne, 4 – linie prądu



Rys. 2.15. Ilustracja teorii odbić zwierciadlanych dla funkcji i jej nomogramu wg Forkasiewicz (1973)

Jeżeli spełniony jest warunek [2.24], można stosować przybliżenie logarytmiczne Theisa-Jacoba dla wzoru [2.35] w postaci:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \left( \ln \frac{2,25at}{r^2} + \ln \frac{2,25at}{r_i^2} \right) = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{2,25at}{r \cdot r_i} = \frac{Q}{2,73T} \cdot \lg \frac{2,25at}{r \cdot r_i} \quad [2.37]$$

Rozważając z kolei przebieg próbnego pompowania warstwy wodonośnej z boczną granicą zasilającą otrzymamy:

– wzór ogólny

$$s = s_1 - s_2 = \frac{Q}{4\pi \cdot T} [W(u_1) - W(u_2)], \quad [2.38]$$

gdzie:

$$u_1 = \frac{4at}{r^2}; \quad u_2 = \frac{4at}{r_i^2}$$

– wzór przybliżenia logarytmicznego

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} \ln \frac{2,25at}{r^2} - \ln \frac{2,25at}{r_i^2} = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{r_i}{r} = \frac{Q}{2,73 \cdot T} \cdot \lg \frac{r_i}{r}. \quad [2.39]$$

Przy istnieniu granicy zasilania wzór przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba uzyskuje więc postać równania na przepływ ustalony w warstwie naporowej (por. wzór [2.12]).

## **3. ZASADY WYKONYWANIA PRÓBNYCH POMPOWAŃ**

### **3.1. Przygotowanie badań**

W celu prawidłowego przeprowadzenia próbnego pompowania sporządza się jego program. Najczęściej program ten jest częścią projektu badań hydrogeologicznych. Powinien zawierać następujące elementy:

- cel pompowania wraz z podaniem jego zakresu i miejsca badania,
- ilość otworów pompowanych i obserwacyjnych i ich rozmieszczenie,
- spodziewaną wydajność maksymalną oraz depresję,
- orientacyjne określenie czasu pompowania i wzniosu zwierciadła wody po pompowaniu,
- zakres badań fizyko-chemicznych wody.

Program należy uściślić i rozszerzyć po wykonaniu otworów głównie o:

- określenie rodzaju pompy i głębokości jej zamontowania,
- sposób odprowadzenia wody,
- rodzaj przyrządów pomiarowych wydajności i depresji,
- częstotliwości pomiarów wydajności i depresji,
- określenia innych pomiarów, np. pomiarów wodowskazowych,
- sposób zestawienia i opracowywania wyników badań.

Wybór miejsca badań zależy od rodzaju badanej jednostki hydrogeologicznej, zakładanej lokalizacji ujęcia wody, a także stanu zagospodarowania terenu. Określenie rodzaju jednostki hydrogeologicznej ma szczególne znaczenie przy rozpoznawaniu struktur wodonośnych o ograniczonym zasięgu, np. wąskich dolin rzecznych, współczesnych i kopalnych. Należy wówczas lokalizować otwory rozpoznawcze w osiach dolin w oddaleniu od granic strukturalnych, natomiast jak najbliżej granic zasilających (rzeki, jeziora). Lokalizacja hydrowęzłów powinna być również powiązana ze wstępnym rozpoznaniem hydrodynamicznym.

### **3.2. Zaprojektowanie otworów rozpoznawczych**

Opis projektowanych robót wiertniczych stanowi zasadniczą część projektu prac geologicznych. Otwór rozpoznawczy (pompowy) jako podstawowy element hydrowęzła należy wykonać tak, aby można było uzyskać maksymalną wydajność. Jest to szczególnie ważne w dolinach rzecznych, gdyż tam należy uzyskać taką wydajność otworu, która wywołałaby w otworach obserwacyjnych depresje znacznie przekraczające naturalne wahania wód. Szczegóły konstrukcyjne otworu powinny być pokazane w jego projekcie geologiczno-technicznym, stanowiącym odrębnym załącznik graficzny.



### 3.2.1. Przewidywana wydajność i depresja

Wydajność i depresja są ze sobą ściśle związane funkcyjnie. Na ich wielkość oprócz czynników hydrogeologicznych, a więc parametrów filtracyjnych warstwy, jej zasilania, mają wpływ parametry techniczne otworu i pompy. Wydajność pompowanego otworu należy ustalać, biorąc pod uwagę:

- wydajność dopuszczalną:

$$Q_{dop} = 2\pi \cdot r_o \cdot l \cdot V_{dop}, \quad [3.1]$$

gdzie:

$r_o$  – promień otworu (filtr z obsypką) [m],

$l$  – długość filtru [m],

$V_{dop}$  – dopuszczalna prędkość wlotowa wody do otworu;  $V_{dop} = 65\sqrt{k}$  [m/d];

- ograniczenia obniżenia zwierciadła wody w pompowanym otworze:
  - 1) w warstwach o swobodnym zwierciadle wody depresja nie powinna przekraczać 0,4 słupa wody (Podniesiński, 1963),
  - 2) w warstwach naporowych depresja nie powinna przekraczać 0,5 ciśnienia piezometrycznego (Borewski, Samsonow, Jazwin, 1973).

Najniższa wydajność próbnego pompowania nie powinna być mniejsza od przewodności warstwy badanej: wydajność maksymalna powinna ją przewyższać co najmniej trzykrotnie dla filtrów otworów (studni) o średnicy do 0,6 m (Przybyłek, 1977). Dobór wydajności i depresji otworu pompowanego powinien także uwzględniać wywołanie takiej depresji w bliskich otworach obserwacyjnych, aby przekraczała ona kilka razy wahania naturalne poziomu piezometrycznego. Z praktyki wynika, że aby jednoznacznie interpretować wyniki opadania zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych, wywołane obniżenie nie może być mniejsze od 15–20 cm.

Końcowa możliwa do uzyskania depresja w warstwach swobodnych zależy również od metody interpretacji wyników. I tak: metoda Theisa i Jacoba wymaga spełnienia warunku  $s_{max} < 0,1H$  lub  $s_{max} < 0,3H$ , jeżeli obliczeń dokonuje się na podstawie depresji skorygowanych:  $s_c = s_m - \frac{(s_m)^2}{2H}$  ( $s_m$  – depresja zmierzona).

Szczególną uwagę należy zwracać na dobór wydajności w warstwach o większej miąższości, zasobnych w wodę, oraz w warstwach ograniczonych. Zarówno bowiem niewielka, jak i za duża wydajność może spowodować otrzymanie niejednoznacznych wyników, uniemożliwiających ich właściwą interpretację. Optymalną wielkość wydajności i depresji należy ustalić na podstawie wyników pompowania oczyszczającego.

### 3.2.2. Konstrukcja otworu

Przy konstrukcji otworu należy zwrócić uwagę na następujące elementy, które zapewnią uzyskanie odpowiedniej wydajności: głębokość otworu, średnicę i zafiltrowanie.

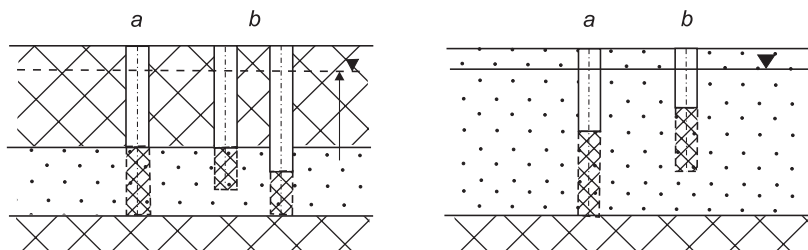
Głębokość otworu zależy od warunków geologicznych występowania warstwy wodonośnej. Należy dążyć do tego, aby głębokość była równa lub większa od głębokości spągu warstwy wodonośnej, co umożliwi wykonanie studni dogłębnej, zabudowę odpowiedniej długości filtru i wytworzenie odpowiedniej depresji. W celu właściwej konstrukcji głębokość wiercenia otworu rozpoznawczego należy dobierać na podstawie wierceń badawczych lub przez analogię do innych otworów studziennych wykonanych w sąsiedztwie rejonu badań.

Średnica otworu powinna umożliwić:

- 1) zabudowę odpowiedniego filtru,
- 2) swobodne zamontowanie pompy o żądanej wydajności i niezakłóconą jej pracę.

**Zafiltrowanie otworu.** Zasadniczy wpływ na uzyskanie określonej wydajności otworu ma odpowiednie jego zafiltrowanie, przy czym najważniejsza jest **długość filtru** i jego umieszczenie w warstwie wodonośnej.

W warstwie swobodnej zwykle wystarcza zafiltrować 1/3 lub 1/2 część warstwy wodonośnej (rys. 3.1), gdyż w trakcie pompowania jej górna część osusza się. W warstwie naporowej należy dążyć do filtrowania 70–80% miąższości warstwy, co pozwala uzyskać około 90% wydajności studni zupełnej (Kruseman, de Ridder, 1979). W warstwach izotropowych głębokość zafiltrowania warstwy wodonośnej odgrywa mniejszą rolę, natomiast ma duże znaczenie w warstwach anizotropowych przy ujmowaniu ich studnią niezupełną.



Rys. 3.1. Schematyczny przekrój studni zupełnej i niezupełnych: a – w warstwie naporowej, b – w warstwie swobodnej

W takich przypadkach należy obowiązkowo filtrować część warstwy o najkorzystniejszej granulacji lub przeprowadzić badania strefowe.

**Średnica filtru** nie wpływa zasadniczo na wydajność otworu. Najkorzystniejsza jest średnica filtru w przedziale 250–460 mm. Zwiększenie jej tylko nieznacznie wpływa na wzrost wydajności – do 10%.

Bardzo ważnym elementem w filtrowaniu jest odpowiedni dobór obsypki. Jednorodność oraz obtoczenie ziaren obsypki musi być lepsze od tych parametrów warstwy wodonośnej, a średnica miarodajna  $d_{50}$  większa 5–10 razy od tejże średnicy ziarn warstwy wodonośnej (Gawryłko, 1964).

### 3.2.3. Dobór pompy i odprowadzenie wody z pompowania

Pompa oraz zabezpieczenie energetyczne powinny zapewnić bezawaryjną pracę przez cały okres próbnego pompowania i utrzymanie stałej wydajności. Maksymal-

na wydajność pompy powinna być około 1,5 raza większa od spodziewanej wydajności pompowania. Przy doborze pompy należy zwrócić uwagę na wielkość jej podnoszenia, co ma wielki wpływ na uzyskiwanie wydajności, gdy odprowadzanie wody następuje długimi rurociągami.

Ogólnie przyjętą zasadą jest, żeby wypompowywana woda z warstwy wodonośnej nie mogła przedostać się z powrotem do warstwy. W związku z tym najlepiej jest ją odprowadzić do cieków lub dużych zbiorników powierzchniowych. Wodę można też odprowadzać do rowów melioracyjnych, lecz po sprawdzeniu ich drożności. W przypadku pompowania warstwy o swobodnym zwierciadle wody i braku jej izolacji od powierzchni należy odprowadzić wodę na odległość równą podwójnej wielkości przewidywanego zasięgu leja depresyjnego. W rozumieniu rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzeniu ścieków do wód lub ziemi oraz substancji szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. nr 212 poz. 1799), wody podziemne nie są ściekami. Mogą więc być one odprowadzane do cieków i kanalizacji deszczowej, a w szczególnych przypadkach do ziemi. Na odprowadzanie wód z pompowania do cieków i kanalizacji należy uzyskać zgodę zarządzających urządzeniem lub wodami albo ich użytkowników. Woda odprowadzana do odbiorników nie może powodować zniszczenia gruntów, podtopień urządzeń i budowli itp.

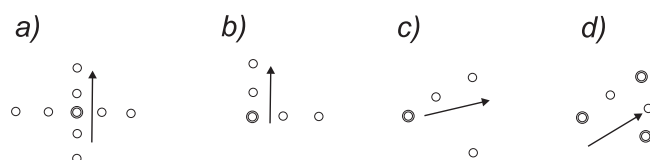
### 3.3. Otwory obserwacyjne (piezometry)

Ogólną zasadą lokalizacji otworów obserwacyjnych jest, aby były one położone w obrębie leja depresyjnego, odzwierciedlały warunki hydrogeologiczne warstwy – jej zmienność i zasilanie, a uzyskiwane wyniki były możliwe do zinterpretowania według znanych metod obliczeniowych.

#### 3.3.1. Rozmieszczenie, liczba otworów obserwacyjnych

Otwory wytycza się w terenie zgodnie z zatwierdzonym projektem na podstawie załączonego, szczegółowego planu sytuacyjno-wysokościowego, który posiada uzgodnioną lokalizację. Układ badawczy złożony z otworu rozpoznawczego (pompowanego) i jednego lub kilku otworów obserwacyjnych nazywamy hydrowężłem. Zaprojektowanie hydrowężła polega na określeniu ilości i rozmieszczenia piezometrów oraz sposobu ich wykonania.

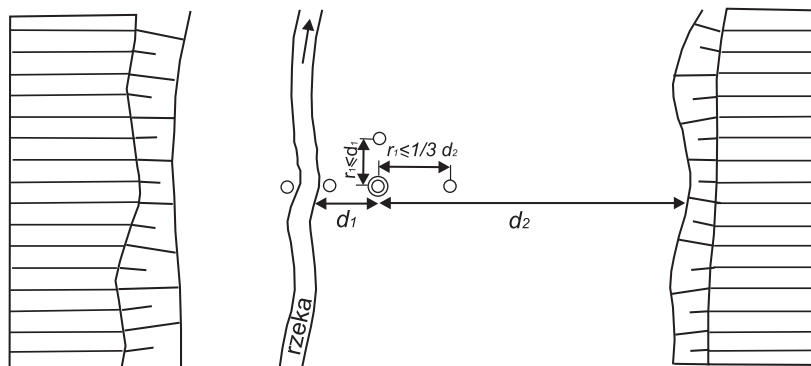
Liczba otworów obserwacyjnych i promieni w hydrowężle zależy od typu i złożoności badanej jednostki hydrogeologicznej, wielkości i rodzaju zadania, głębokości badanego poziomu. Zwykle liczbę otworów obserwacyjnych i promieni hydrowężła określa się według stopnia niejednorodności warstwy wodonośnej, jej warunków granicznych i schematu badawczego (najczęściej ujęcia). W warstwach jednorodnych, nieograniczonych w stosunku do punktu badań, wystarczy jeden promień złożony z dwu lub trzech otworów obserwacyjnych. W miarę potrzeby przy komplikowaniu się warunków hydrogeologicznych liczbę otworów i promieni otworów obserwacyjnych należy zwiększać. Typowe przykłady hydrowężłków do



Rys. 3.2. Typy hydrowęzłów, wg Pazdro (1977): a – krzyżowy, b – prostokątny, c, d – trójkątny (Thiema)

badania prostych układów hydrogeologicznych przedstawione są na rysunku 3.2. Węzły krzyżowe i prostokątne wykonuje się zazwyczaj przy znanym kierunku spływu wody, trójkątny zaś, gdy kierunek ten nie jest znany.

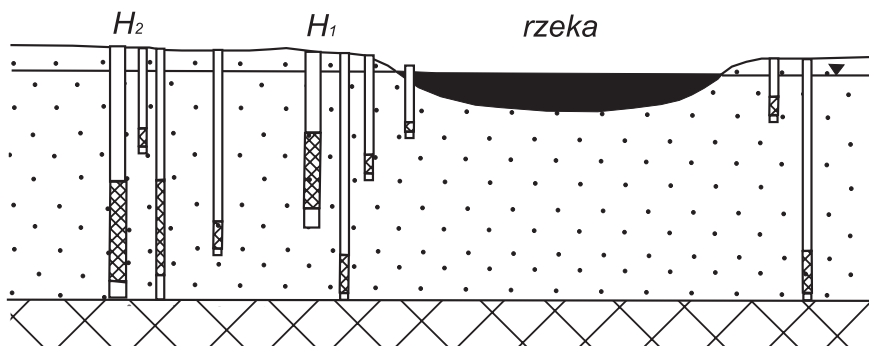
Przy badaniu warstw dolinnych hydraulicznie związanych z rzeką układ otworów obserwacyjnych powinien być następujący: jeden promień prostopadły do rzeki, drugi – równoległy, z tym, że celowe jest założenie otworów obserwacyjnych na obu brzegach rzeki (najlepiej dwa otwory). W promieniu równoległym odległość pierwszego otworu obserwacyjnego nie powinna przewyższać odległości otworu pompowanego od rzeki, natomiast w promieniu prostopadłym odległość pierwszego otworu obserwacyjnego nie powinna być większa niż  $1/3$  odległości otworu pompowanego od granicy doliny (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Hydrowęzeł w dolinie rzecznej, częściowo wg Mironienki (1970):  $d_1$  – odległość otworu pompowanego od rzeki,  $d_2$  – odległość otworu pompowanego od krawędzi doliny

Do badania więzi hydraulicznej warstwy wodonośnej z rzeką należy wykonać hydrowęzeł składający się z dwóch otworów rozpoznawczych, z których pierwszy powinien być położony maksymalnie blisko brzegu, a drugi w zamierzonej odległości lokalizacji ujęcia. Rozmieszczenie otworów w takim hydrowęzle przedstawia rysunek 3.4.

Przy badaniach w skałach szczelinowatych i skrasowiałych należy zakładać dwa promienie otworów obserwacyjnych prostopadłych do siebie (hydrowęzeł prostokątny).

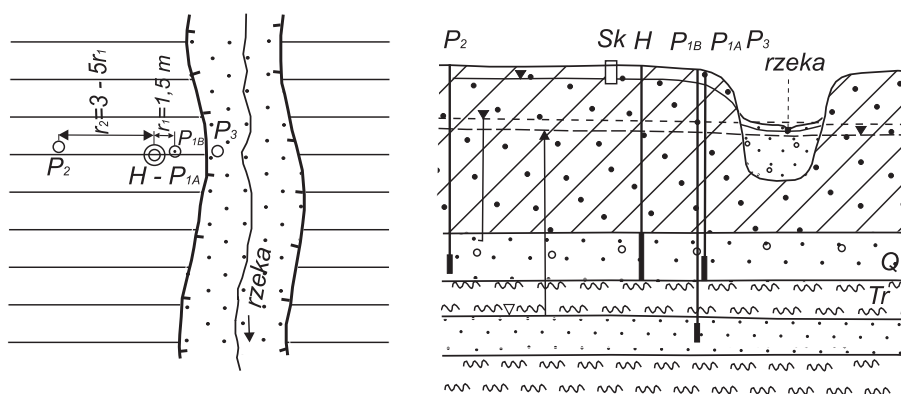


Rys. 3.4. Hydrowęzeł podwójny w pobliżu rzeki (z doświadczeń własnych):  $H_1$  i  $H_2$  – otworki rozpoznawcze (studnie)

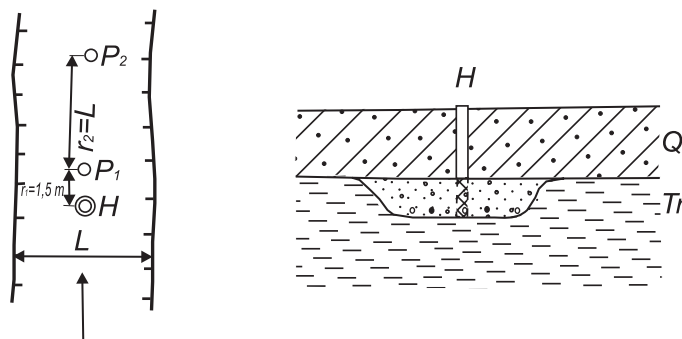
W czasie badania układu hydrogeologicznego wielowarstwowego, w którym spodziewamy się związków hydraulicznych między warstwami wodonośnymi, celowe jest wykonanie otworów obserwacyjnych we wszystkich warstwach w celu śledzenia związków warstw z warstwą pompowaną (rys. 3.5).

W przypadku, gdy pompowanie w jednym otworze nie wywoła reakcji w całym kompleksie wodonośnym (zwłaszcza gdy ma on dużą miąższość), należy wykonać 2 lub 3 otworki pompowe w odległości  $r \leq m$  ( $m$  – miąższość warstwy).

W wąskich jednostkach typu dolin kopalnych, gdy lej depresyjny osiągnie granice boczne, hydrowęzeł należy wykonać w sposób przedstawiony na rysunku 3.6. Otwór rozpoznawczy  $H$  lokalizujemy w środku jednostki, a otworki obserwacyjne wzdłuż jej rozciągłości; pierwszy w odległości  $1,5$  miąższości warstwy, nie dalej niż  $0,5 L$ , drugi w odległości równej co najmniej jej szerokości  $L$ . Wyniki obserwacji w otworze  $P_1$  pozwalają obliczyć parametry filtracyjne warstwy wodonośnej i wpływ granic bocznych, z otworu  $P_2$  zaś uśrednione parametry filtracyjne odnoszące się do stanu hydrodynamicznego i zasobności badanej jednostki hydrogeologicznej w próbie eksploatacyjnej.



Rys. 3.5. Hydrowęzeł w warstwach hydraulicznie związanych (z doświadczeń własnych):  $H$  – otwór rozpoznawczy,  $P$  – otworki obserwacyjne,  $Sk$  – studnia kopana



Rys. 3.6. Hydrowęzeł w małej dolinie kopalnej (z doświadczeń własnych)

### 3.3.2. Odległości otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego

Ogólną zasadą przy doborze odległości otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego jest to, aby w czasie pompowania znalazły się w strefie ruchu quasi-ustalonego i depresja w nich była dostatecznie wielka. Depresja ta w najbliższym otworze powinna wynosić około 20% wartości depresji w otworze pompowanym, a w następnym nie mniej niż 10% tej wartości.

Przy doborze odległości otworów obserwacyjnych należy mieć na uwadze następujące czynniki:

- typ warstwy wodonośnej: naporowa, swobodna,
- przepuszczalność osadów wodonośnych,
- wydajność pompowania,
- zafiltrowanie otworu pompowanego,
- planowany czas pompowania.

Typ warstwy wodonośnej w zasadniczy sposób wpływa na wybranie odległości piezometru. W warstwie naporowej podczas pompowania straty ciśnienia przemieszczają się szybko w zależności od sprężystości badanej warstwy. Natomiast w warunkach swobodnego zwierciadła lej depresyjny rozwija się powoli, zależy przede wszystkim od odsączalności. Dobrze to ilustruje wzór na promień leja w fazie filtracji nieustalonej:  $R_t = 1,5\sqrt{a \cdot t} = 1,5\sqrt{\frac{Tt}{\mu}}$  w warstwach swobodnych,

$R_t = 1,5\sqrt{\frac{Tt}{\mu_s}}$  w warstwach naporowych. Przy braku danych o parametrach  $\mu$  i  $\mu_s$

orientacyjnie zasięg leja dla planowanego czasu próbnego pompowania można określić, biorąc wielkości tych parametrów wg tabeli 3.1.

**Przepuszczalność osadów wodonośnych.** Przy dobrej przepuszczalności osadów, np. w żwirach, lej depresyjny jest rozległy i płaski, natomiast w osadach o gorszej przepuszczalności, np. w piaskach drobnych i mułkowatych, jest on odpowiednio mniejszy i głębszy.

**Od wydajności pompowania** zależy wielkość depresji. Mała wydajność otworu powoduje powstanie niewielkiej depresji i na odwrót. Zatem przy małej wydaj-

Tabela 3.1. Orientacyjne wielkości współczynników zasobności sprężystej i odsączalności dla typowych warstw wodonośnych wg pompowań hydrowęzłowych (dane własne)

Rodzaj warstwy	Głębokość zalegania warstw wodonośnych [m]	Wielkość parametrów magazynowania wód		
		współczynnik zasobności sprężystej [-]	współczynnik odsączalności [-]	
			drobnych szczelin	całkowita
A. Swobodne:				
1. swobodne z porowatością jednorodną,	1–30	–	–	0,13–0,15
2. swobodne z podwójną porowatością (porowo-szczelinowe)	1–50	0,05	0,051	0,19
B. Niezupełnie swobodne	1–50 (najczęściej 1–20)	0,0006–0,0014	0,014	0,06
C. Naporowe	5–30	0,0013–0,0036		
	30–70	0,00012–0,00033		
	70–200	0,0001–0,0003		
	pow. 200	0,00009–0,0001		

ności pompowania otwory obserwacyjne powinny być lokalizowane bliżej otworu pompowanego tak, aby można było uzyskać obniżenie zwierciadła wody możliwe do zinterpretowania.

**Sposób zafiltrowania otworu pompowanego.** W hydrowęzle, którego otwór pompowany jest niezupełny, pierwszy otwór obserwacyjny powinien mieć zabudowany filtr na wysokości położenia filtru otworu pompowanego. Wówczas można go lokalizować w odległości mniejszej niż 1,5 miąższości warstwy, lecz nie bliżej niż 3–5 m od otworu pompowanego ze względu na zakłócenia przepływu w strefie przyfiltrowej. Gdy nie można spełnić warunku zabudowy filtru w przedziale położenia filtru otworu pompowanego, należy wówczas pierwszy otwór obserwacyjny wykonać w odległości  $r \geq 1,5$  m (miąższości).

Wielkość depresji mierzonej w danej odległości od otworu pompowanego w fazie filtracji nieustalanej i quasi-ustalanej jest **funkcją czasu pompowania**. Przy krótkich pompowaniach parametrycznych jest to istotne dla ustalenia odległości otworów dalszych. Odległości drugiego i dalszych otworów obserwacyjnych w hydrowęzle można ustalać według wzoru:

$$r_n = r_1 \alpha^{n-1},$$

gdzie:

$r_1$  – odległość pierwszego otworu obserwacyjnego,

$a$  – współczynnik empiryczny, przyjmowany dla warstw swobodnych – 1,5, dla naporowych – 2,5,

$n$  – kolejny numer otworu obserwacyjnego.

J. Forkasiewicz (1970) zaleca drugi otwór lokalizować:

- w warstwie wodonośnej z przesiąkaniem w odległości  $r_2 < 0,5 R$  przy spełnieniu warunku  $\frac{r_2}{r_1} \geq 3$
- w warstwie swobodnej z granicą strukturalną w odległości  $r_2 < \frac{d}{2}$  i jeśli jest to możliwe:  $\frac{r_2}{r_1} \geq 3$  ( $d$  – odległość otworu pompowanego od granicy).

Tabela 3.2. Odległości piezometrów od otworu pompowanego według Mironienki (1970), Jazwina (1970) i Szczepańskiego (1978)

Rodzaj skał	Orientacyjna wartość współczynnika filtracji		Charakterystyka zwierciadła wody	Odległość od studni do piezometrów	
	[m/s]	[m/d]		pierwszego [m]	drugiego [m]
Gliny piaszczyste, piaski gliniaste i pylaste, spękane łupki piaszczyste	$< 10^{-6}$	$< 0,1$	swobodne	3–5	9–15
			naporowe	20–30	60–90
Piaski drobnoziarniste, piaskowce zwięzłe, mułki	$10^{-6}$ – $10^{-5}$	0,1–1	swobodne	7–10	20–30
			naporowe	50–60	150–180
Piaski drobnoziarniste równomiernie uziarnione, średnioziarniste, różnoziarniste, kruche piaskowce, skały masywne z rzadką siecią spękań	$10^{-5}$ – $10^{-4}$	1–10	swobodne	10–15	30–45
			naporowe	80–100	240–300
Piaski gruboziarniste, żwiry piaszczyste, skały masywne z gęstą siecią drobnych spękań	$10^{-4}$ – $10^{-3}$	10–100	swobodne	15–20	45–60
			naporowe	100–150	300–450
Osady żwirowo-kamieniste, rumosze, skały szczelinowe i skrasowiałe	$> 10^{-3}$	$> 100$	swobodne	20–25	60–75
			naporowe	150–200	450–600



W przypadku istnienia granicy drugi otwór obserwacyjny można zlokalizować przy spełnieniu warunku  $d \geq 9 \cdot m$ . Przy mniejszej odległości otworu pompowanego od granicy można zlokalizować tylko 1 otwór obserwacyjny.

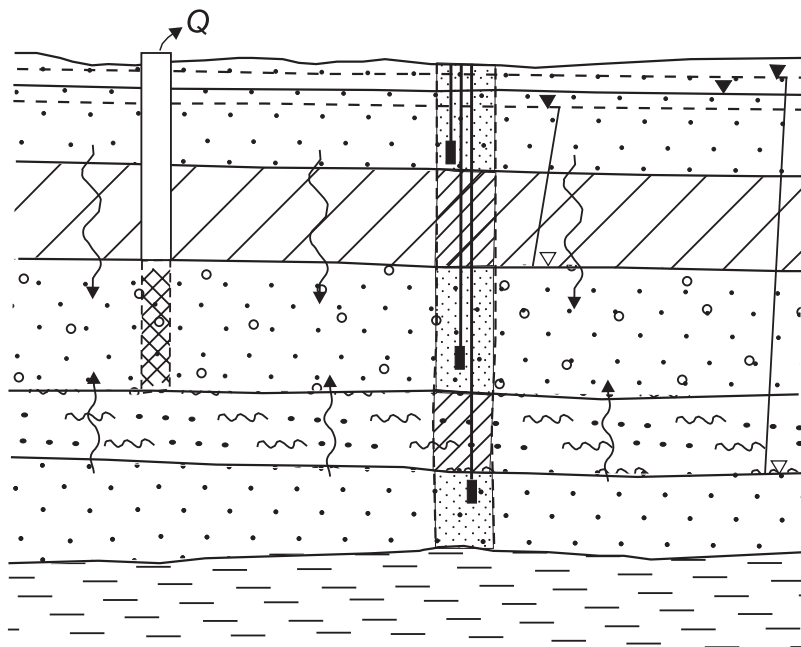
Orientacyjnie odległości piezometrów od otworu pompowanego lub grupy otworów w zależności od charakteru warstwy wodonośnej i warunków przepływu podaje tabela 3.2.

Do śledzenia naturalnych wahań zwierciadła wody w trakcie pompowania (co ma duże znaczenie w dolinach rzecznych) dobrze jest wykonać jeden piezometr poza spodziewanym zasięgiem lejki depresyjnego. Ponadto jako otwory obserwacyjne należy wykorzystywać studnie kopane położone w zasięgu wpływu pompowania.

### 3.3.3. Głębokość posadowienia filtrów w otworach obserwacyjnych

Filtry otworów obserwacyjnych zabudowuje się z zasady na wysokości środkowej części filtru otworu pompowanego. W warstwach wodonośnych, które są cyklotemami sedymentacyjnymi, pożądane jest umieszczenie filtru w strefie o najkorzystniejszej granulacji. W warstwach hydraulicznie związanych z badaną warstwą wodonośną piezometry umieszcza się w spągu warstwy nadległej i w stropie warstwy podległej (rys. 3.7).

Otwory obserwacyjne, których odległości są mniejsze od miąższości warstwy wodonośnej, powinny mieć długość filtru zbliżoną do długości filtru otworu rozpoznawczego w przedziale jego zafiltrowania.



Rys. 3.7. Schemat posadowienia piezometrów w układzie wielowarstwowym (z doświadczeń własnych)

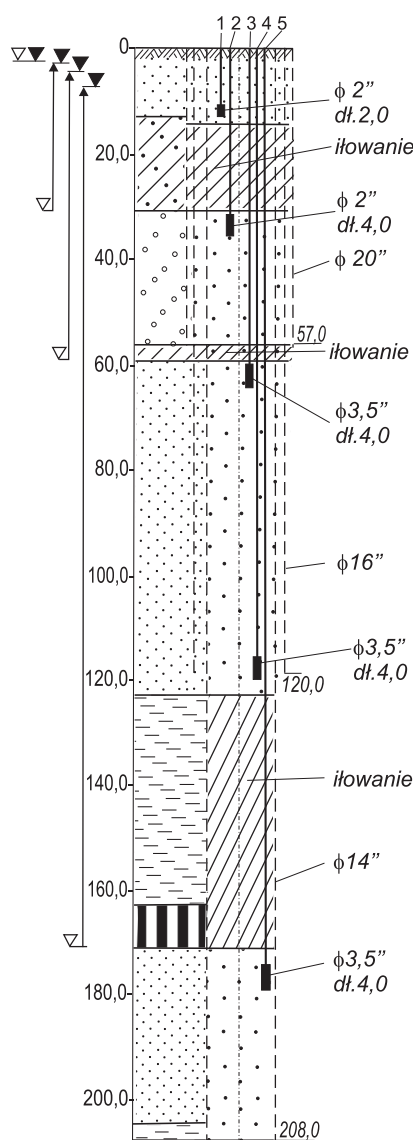
### 3.3.4. Konstrukcje piezometrów

Konstrukcja otworu obserwacyjnego powinna umożliwić dokonanie pomiarów zwierciadła wody nie tylko przy jego najniższym naturalnym poziomie, ale również przy największej depresji wywołanej pompowaniem. Piezometr powinien być dostosowany do pomiarów temperatury wody i ewentualnie poboru próbek wody do badań fizyczno-chemicznych.

Przy automatyzacji pomiarów konstrukcja piezometru musi być dostosowana do parametrów przyrządu pomiarowego. Najmniejsza średnica stosowanych przyrządów wynosi 38–51 mm, natomiast średnice otworów piezometrycznych – od 102 mm. Długość filtru otworu obserwacyjnego nie powinna być mniejsza od 1 m, zwykle wynosi 2–4 m.

Aby otwory obserwacyjne wskazywały prawidłowo położenie zwierciadła wody, muszą być dokładnie oczyszczone z zawiesiny mechanicznej, powstałej w trakcie wiercenia, która bardzo długo utrzymuje się w otworach, powodując kolmatację filtru. Dotyczy to głównie otworów głębokich. Przeciwdziała temu umieszczenie długiej, co najmniej 3-metrowej rury podfiltrowej. Sposób ten można stosować w przypadku, gdy wiercenie prowadzi się w warstwach piaszczysto-żwirowych. Praktycznie należy jednak wszystkie piezometry oczyścić z zawiesiny przez odpowiednio przeprowadzone pompowanie oczyszczające.

Przy rozpoznawaniu wielowarstwowych kompleksów wodonośnych zachodzi konieczność założenia piezometrów na różnych głębokościach w celu obserwacji zwierciadła wody w poszczególnych warstwach. Można je umieścić w jednym otworze wiertniczym o odpowiedniej średnicy, izolując poszczególne poziomy wodonośne przez iłowanie lub cementowanie (rys. 3.8).



Rys. 3.8. Piętrowa zabudowa piezometrów w otworze wiertniczym, wg własnych materiałów dokumentacyjnych

### 3.4. Pomiary w czasie próbnego pompowań

#### 3.4.1. Organizacja i prowadzenie pomiarów

Organizacja prac i badań podczas próbnego pompowania ma wpływ na prawidłowość uzyskanych wyników oraz na jego koszty. Ma to szczególne znaczenie dla pompowań hydrowęzłowych i zespołowych, przy których zaangażowane są znaczne środki techniczne i zwiększona obsługa.

Przed przystąpieniem do próbnego pompowania sporządza się programy ich przeprowadzenia, które następnie w toku badań koryguje się w zależności od uzyskiwanych wyników i czynników nieprzewidzianych.

Ważnym czynnikiem wpływającym na jakość wyników i ich interpretację jest okres wykonywania badań dla poszczególnych rodzajów ujęć. Pompowanie warstw wodonośnych hydraulicznie związanych z ciekami powierzchniowymi powinno być przeprowadzane w okresie stanów niskich lub co najmniej w okresie stałości stanów. Pompowanie warstw wodonośnych o znacznych ciśnieniach piezometrycznych powinno być w miarę możliwości prowadzone w okresie małej zmienności układów barycznych. Należy dążyć do rozpoczynania pompowań w godzinach rannych, by wykonywać pomiary jak najdłużej w ciągu dnia, co ma duży wpływ na ich jakość.

Wszystkie pomiary podczas pompowań należy prowadzić przy stałym nadzorze lub dozorze geologicznym. Powinny one być na bieżąco analizowane. Należy zwrócić szczególną uwagę na obserwację fazy filtracji nieustalonej podczas opadania zwierciadła wody i wzniosu po pompowaniu w pierwszych godzinach i zapewnić na ten czas zwiększoną obsługę pomiarową.

Przed rozpoczęciem pompowania pomiarowego trzeba wykonać kilkakrotnie pomiary położenia zwierciadła wody we wszystkich punktach pomiarowych w celu określenia stanu, do którego odnosić się będą wyniki uzyskane podczas pompowania. Należy także wykonać krótkotrwałą próbę sprawności działania pompy i przyrządów pomiarowych oraz szczelności rurociągu.

Przy prowadzeniu pomiarów w dużej liczbie punktów i w trudnych warunkach atmosferycznych należy zorganizować zaplecze i pomieszczenie do prac kameralnych.

#### 3.4.2. Pomiary wydajności i zwierciadła wody

Częstotliwość pomiarów zwierciadła wody w czasie pompowania zależy od rodzaju badanej warstwy, odległości otworów obserwacyjnych, spodziewanej wielkości opadania i podnoszenia się zwierciadła wody w otworach, możliwości technicznej pomiarów. W pierwszym okresie pompowania pomiary są częstsze, a później rzadsze w zależności od szybkości zmian depresji w obrębie strefy wpływu pompowania. Częstość pomiarów zmian położenia zwierciadła wody należy uzależnić od ich wielkości, aby błąd pomiarowy nie był większy od  $\pm 10\%$ . Jeden pomiar gwizdkiem studziennym powinien więc przypadać na zmianę zwierciadła wody o wielkości 3–5 cm.

Minimalna częstotliwość pomiarów dynamicznego zwierciadła wody w otworze rozpoznawczym (studnia pojedyncza) powinna odpowiadać schematowi:

Czas od rozpoczęcia pompowania [min]	Częstotliwość pomiarów [min]
do 5 min	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0
5–25 min	6; 8; 10; 15; 20; 25;
> 25 min	30; 35; 40; 45; 50; 60 i dalej co 15 min

Podczas pompowań zespołowych i hydrowęzłowych, przy dużej liczbie otworów obserwacyjnych, pomiary w otworach pompowanych na ogół wykonuje się z mniejszą częstotliwością:

- w 1 h – co 15 min,
- od 1 do 3 h – co 30 min,
- od 3 do 24 h – co 1 h,
- od 24 h do końca pompowania według propozycji przedstawionych w tabeli 3.3.

Zmniejszona częstotliwość pomiarów w stosunku do pomiarów w pojedynczym otworze wynika z tego, że najczęściej nie analizuje się wtedy pierwszych odcinków fazy nieustalonej z otworów pompowanych, a analizuje się wyniki z otworów obserwacyjnych.

Dobrze jest prowadzić ciągle pomiar zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym, położonym w strefie leja depresyjnego (najlepiej w połowie jego zasięgu) i w

Tabela 3.3. Częstotliwość pomiarów wydajności opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym i bliskich otworach obserwacyjnych

Wydajność		Zwierciadło wody	
czas pomiarów	okres pomiarów	czas pomiarów	okres pomiarów
$t = 0$	–	$t = 0$	pomiar poziomu statycznego
od rozpoczęcia do 15 min	co 5 min	od rozpoczęcia do 15 min	co 1 min
15–60 min	co 15 min	15–30 min	co 2 min
1–3 h	co 30 min	30–2 h	co 5 min
3–8 h	co 1 h	2–3 h	co 10 min
		3–5 h	co 15 min
		5–8 h	co 30 min
8–24 h	co 1 h	8–24 h	co 1 h
1–3 d	co 2 h	1–3 d	co 2 h
3–6 d	co 4 h	3–6 d	co 4 h
6–12 d	co 6–12 h	6–12 d	co 8–12 h
12–30 d	co 12 h	12–30 d	co 12 h
1–3 miesięcy	co 24 h	1–3 miesięcy	co 24 h

otworze poza przewidywanym zasięgiem, gdy taki istnieje. Otwór poza zasięgiem wpływu pompowania pozwala rejestrować naturalne wahania zwierciadła wody i oceniać ich wpływ na pompowanie.

Ciągły pomiar zwierciadła wody w strefie leja depresyjnego pozwala dokładnie śledzić momenty zmian w szybkości opadania spowodowane zmianami wydajności lub warunkami hydrogeologicznymi objawiającymi się często skokowo. Pomiaru te prowadzi się za pomocą automatycznych mierników poziomu cieczy z zapisem ciągłym.

### 3.4.3. Inne pomiary

Pomiary wodowskazowe na ciekach należy wykonywać w czasie próbnych pompowań otworów w dolinach rzecznych co 12–24 h, w godzinach pomiarów IMiGW.

W przypadku dużych wahań stanów wody w cieku częstotliwość pomiarów należy zwiększyć. Najlepiej jest dokonywać pomiarów za pomocą limnigrafu.

Pomiary temperatury, ciśnienia i wilgotności wykonuje się co 12 h i powinny być one zsynchronizowane z pomiarami wodowskazowymi. Pomiarów ciśnienia i wilgotności dokonuje się w sposób ciągły, przy czym ciśnienie należy mierzyć zwłaszcza przy pompowaniu poziomów głębokich o znacznych ciśnieniach piezometrycznych.

## 3.5. Zmiany wydajności, przerwy w pompowaniu

Ogólną zasadą pompowania jest utrzymywanie przez cały okres pompowania stałej wydajności lub depresji bez przerw i postojów.

W praktyce występują jednak duże trudności z utrzymaniem niezmienną wydajności przez dłuższy okres. Wpływają na to czynniki techniczne oraz hydrogeologiczne. Zmiany wydajności wywołane czynnikami technicznymi nie mogą być większe od  $\pm 10\%$  wydajności danego stopnia pompowania (Forkasiewicz, 1973).

Nierzadko zdarza się w jednostkach hydrogeologicznych o niewielkim zasięgu, że w pompowaniu przekroczymy odnawialność badanej warstwy wodonośnej. Objawia się to systematycznym, równym przyrostem depresji w równych odstępach czasu przez cały okres pompowania (wykres  $s = f(lgt)$  jest wówczas parabolą). Wyników takiego pompowania nie można właściwie zinterpretować. Konieczne jest zmniejszenie wydajności pompowania aż do ustalenia się warunków filtracji.

Gdy w trakcie pompowania nastąpiła przerwa, należy postąpić w następujący sposób:

- na pierwszym stopniu pompowania i w fazie ruchu nieustalonego pompowanie powtarzamy od początku,
- na innych stopniach – pompowanie kontynuujemy dalej do ustalenia się warunków filtracji.

W indywidualnych i zespołowych pompowaniach zasobowych prowadzonych na jednym stopniu dynamicznym w pierwszych 3 dobach pompowanie musi odbywać się bez przerwy. Później, w fazie ruchu quasi-ustalonego, dopuszczalne są

przerwy trwające nie dłużej niż 10% czasu pompowania. Wówczas jednak należy przedłużyć czas pompowania o okres kilkakrotnie dłuższy (3–10 razy) od okresu trwania przerwy.

### 3.6. Czas trwania pompowania

Czas trwania próbnego pompowania ustala się w zależności od:

- celu pompowania,
- rodzaju badanej struktury wodonośnej, jej granic i zasilania,
- uziarnienia warstwy wodonośnej,
- charakteru zwierciadła wody (swobodne, napięte),
- zakładanej metodyki badań.

W związku z tym trudno jest podać dokładne zalecenia co do czasu trwania pompowania. Zazwyczaj pompowania, których zadaniem jest określenie parametrów filtracyjnych, są pompowaniami krótszymi od pompowań mających na celu określenie zasilania i granic warstwy wodonośnej. Ponadto zdecydowany wpływ na długość trwania pompowania ma typ warstwy wodonośnej. Aby uzyskać ten sam efekt w warstwie swobodnej co w naporowej, trzeba pompowanie 2–3-krotnie wydłużyć.

Najlepszym sposobem oceny czasu trwania pompowania jest bieżące wykonywanie i analiza wykresów wskaźnikowych  $s = f(\lg t)$  przy  $Q = \text{const}$  lub  $\frac{s}{Q} = f(\lg t)$

przy  $s = \text{const}$  (studnie z samowypływem).

Pompowanie można zakończyć po uzyskaniu bardzo wyraźnego prostoliniowego odcinka wykresu wskaźnikowego równoległego do osi czasu.

Przyjmuje się, że omawiany prostoliniowy odcinek wykresu  $s = f(\lg t)$  lub  $\frac{s}{Q} = f(\lg t)$  powinien obejmować co najmniej 24 h. Decyzję o zakończeniu pompowania należy poprzedzić analizą osiągniętych wyników.

Jeśli badania prowadzi się po raz pierwszy, to krótkotrwałe pompowanie, które obejmuje tylko okres filtracji nieustalonej, trudno jest interpretować z dostateczną pewnością. Pozwala ono bowiem jedynie na określenie parametrów filtracyjnych warstwy, które są obciążone w pierwszym okresie znacznymi wpływami różnych czynników, a otrzymywany wykres jest ich wypadkową. Prawidłowo parametry z fazy filtracji nieustalonej można określić dopiero po doprowadzeniu do fazy ruchu quasi-ustalonego.

Rodzaj badanej struktury wodonośnej i jej cechy mają zasadniczy wpływ na określenie czasu trwania pompowania, ponieważ prowadzi się je zwykle w celu rozpoznania nie tylko parametrów filtracyjnych, lecz również procesów hydrodynamicznych charakteryzujących daną strukturę. Przy badaniu struktur o nierozpoznanej hydraulicie i drogach krążenia wód pierwsze badania należy celowo wydłużać, aby ujawniły się wszystkie jej cechy hydrodynamiczne. Czas trwania kolejnych próbnych pompowań w tej strukturze można skracać, biorąc pod uwagę uprzednio wykonane badania. Dla typowych struktur wodonośnych występujących

na Niżu Polskim do głębokości około 100 m czas pompowań hydrowęzłowych dla rozpoznania parametrów filtracyjnych i granic warstw wodonośnych w celu prognozowania zasobów wód podziemnych ujęć powinien wynosić:

- w warstwach swobodnych (sandry, tarasy wysokie dolin i pradolin) – 120–600 h,
- w warstwach naporowych (doliny kopalne i utwory fluwioglacjalne) – 90–360 h.

Reasumując, można stwierdzić, że czas próbnego pompowania nie może być ustalany normatywnie, a określać go powinien hydrogeolog prowadzący badanie.

### 3.7. Dzienniki próbnych pompowań

W czasie próbnego pompowania zapis wszelkich pomiarów i obserwacji, czasu ich wykonania, danych technicznych i sytuacyjnych prowadzi się w dzienniku próbnego pompowania. Forma zapisu w dziennikach i ich wzory winny być ujednolicone. Należy stosować zasadę, że dla każdego otworu pompowanego lub obserwacyjnego prowadzi się odrębny dziennik. Wzory dzienników próbnego pompowania dla otworów pompowanych i obserwacyjnych podano w tabelach 3.4 i 3.5. Dzienniki powinny być wypełniane na bieżąco i przechowywane w sposób uniemożliwiający ich zniszczenie. Po zakończeniu pompowania oddzielne dzienniki dla poszczególnych otworów powinny być spięte w jeden załącznik „dzienniki próbnych pompowań”.







### 3.8. Wykresy próbnych pompowań

W czasie trwania pompowania należy śledzić jego przebieg i zgodność z programem. Wszelkie odstępstwa, nieprawidłowości i nieprzewidziane zmiany, wynikłe z przyczyn naturalnych, należy od razu analizować i odpowiednio korygować program pompowania. Szczególną uwagę należy zwracać na wydajność pompowania i zmiany położenia zwierciadła wody, dostosowując do tego częstotliwości pomiarów, czas pompowania itp. Najlepszym sposobem kontroli przebiegu próbnego pompowania jest bieżące sporządzanie wykresów wskaźnikowych. Rozwój lejki depresyjnego przedstawia się za pomocą wykresów wskaźnikowych  $s = f(t)$  oraz wykresów  $s = f(r)$ . Wykresy te można przedstawić w różnych układach współrzędnych: liniowych, liniowo-logarytmicznych oraz logarytmicznych. Niekiedy dla określenia układu współrzędnych liniowo-logarytmicznych zmienia się ten układ na półlogarytmiczny, natomiast dla określenia układu logarytmicznego na bilogarytmiczny. Dla uporządkowania i uproszczenia nazewnictwa przyjęto w niniejszej pracy, że wykres wskaźnikowy  $s = f(t)$  lub  $s = f(r)$  w układzie liniowo-logarytmicznym opisywany będzie jako  $s = f(\lg t)$  lub  $s = f(\lg r)$ . Analogicznie wykres wskaźnikowy  $s = f(t)$  lub  $s = f(r)$  w układzie logarytmicznym opisywany będzie jako  $\lg s = f(\lg t)$  lub  $\lg s = f(\lg r)$ . Konwencja ta dotyczy także innych współrzędnych zwłaszcza dla krzywych wskaźnikowych. Na przykład zamiast pisać o wykresie wskaźnikowym logarytmicznym  $s = f(t)$  w układzie podwójnie logarytmicznym, zapisano krótko  $\lg s = f(\lg t)$ .

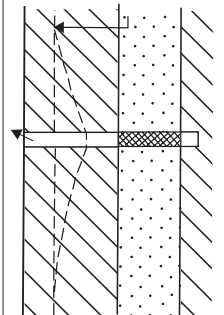
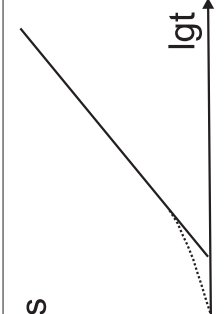
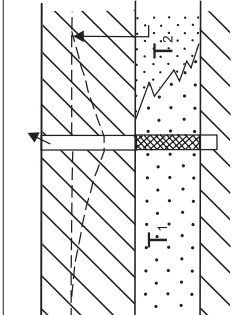
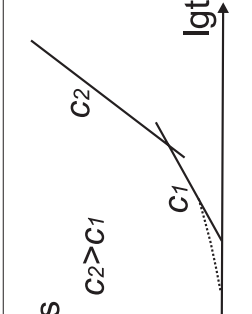
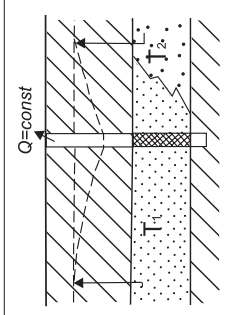
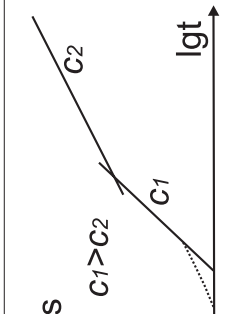
**Interpretacja wykresów wskaźnikowych.** Najbardziej przydatne do analizy przebiegu próbnego pompowania są wykresy  $s = f(\lg t)$  i  $\frac{s}{Q} = f(\lg t)$ .

Interpretacja wykresów  $s = f(\lg t)$  jest bardzo złożona i wymaga od hydrogeologa dużego doświadczenia w zakresie badań filtracji wód podziemnych w określonych strukturach hydrogeologicznych. W tabeli 3.6 podano interpretację wykresów  $s = f(\lg t)$  najczęściej spotykanych układów hydrogeologicznych i sposoby doboru odpowiednich schematów obliczeniowych.

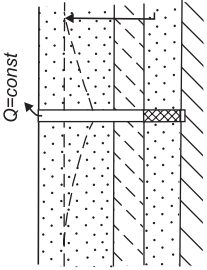
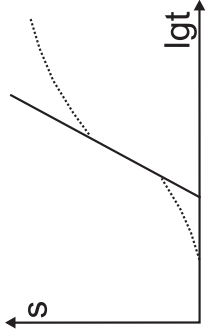
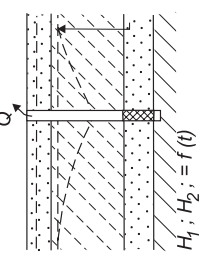
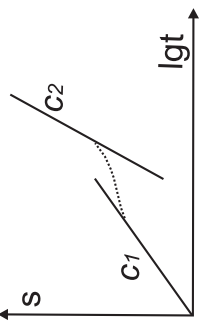
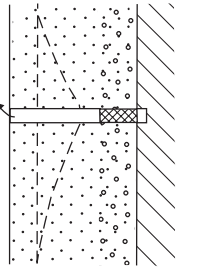
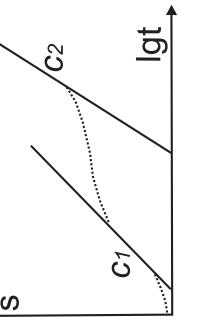
Wyniki pomiarów podczas pompowania zestawia się i analizuje w formie wykresów funkcyjnych. Potrzebne są one do śledzenia przebiegu próbnego pompowania, obliczeń parametrów filtracyjnych i obliczeń zasobowych. Do podstawowych wykresów należą **wykresy zwierciadła wody (depresji) w czasie pompowania, w otworach pompowanych i obserwacyjnych**. Sporządza się je w zależnościach:  $s = f(t)$ ,  $s = f(\lg t)$ ,  $\lg s = f(\lg t)$ .

Wykresy  $s = f(t)$  (rys. 3.9) sporządza się dla wszystkich pompowań wielostopniowych prowadzonych ze stałą  $Q$ . Natomiast wyniki pompowań jednostopniowych i pierwszego stopnia pompowania wielostopniowego dla celów interpretacji powinny być zestawiane na wykresach  $s = f(\lg t)$  i  $\lg s = f(\lg t)$  w celu śledzenia przebiegu pompowania i obliczeń parametrycznych. Do podstawowych wykresów należą też wykresy wydajności w czasie pompowania w funkcji  $Q = f(t)$  (rys. 3.10).

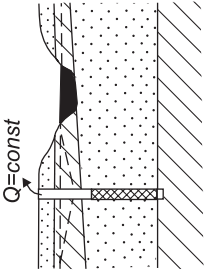
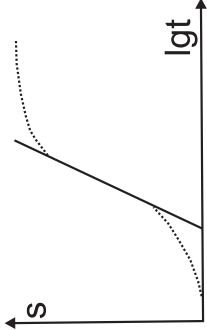
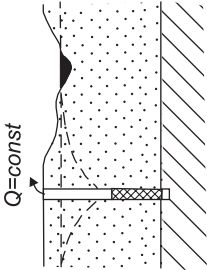
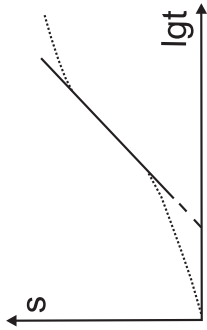
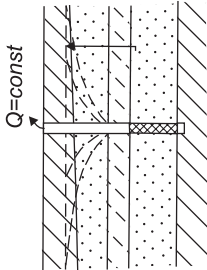
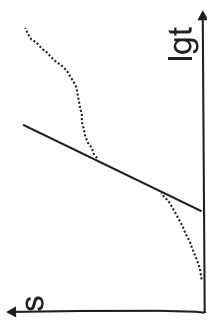
Tabela 3.6. Analiza przebiegu próbnego pompowania na wykresach wskaźnikowych sporządzonych dla studni i otworów obserwacyjnych

Schemat hydrogeologiczny	Wykres $s = f(\lg t)$	Interpretacja hydrogeologiczna
		<p>Wykres, który po pewnym czasie staje się prostoliniowy i ma przez cały okres próbnego pompowania jednakowe nachylenie względem osi <math>\lg t</math>, oznacza warstwę wodonośną o szczelnym stropie i spągu oraz o oddalonych granicach zasilania.</p> <p>Obliczenia parametrów hydrogeologicznych (<math>T, \mu_s, a</math>) wykonuje się według wzoru Theisa.</p>
		<p>Wykres składający się z dwóch odcinków prostoliniowych, z których drugi ma nieco większe nachylenie od pierwszego jest odzwierciedleniem pogorszenia się przewodności warstwy w dalszym obszarze objętym strefą wpływu pompowania.</p> <p>Obliczenia parametrów hydrogeologicznych wykonuje się dla każdego odcinka według wzoru Theisa (nachylenia <math>c_1</math> i <math>c_2</math>).</p>
		<p>Wykres składający się z dwóch odcinków prostoliniowych, z których drugi ma mniejsze nachylenie od pierwszego wskazuje na wzrost przewodności w dalszym obszarze objętym strefą wpływu pompowania.</p> <p>Obliczenia można wykonać według wzoru Theisa.</p>

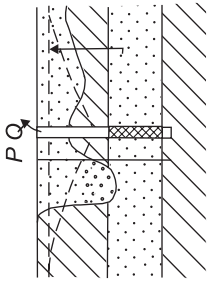
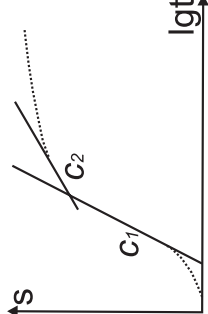
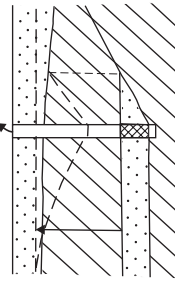
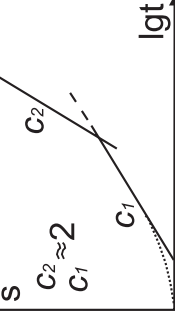
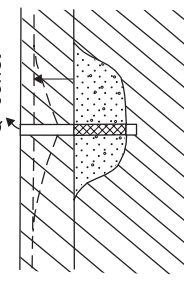
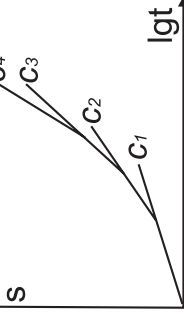
cd. tabela 3.6

<p>Schemat hydrogeologiczny</p>  <p><math>Q = \text{const}</math></p>	<p>Wykres <math>s = f(\lg t)</math></p> 	<p>Interpretacja hydrogeologiczna</p> <p>Wykres ma postać jak na rysunku obok, gdy pompowanie jest wykonywane w warstwie o zwierciadle napiętym i do warstwy tej przesiąka woda z warstwy nadległej, przy czym w wyniku tego nie zachodzi w warstwie zasilającej obniżenie poziomu (<math>H = \text{const}</math>). Przed obliczeniami należy sprawdzić, czy w pobliżu nie istnieje granica zasilania.</p> <p>Obliczenia wykonywać według schematu Hantusha.</p>
<p>Schemat hydrogeologiczny</p>  <p><math>Q</math> <math>H_1, H_2 = f(t)</math></p>		<p>Wykres odzwierciedla system składający się z badanej warstwy wodonośnej i warstwy słabo przepuszczalnej o znacznej pojemności wodnej. W pierwszym etapie udział wód z warstwy słabo przepuszczalnej spowalnia opadanie i prowadzi do okresowej pseudostabilizacji (pochylenie <math>c_1</math>). W końcowej fazie pompowania układ staje się jednorodny i rozwój lejki odbywa się jak w nieograniczonej warstwie swobodnej (nachylenie <math>c_2</math>). Interpretację parametrów prowadzimy dla początkowej fazy pompowania według funkcji <math>W(u, \psi)</math>, a dla końcowej fazy według funkcji Theisa.</p>
<p>Schemat hydrogeologiczny</p>  <p><math>Q = \text{const}</math></p>		<p>Wykres odzwierciedla typowe zachowanie się warstwy swobodnej, nieograniczonej, heterogenicznej. Interpretacji parametrów należy dokonać według schematu obliczeniowego Boultona (wzoru ogólnego). Wartości orientacyjne <math>T, \mu_s, \mu</math> można uzyskać z przybliżenia logarytmicznego.</p>

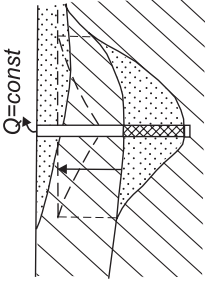
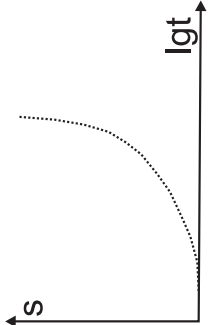
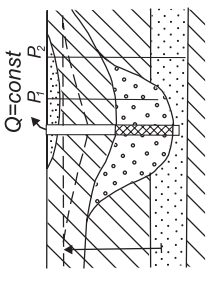
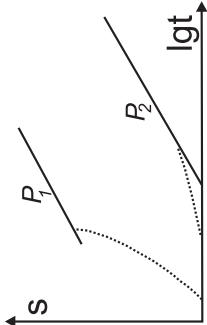
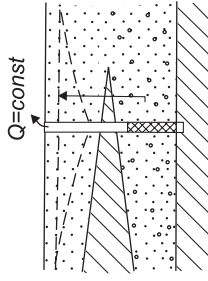
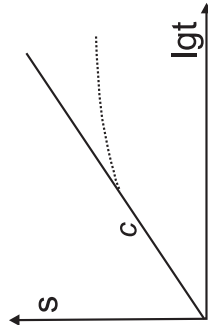
cd. tabela 3.6

<p>Schemat hydrogeologiczny</p>  <p><math>Q=const</math></p>	<p>Wykres <math>s = f(\lg t)</math></p> 	<p>Interpretacja hydrogeologiczna</p> <p>Parametry filtracyjne dla tego układu można obliczyć wg wzorów zarówno filtracji nieustalonej, jak i ustalonej – faza końcowa pompowania.</p>
 <p><math>Q=const</math></p>		<p>Gdy otwór pompowany usytuowany jest w pobliżu rzeki, wykres po pewnym czasie pompowania spłaszcza się i staje się równoległy do osi <math>\lg t</math>. Na ogół zjawisko to zachodzi szybciej w przypadku podparcia hydraulicznego poziomu pod ciśnieniem (jak na rysunku powyżej).</p> <p>Obliczenia parametrów należy wykonywać wg wzorów ogólnych filtracji nieustalonej z uwzględnieniem wpływu granicy lub wzorami na filtrację ustaloną.</p>
 <p><math>Q=const</math></p>		<p>Taką postać przyjmuje wykres, gdy pompowanie jest wykonywane w warstwie o zwierciadle napiętym, do której przesiąka woda z nadległej warstwy zasilającej, a w wyniku tego zjawiska następuje obniżenie się poziomu tej warstwy <math>H = f(t)</math>. Orientacyjną wartość parametrów <math>(T, \mu, a)</math> dla warstwy ujętej można obliczyć według wzoru Theisa lub Hantusha z pierwszego nachylenia. Całość obserwacji musi być zinterpretowana według metody Boultona.</p>

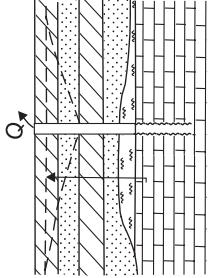
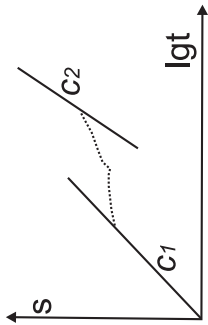
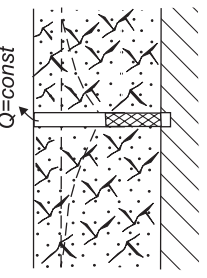
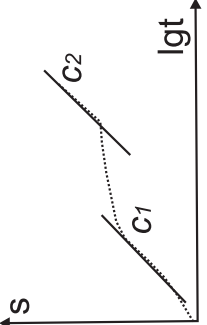
cd. tabela 3.6

<p>Schemat hydrogeologiczny</p> 	<p>Wykres <math>s = f(\lg t)</math></p> 	<p>Interpretacja hydrogeologiczna</p> <p>Pierwsze nachylenie odzwierciedla rozwój lejów w zafiltrowanej regionalnej warstwie wodonośnej. Nachylenie <math>c_1</math> znamionuje podparcie hydrauliczne na strefie rozległego okna hydrogeologicznego. Parametry ujętej warstwy z pierwszego nachylenia obliczamy wg schematu Theisa. Tendencja do dalszej stabilizacji zwierciadła sygnalizuje istnienie okna hydrogeologicznego.</p>
		<p>Jeżeli wykres ma dwa odcinki prostoliniowe i drugi odcinek ma nachylenie około 2-krotnie większe od pierwszego, to w pobliżu występuje boczna granica nieprzepuszczalna. Należy przy tym pamiętać, że gdy przebieg granicy warstw nie jest prostoliniowy, to stosunek nachyleń może przekraczać iloraz wartości 2. Obliczenia parametrów wykonywać należy wówczas według wzoru Theisa wyłącznie z nachylenia pierwszego odcinka.</p>
		<p>Wykres odzwierciedla opadanie zwierciadła wody w wąskiej pasmowej strukturze hydrogeologicznej. Nachylenie <math>c_1</math> odzwierciedla rozwój lejów w obrębie warstwy wodonośnej do granic, kolejne nachylenie <math>c_2, c_3, c_4</math> – wpływ granic bocznych. Ostatnie nachylenie zawiera w sobie uśrednienie wpływu granic nieprzepuszczalnych i zasilających strukturę. Parametry filtracyjne warstwy oblicza się według nachylenia <math>c_1</math> wzorem Theisa.</p>

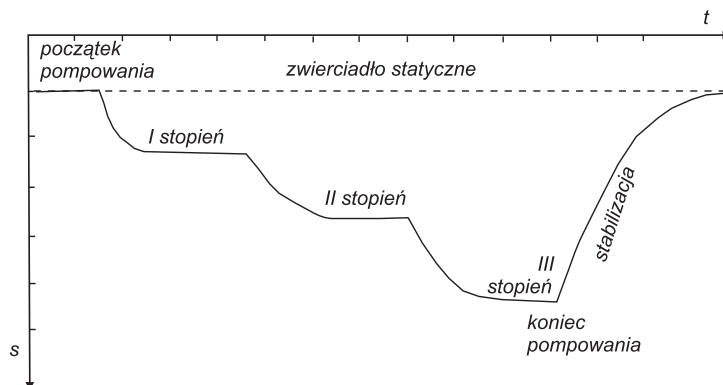
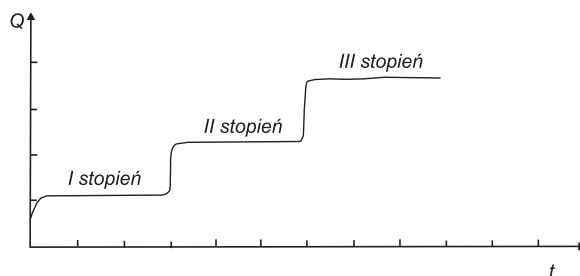
cd. tabela 3.6

<p>Schemat hydrogeologiczny</p>  <p><math>Q=const</math></p>	<p>Wykres <math>s = f(lg t)</math></p> 	<p>Interpretacja hydrogeologiczna</p> <p>Jeżeli wykres <math>s = f(lg t)</math> ma postać zbliżoną do paraboli, tzn. że badana warstwa jest otoczona konturem skał przepuszczalnych lub bardzo słabo przepuszczalnych. Następuje wówczas szperywanie zasobów statycznych w badanej warstwie. Obliczeń wykonywać nie można. Należy zmniejszyć wydajność studni i doświadczalnie uzyskać warunki ustalonego przepływu.</p>
<p>Schemat hydrogeologiczny</p>  <p><math>Q=const</math></p>		<p>Jeżeli wykres <math>s = f(lg t)</math> ma początkowo postać zbliżoną do paraboli, a po pewnym czasie trwania pompowania przybiera postać prostej o określonym nachyleniu, to charakteryzuje on osady o dobrej przepuszczalności złożone w wąskich wcięciach erozyjnych w obrębie znacznie mniej przepuszczalnych osadów starszych. Z nachylenia prostej odpowiadającej można obliczyć <math>T</math> według wzoru Theisa.</p>
<p>Schemat hydrogeologiczny</p>  <p><math>Q=const</math></p>		<p>Pompowana warstwa naporowa w dalszym otoczeniu staje się warstwą swobodną. Ze względu na zmienną odsączalność następuje dodatkowy dopływ wody prowadzący do stabilizacji, podobnie jak przy granicy <math>H = const</math>. Proces ten jednak jest rozciągnięty w czasie. Efekt oddziaływania tej strefy jest dwójakiego rodzaju: raz jako granica zasilająca, drugi raz jako zmiana przewodności w otoczeniu. Parametry interpretujemy wg schematu Theisa lub według wzoru Dupuit przy ustaleniu się warunków filtracji.</p>

cd. tabela 3.6

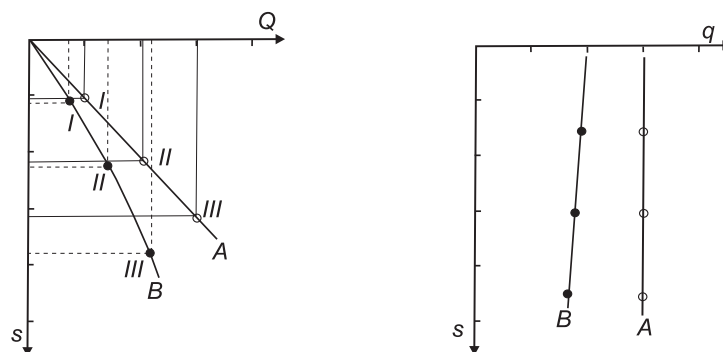
<p>Schemat hydrogeologiczny</p> 	<p>Wykres <math>s = f(\lg t)</math></p> 	<p>Interpretacja hydrogeologiczna</p> <p>Wykres odzwierciedla podwójną porowatość masywu skał szczelinowych: system szczelin dużych w początkowej fazie i system porów lub szczelin drobnych w drugiej fazie. Wykresy są podobne do wykresów Boultona. Interpretacji parametrów dokonujemy według wzorów filtracji nieustalonej (Theisa, Hantusha, Boultona) dla dwóch odcinków nachyleń.</p>
<p>Schemat hydrogeologiczny</p> 		<p>Wykres odzwierciedla podwójną porowatość poszczelinowego masywu skał porowatych typu piaskowce w warunkach warstwy swobodnej. W pierwszej fazie następuje szybki rozwój lejów w szczelinach tektonicznych (nachylenie <math>c_1</math>), w fazie drugiej pseudostabilizacji – opóźnione odsączenie z masywu, w fazie trzeciej zaś (nachylenie <math>c_2</math>) charakteryzuje odsączenie z porów międzyziarnowych masywu. Interpretacji dokonujemy według wzorów filtracji nieustalonej (Theisa, Boultona) dla dwóch odcinków nachyleń</p>

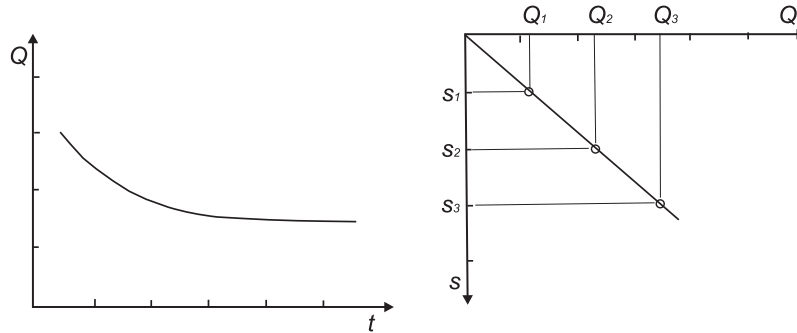


Rys. 3.9. Wykres  $s = f(t)$ Rys. 3.10. Wykres  $Q = f(t)$ 

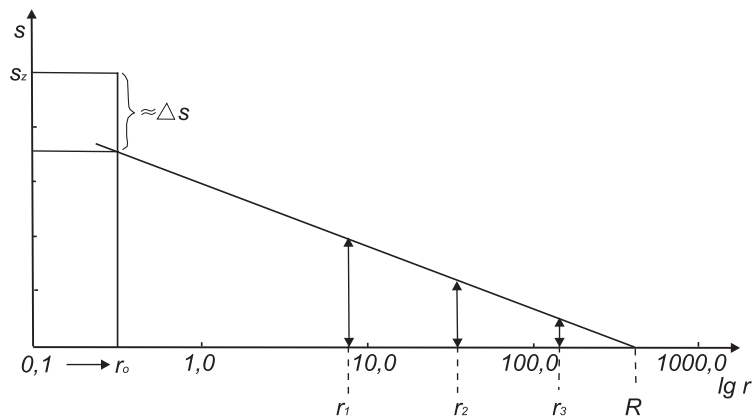
Podczas pompowania ze stałą depresją ( $s = \text{const}$ ) i pompowania o zmiennej wydajności wykresy należy sporządzać w zależności  $\frac{s}{Q} = f(\lg t)$  i  $\frac{s}{Q} = f(Q)$ .

Do analizy pompowań wielostopniowych oprócz podanych powyżej wykresów sporządza się dla otworów pompowanych jeszcze dwa wykresy: wykres zależności wydajności od depresji  $Q = f(s)$  i wykres wydajności jednostkowej  $q = f(s)$  (rys. 3.11). Dla samowypływów ze studzien artezyjskich sporządza się najczęściej wy-

Rys. 3.11. Wykresy:  $Q = f(s)$  i  $q = f(s)$ : A – przy naporowym zwierciadle wody, B – przy swobodnym zwierciadle wody, I-III – kolejne stopnie pompowania

Rys. 3.12. Wykresy  $Q = f(t)$  i  $s = f(Q)$ 

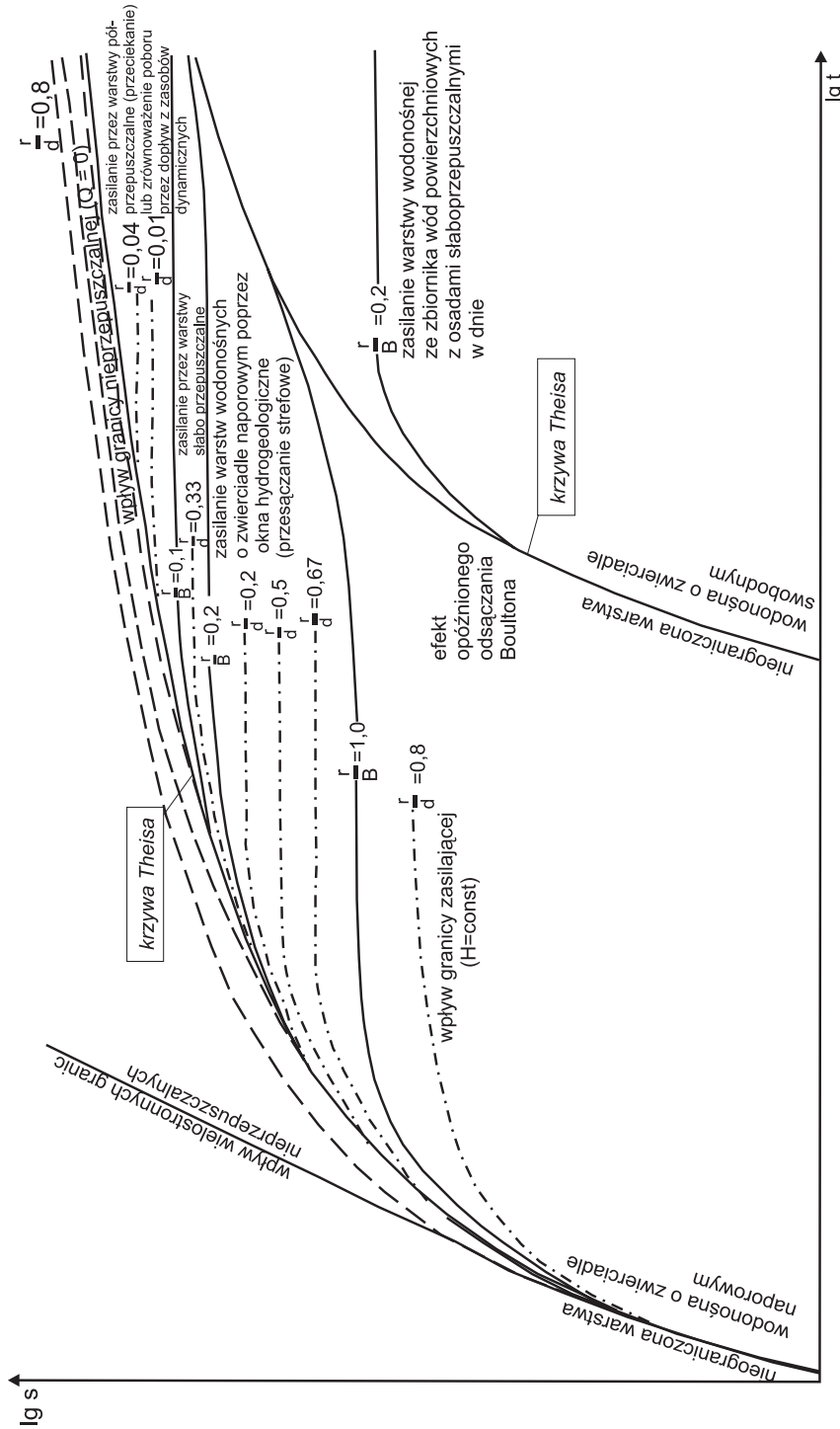
kresy w zależnościach  $Q = f(t)$  i  $s = f(Q)$  (rys. 3.12). Gdy prowadzi się obserwacje w kilku otworach na promieniu hydrowęzła, sporządza się wykresy  $s = f(\lg r)$  pozwalające graficznie wyznaczyć zasięg leja depresji  $R$  oraz orientacyjnie wielkość zeskoku hydraulicznego na filtrze w warstwach jednorodnych (rys. 3.13).

Rys. 3.13. Wykres  $s = f(\lg r)$ :  $s_1-s_3$  – depresja w otworach obserwacyjnych,  $s_0$  – depresja w otworze pompowym,  $r_0$  – promień otworu pompowego,  $\Delta s$  – wielkość zeskoku hydraulicznego na filtrze

Do analizy wzniosu zwierciadła wody należy wykonywać następujące wykresy:

- po pompowaniu jednostopniowym i uzyskaniu stabilizacji dynamicznej  $s = f(\lg t)$ ,
- po pompowaniu, w którym nie uzyskano stabilizacji dynamicznej,  $s = f\left(\lg \frac{t_p + t}{t}\right)$ .

Wykresy  $s = f(\lg t)$  oraz  $\lg s = f(\lg t)$  służą do interpretacji parametrów filtracyjnych z faz filtracji nieustalonej. Ogólne zasady interpretacji wykresów  $\lg s = f(\lg t)$  przedstawia rysunek 3.14.



Rys. 3.14. Zasady interpretacji hydrogeologicznej wykresów  $\lg s = f(\lg t)$

## 4. WYZNACZANIE PARAMETRÓW HYDRAULICZNYCH STUDNI

Na wielkość depresji zwierciadła wody w pompowanej studni wpływ mają zjawiska hydrauliczne wywołane przepływem laminarnym, występującym w ujętej warstwie wodonośnej oraz dodatkowe straty ciśnienia hydrodynamicznego w związku z przepływem turbulentnym i mieszanym, który może zaistnieć w otoczeniu studni – w jej strefie przyfiltrowej (Macioszczyk, 1974). Dodatkowe opory w przepływie wody spowodowane mogą być: zaburzeniem struktury osadów wodonośnych w trakcie wiercenia studni, ich kolmatacją podczas wierceń obrotowych z użyciem płuczki wiertniczej, niepełnością studni, nieodpowiednim doбором filtra i obsypki filtracyjnej, a także samym procesem przepływu wody wewnątrz studni. Opory przepływu laminarnego wywołują depresję w warstwie wodonośnej, zwaną depresją rzeczywistą –  $s_w$ , natomiast opory przepływu turbulentnego uwidaczniają się w postaci depresji dodatkowej, zwanej zeskokiem hydraulicznym –  $\Delta s$ .

Problematyka usprawniania warunków dopływu wody do studni wierconych została podjęta już w latach trzydziestych ubiegłego wieku w praktyce amerykańskiego wiertnictwa hydrogeologicznego (Siwek, 1978). Wychodząc naprzeciw potrzebie określania wielkości strat hydraulicznych i kontroli poprawności wykonania studni, Jacob (1946, 1950) przedstawił wzór:

$$s = BQ + CQ^2 \quad [4.1]$$

opisujący matematycznie rozdział depresji w studni w zależności od oporów przepływu laminarnego w warstwie wodonośnej  $BQ$  i oporów przepływu turbulentnego w strefie przyfiltrowej i samej studni  $CQ^2$ .

W podanym wzorze [4.1] symbole literowe oznaczają:

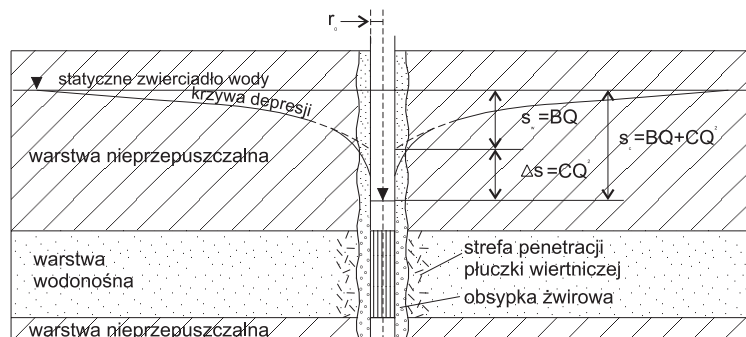
$s$  – całkowitą depresję w studni zmierzoną przy danej jej wydajności  $Q$ ,

$B$  – współczynnik oporów przepływu laminarnego w warstwie wodonośnej, zwany współczynnikiem oporu hydraulicznego warstwy,

$C$  – współczynnik oporów przepływu turbulentnego wokół studni, na ściankach filtra i wewnątrz studni, zwany współczynnikiem oporu studni.

Rozkład oporów hydraulicznych występujących przy pompowaniu otworu studziennego przedstawiono na rysunku 4.1.

Założenia Jacoba (1950) zostały następnie rozwinięte przez Rorabaugh (1953). Zestawiając założenia sformułowane przez Jacoba i Rorabaugh, możemy zapisać, że: depresja rzeczywista –  $s_w$  opisana wzorami na dopływ do studni, wyrażana jest jako  $BQ$ , gdzie  $B$  jest współczynnikiem oporu warstwy wodonośnej (współczynnik oporów przepływu laminarnego), a  $Q$  wydatkiem pompowania. Depresja dodatkowa (zeskok) –  $\Delta s$  może być opisana przy użyciu parametru  $C$ , ozna-



Rys. 4.1. Rozkład oporów hydraulicznych przy pompowaniu otworu studziennego (za Siwek, Mańkowski, 1981)

czającego współczynnik oporu studni (współczynnik oporów przepływu turbulentnego). Przy czym może być ona wyrażona jako:  $\Delta s = CQ^2$  – przy przyjęciu założenia Jacoba, że strefa ruchu turbulentnego, tzn. odległość od osi studni do punktu, w którym ruch zmienia charakter z laminarnego na turbulentny, jest stała i niezależna od wydatku studni, lub  $\Delta s = CQ^n$  – przy przyjęciu założenia Rorabaugha, że strefa ruchu turbulentnego rozszerza się ze wzrostem wydatku. Wykładnik potęgowy przyjmuje wartość  $n > 2$ .

Całkowita depresja w studni jest zatem funkcją wydatku pompowania  $s_c = f(Q)$  i można ją wyrazić jako sumę oporów przepływu laminarnego i turbulentnego:

$$s_c = s_w + \Delta s = BQ + CQ^2 \quad \text{według Jacoba,} \quad [4.2]$$

$$s_c = s_w + \Delta s = BQ + CQ^n \quad \text{według Rorabaugha.} \quad [4.3]$$

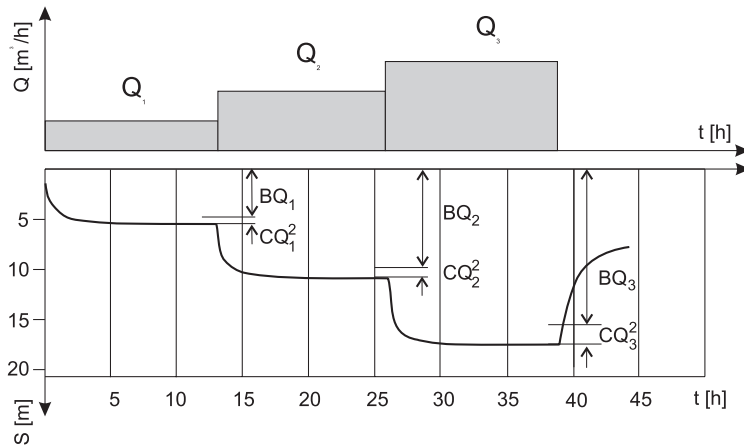
Teoria Jacoba-Rorabaugha wykorzystywana jest do oceny parametrów hydraulicznych studni na podstawie wyników przeprowadzonych w nich pompowań badawczych. Do niedawna najpowszechniej stosowa była metoda pompowania na kilku stopniach dynamicznych z depresją ustaloną na każdym stopniu (rys. 4.2).

Uzyskany z takich pompowań materiał badawczy umożliwia graficzną interpretację parametrów hydraulicznych studni. W praktycznym zastosowaniu przeważa sposób obliczeń dostosowany do założeń Jacoba, gdzie wartość parametru  $C$  wyznacza się na wykresie funkcji w oparciu o metodykę, zaproponowaną przez Bruna i Hudsona (rys. 4.3).

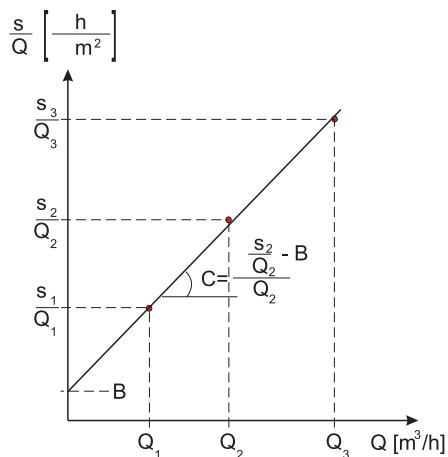
Zgodnie z tą metodyką wyjściowy wzór Jacoba (4.1) może być przekształcony do postaci:

$$C = \frac{\frac{s}{Q} - B}{Q}, \quad [4.4]$$

a na podstawie wyników pompowania wielostopniowego sporządza się wykres umożliwiający graficzne wykonanie obliczeń (rys. 4.3). W tym celu w układzie



Rys. 4.2. Wykresy czasowe funkcji  $sQ = f(t)$  oraz  $s = f(t)$  dla oceny stanu technicznego studni na podstawie 3-stopniowego pompowania badawczego



Rys. 4.3. Graficzna metoda oceny stanu technicznego studni na wykresie funkcji

współrzędnych prostokątnych na osi odciętych odczytuje się wartości oporu hydraulicznego (depresji jednostkowej)  $s_1/Q_1, s_2/Q_2, s_3/Q_3$  itd. dla kolejnych stopni pompowania, a na osi rzędnych nanosi odpowiadające tym wartościom wydajności pompowania  $Q_1, Q_2, Q_3$  itd. Uzyskane punkty powinny wyznaczać linię prostą, która przedłużona do przecięcia się z osią rzędnych wyznacza na niej wartość współczynnika  $B$  (oporu hydraulicznego warstwy wodonosnej). Z kolei współczynnik  $C$  (oporu hydraulicznego studni) jest tangensem kąta, jaki wyznacza poprowadzona prosta w stosunku do osi odciętych, a więc obliczenie wykonujemy zgodnie z wzorem (4.4), zapisując:

$$C = \frac{\frac{s_2}{Q_2} - B}{Q_2} \quad [4.5]$$

Sposób wyznaczania współczynnika  $C$  w oparciu o teorię Rorabaugha jest bardziej skomplikowany ze względu na fakt, że dla wartości  $n > 2$  wzorcowy przebieg wykresu nie jest linią prostą. W praktyce rozwiązanie to ograniczone jest do przypadków, gdy pompowanie prowadzono na 4 i więcej stopniach dynamicznych. Zasady interpretacji przedstawione są w pracy Siwka i Mańkowskiego (1981).

Tabela 4.1. Stan usprawnienia studni w zależności od współczynnika C (wg Waltona, 1962)

Stan studni	$C \left[ \frac{h^2}{m^5} \right]$
Studnia prawidłowo zaprojektowana i wykonana	<0,00015
Studnia umiarkowanie zanieczyszczona lub zakolmatowana	0,00015–0,00030
Studnia z zaawansowanym zanieczyszczeniem lub kolmatacją	0,00030–0,0012
Studnia znacząco zanieczyszczona lub zakolmatowana	>0,0012

Współczynnik oporu studni C odnosi się do strat wysokości hydraulicznej (przyrostu depresji) w samej studni i w strefie przyfiltrowej, jest więc miernikiem stanu technicznego studni pod względem hydraulicznym. Według Waltona (1962) ocena stanu technicznego studni może być dokonana poprzez porównanie wyznaczonej wartości parametru C (wg formuły Jacoba) z wartościami kryterialnymi podanymi w tabeli 4.1.

Polska norma PN-G-02318 pt. „Studnie wiercone, zasady projektowania, wykonania i odbioru” wprowadza jeden tylko wymóg jakościowy studni, aby współczynnik C nie był większy niż 0,0003 h<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>.

Poprawę cech hydraulicznych studni można przedstawić za Rorabaugh (Siwek, 1979) syntetycznym parametrem  $\eta$ , oznaczającym sprawność studni. Sprawność studni jest określona stosunkiem depresji obliczeniowej, wynikającej z założenia o laminarnym dopływie wody do studni, do depresji pozornej mierzonej wewnątrz studni:

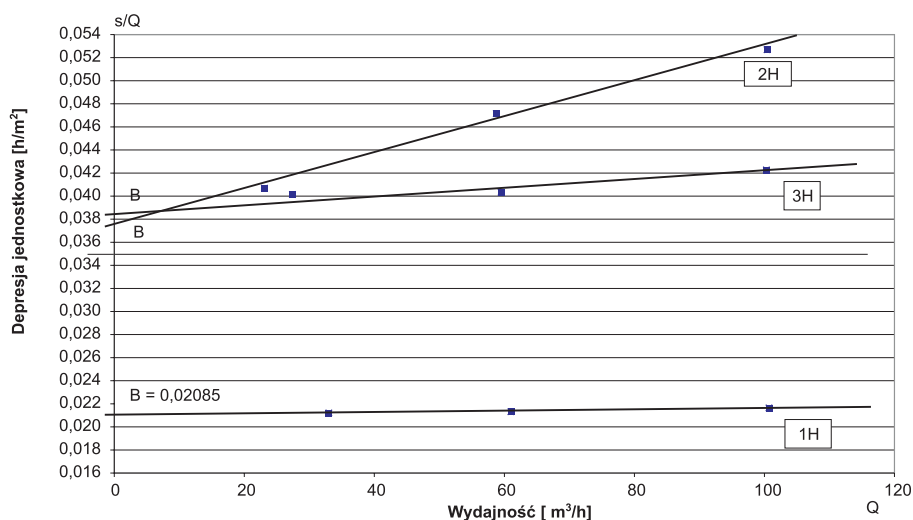
$$\eta = \frac{s_w}{s_c} = \frac{BQ}{s_c} = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \quad [4.6]$$

#### 4.1. Próbné pompowania kilkustopniowe z czasem trwania każdego stopnia powyżej doby

Na rysunku 4.4 przedstawiono wykresy funkcji  $\frac{s}{Q} = f(Q)$  dla graficznej oceny sprawności trzech studni (1H, 2H, 3H), wykonanych dla jednego z ujęć komunalnych w poziomie o zwierciadle swobodnym w zasięgu osadów Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej o zbliżonej miąższości warstwy wodonośnej od 12,3 do 14,0 m, ujętej filtrami szczelinowymi PCV Ø 315 mm z obsypką żwirową o ziarnie 2–3 mm. Długość filtrów: studnia 1H – 7 m, studnia 2H – 7,1 m, studnia 3H – 5,4 m.

Z wykresów wyznaczono następujące wartości współczynnika B oraz obliczono wartości współczynnika C:

Studnia 1H	$B = 0,02085 \text{ h/m}^2$ ,	$C = 0,00000794 \text{ h}^2/\text{m}^5$ ,
Studnia 2H	$B = 0,0377 \text{ h/m}^2$ ,	$C = 0,000149 \text{ h}^2/\text{m}^5$ ,
Studnia 3H	$B = 0,0384 \text{ h/m}^2$ ,	$C = 0,0000386 \text{ h}^2/\text{m}^5$ .



Rys. 4.4. Wykresy funkcji dla graficznej oceny stanu technicznego studni wykonanych w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej

Według kryteriów Waltona (tab. 4.1) studnie 1H i 3H są w pełni sprawne. Studnia 2H plasuje się na granicy poprawnego wykonania.

W kolejnych tabelach zestawiono wyniki próbnych pompowań oraz obliczone składowe depresje z wykorzystaniem obliczonych współczynników.

Ocena prawidłowości zaprojektowania i wykonania studni w oparciu o parametr C ma zastosowanie głównie dla studni ujmujących wodę ze zbiorników porowych. W zbiornikach szczelinowych i szczelinowo-krasowych część systemów szczelin i kawern, niekiedy najlepiej przewodzących wodę, w trakcie rozwoju depresji ulega osuszeniu i stąd studnie te mogą posiadać współczynnik C większy od  $0,0003 \text{ h}^2/\text{m}^5$ , pomimo że są to studnie bezfiltrowe lub z filtrem z rury perforowanej.

Celem zminimalizowania wielkości zeskoku na filtrze ( $\Delta s$ ) i osiągnięcia depresji w studni ( $s_c$ ) zbliżonej do depresji rzeczywistej w warstwie wodonośnej ( $s_w$ ) prowadzi się zabiegi usprawniające studnię po jej wykonaniu lub w trakcie renowacji. Dla nowo odwierconych otworów z reguły wystarczające dla osiągnięcia zadowa-

Tabela 4.2. Rozkład depresji w pompowaniu studni 1H

Wydajność pompowania	Depresja rzeczywista w warstwie wodonośnej	Zeskok hydrauliczny	Depresja całkowita w studni (wg wzoru Jacoba)	Sprawność studni
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$s_w = BQ \text{ [m]}$	$\Delta s = CQ^2 \text{ [m]}$	$s_c = BQ + CQ^2 \text{ [m]}$	$\eta = \frac{s_w}{s_c}$
$Q_1 = 33,0$	0,69	0,01	$s_1 = 0,69 + 0,01$	0,99
$Q_2 = 61,0$	1,27	0,03	$s_2 = 1,27 + 0,03$	0,98
$Q_3 = 100,7$	2,10	0,08	$s_3 = 2,10 + 0,08$	0,96



Tabela 4.3. Rozkład depresji w pompowaniu studni 2H

Wydajność pompowania	Depresja rzeczywista w warstwie wodonośnej	Zeskok hydrauliczny	Depresja całkowita w studni (wg wzoru Jacoba)	Sprawność studni
$Q$ [m <sup>3</sup> /h]	$s_w = BQ$ [m]	$\Delta s = CQ^2$ [m]	$s_c = BQ + CQ^2$ [m]	$\eta = \frac{s_w}{s_c}$
$Q_1 = 23,10$	0,87	0,07	$s_1 = 0,87 + 0,07$	0,92
$Q_2 = 58,75$	2,21	0,56	$s_2 = 2,21 + 0,56$	0,80
$Q_3 = 100,4$	3,78	1,51	$s_3 = 3,78 + 1,51$	0,71

Tabela 4.4. Rozkład depresji w pompowaniu studni 3H

Wydajność pompowania	Depresja rzeczywista w warstwie wodonośnej	Zeskok hydrauliczny	Depresja całkowita w studni (wg wzoru Jacoba)	Sprawność studni
$Q$ [m <sup>3</sup> /h]	$s_w = BQ$ [m]	$\Delta s = CQ^2$ [m]	$s_c = BQ + CQ^2$ [m]	$\eta = \frac{s_w}{s_c}$
$Q_1 = 27,4$	1,05	0,05	$s_1 = 1,05 + 0,05$	0,95
$Q_2 = 59,5$	2,28	0,16	$s_2 = 2,28 + 0,16$	0,95
$Q_3 = 100,3$	3,85	0,39	$s_3 = 3,85 + 0,39$	0,91

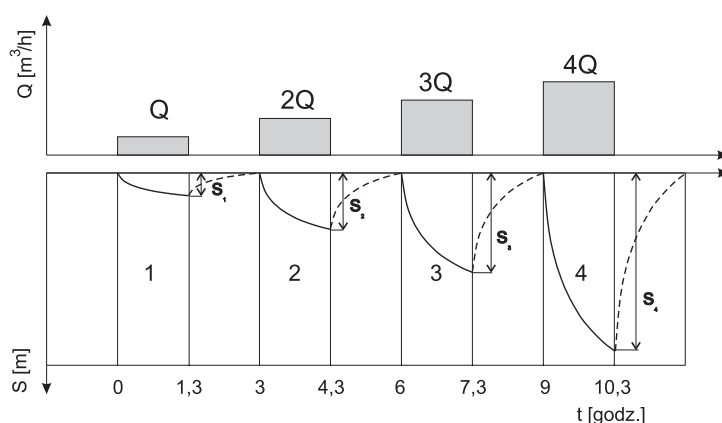
lającej sprawności jest prawidłowo wykonane pompowanie oczyszczające. Przywracanie sprawności studni starych wymaga stosowania bardziej skomplikowanych metod w postaci mechanicznego, hydraulicznego, chemicznego, a także pneumatycznego oddziaływania na ścianki filtra, obsypkę i warstwę wodonośną. Sprawność studni określa się w procentach jako stosunek depresji rzeczywistej do depresji całkowitej.

Przedstawiona powyżej metodyka wyznaczania stanu technicznego studni stosowana może być wtedy, gdy pompowanie prowadzono na kilku stopniach dynamicznych aż do uzyskania ustalonej depresji na każdym stopniu. Ten rodzaj pompowania nie jest obecnie zalecany (patrz: dalsza część rozdziału), niemniej jednak olbrzymia część materiałów z archiwalnych pompowań badawczych dotyczy takich właśnie przypadków. Niejednokrotnie, zwłaszcza do celów modelowania matematycznego, zachodzi konieczność powtórzonego interpretowania tych pompowań dla wydzielenia z depresji całkowitej tej jej części, która charakteryzuje parametry warstwy wodonośnej, a nie warstwy i studni łącznie. W takich przypadkach reinterpretacji pompowań dokonuje się według powyższych zasad i jest to niezbędne dla prawidłowego skonstruowania map przewodności modelowanych warstw wodonośnych. Nieuwzględnienie zeskoków hydraulicznych studni przy obliczeniach współczynnika filtracji prowadzi do zaniżania przewodności i w konsekwencji do błędnych obliczeń zasobowych. Błędy prognoz modelowych opartych na niezreinterpretowanych wynikach pompowań mogą dochodzić nawet do 20% (Kapuściński, 1989).

## 4.2. Krótkotrwałe pompowania jednostopniowe powtarzalne

Treść tego podrozdziału jest identyczna z treścią podrozdziału 5.5.2 w wydanej już „Metodyce określania zasobów eksploatacyjnych ujęć zwykłych wód podziemnych” (Dąbrowski i in., 2004) dla zachowania tożsamości w przekazie opisu proponowanej metody. Metoda polega na wykonaniu 3 do 5 pompowań jednostopniowych, przedzielonych przerwami niezbędnymi do ustabilizowania zwierciadła wody (Mogg, 1969; Forkasiewicz, 1973; Siwek, Mańkowski, 1981; Castany, 1982; Grenier, 1985), w takim stopniu, aby kolejny cykl pompowania rozpoczął przy w miarę ustalonym statycznym poziomie zwierciadła wody w studni (rys. 4.5). Wydajności w kolejnych pompowaniach powinny wzrastać według schematu  $Q_1, Q_2 = 2Q_1, Q_3 = 3Q_1$  itd. Optymalna jest liczba czterech kolejnych krótkotrwałych pompowań. Dla warstw wodonośnych o zwierciadle naporowym mogą w zupełności wystarczyć trzy zróżnicowane wydajności. Pierwszy wydatek powinien być równy minimalnej mocy pompy, ostatni wydatek powinien być tak dobrany, aby był nieco wyższy od spodziewanego wydatku dopuszczalnego.

Na początku każdego stopnia pompowania pierwsze objętości wypompowanej wody odpowiadają opróżnianiu rury cembrowej (rury nadfiltrowej) danej studni, a więc przepływowi nieliniowemu. Warstwa wodonośna zaczyna być eksploatowana dopiero po pewnym czasie. Jest to efekt pojemności studni (Bonnet i in., 1967). Przy większych średnicach studni trzeba pamiętać o tym zjawisku, planując czas trwania danego stopnia dynamicznego. Czas trwania pompowań jest ustalany w trakcie prowadzonych badań w zależności od uzyskiwanych wyników. Za wystarczający można uznać taki czas ich trwania, w którym zależność  $s = f(\lg t)$ , wyznaczona graficznie na papierze logarytmicznym, zaczyna przyjmować charakter liniowy. Siwek i Mańkowski (1981) podają, że warunek ten jest praktycznie spełniony po 1–1,5 h pompowania. Forkasiewicz (1978 – za Castany, 1972) określiła przedział czasu minimalnego na 1 do 3 h w zależności od pojemności studni i rodzaju

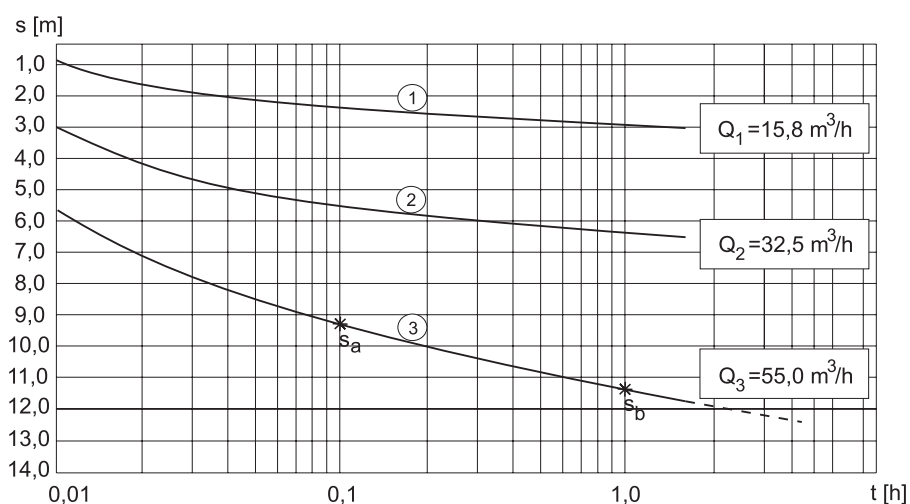


Rys. 4.5. Krótkotrwałe pompowania jednostopniowe powtarzalne w kilku równoczesowych cyklach ze wzrastającą wydajnością

warstwy wodonośnej poddanej badaniom. Czas stabilizacji zwierciadła wody po krótkich pompowaniach powinien być w przybliżeniu równy czasowi ich trwania. Z praktyki hydrogeologicznej wynika jednak, że powrót zdepresjonowanego zwierciadła wody do jego poziomu wyjściowego może się w końcowej fazie przedłużyć. Z tych względów należy się liczyć z kilkucentymetrowymi różnicami w stosunku do wyidealizowanego stanu przedstawionego na rys. 4.5. Zaobserwowana różnica pomiędzy wyjściowym poziomem zwierciadła wody a poziomem ukształtowanym w wyniku stabilizacji po czasie zbliżonym do czasu pompowania powinna być odnotowana w dzienniku próbnego pompowania, ponieważ stanowi dodatkową informację o ujętej warstwie wodonośnej, świadcząc o stopniu jej niejednorodności. Decyzja o przyjętym czasie krótkiego pompowania powinna być podjęta po sprawdzeniu, że wykres depresji z pierwszego pompowania  $s = f(\lg t)$  zaczyna wyznaczać zależność liniową. Niespełnienie tego warunku wymaga wydłużenia czasu, np. z 1,5 h do 3 h. Ostatni cykl pompowania z maksymalną wydajnością powinien być wydłużony aż do momentu uzyskania prostoliniowego wykresu przyrostu depresji w pełnym cyklu logarytmicznym (rys. 4.6. – cykl 3). Dzięki temu pompowanie testujące sprawność studni może być wykorzystane do obliczenia przewodności hydraulicznej ( $T$ ) i współczynnika filtracji badanej warstwy wodonośnej.

Pomiary dynamicznego zwierciadła wody w czasie pompowania studni powinny być wykonywane z dokładnością nie mniejszą niż 5 cm. Minimalna częstotliwość pomiarów powinna odpowiadać schematowi:

Czas od rozpoczęcia pompowania [min]	Częstotliwość pomiarów [min]
do 5 minut	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0
5–25 minut	7; 10; 12; 15; 20; 25;
>25 minut	30; 35; 40; 45; 50; 60 i dalej co 15 min



Rys. 4.6. Odzworowanie zależności  $s = f(\lg t)$  z wielokrotnych pompowań wielostopniowych (podane wartości dotyczą przykładu omówionego w tekście)

Podaną częstotliwość należy powtarzać w każdym kolejnym pompowaniu jednostopniowym. Wyniki pomiarów wydatku, głębokości do zwierciadła wody i depresji w czasie próbnych pompowań i w okresach stabilizacji należy zapisywać w dzienniku pompowania, który trzeba załączyć do każdego egzemplarza dokumentacji hydrogeologicznej.

Wykresy depresji należy sporządzać przy przyjęciu początku skali czasowej wspólnej dla wszystkich kolejnych stopni pompowania (rys. 4.6).

Obliczenia przewodności hydraulicznej ( $T$ ) wykonuje się z wykorzystaniem wzoru przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba w postaci podanej przez Jacoba (1946) z uwzględnieniem oporów hydraulicznych studni:

$$s = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r_0^2 \mu} + CQ^2, \quad [4.7]$$

gdzie pozostałe wielkości to:

$s$  – depresja w badanej studni dla wybranego czasu  $t$  [m],

$t$  – wybrany czas pompowania [h],

$Q$  – wydajność pompowania w danym cyklu [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$r_0$  – promień studni [m],

$\mu$  – współczynnik odsączalności grawitacyjnej dla warstw swobodnych lub odpowiednio współczynnik odsączalności sprężystej ( $\mu_s$ ) dla warstw naporowych [-],

$C$  – współczynnik oporu studni [ $\text{h}^2/\text{m}^5$ ].

We wzorze (4.7) wartości  $s$ ,  $Q$ ,  $t$  są wynikiem pomiarów wykonywanych w trakcie pompowania, a promień studni  $r_0$  odczytany z jej danych konstrukcyjnych.

Przewodność hydrauliczną  $T$  wyznacza się, wykorzystując możliwości graficznego rozwiązania równania (4.7) przez obliczenie wartości współczynnika kierunkowego prostoliniowego odcinka wykresu  $s = f(\lg t)$ , odczytując jego wartość  $\Delta s$  dla jednego pełnego cyklu logarytmicznego.

Dla wybranego do interpretacji odcinka wykresu istnieje zależność:

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} = \frac{0,183Q}{s_b - s_a}, \quad [4.8]$$

gdzie  $\Delta s$  jest różnicą depresji w jednym pełnym cyklu logarytmicznym, wyznaczoną z odczytania wartości  $s_b$  (końcowej w danym cyklu) i  $s_a$  (początkowej w danym cyklu), co zilustrowano na rysunku 4.6.

Obliczenia strat hydraulicznych na podstawie wielokrotnych pompowań jednostopniowych przeprowadza się według założeń Jacoba lub Rorabaugha, które opisano na początku niniejszego rozdziału. Wartości depresji niezbędne do wyznaczenia parametrów  $\frac{s}{Q}$  lub  $\frac{s}{Q - B}$  należy odczytać z końcowego momentu każdego z pompowań jednostopniowych (w zależności od czasu ich trwania; np. 1 h, 1,5 h itd.). W przypadku przedłużenia ostatniego cyklu pompowania z wydajnością maksymalną,

w związku z zamiarem obliczenia przewodności  $T$ , depresja dla tego cyklu musi być odczytana dla czasu przyjętego w cyklach poprzednich (1,5 h na rys. 4.6).

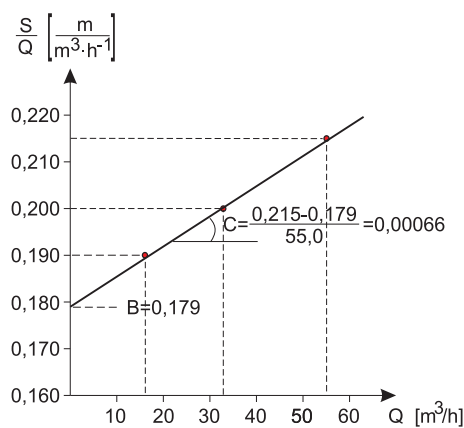
Wyznaczanie współczynnika oporu studni metodą Bruina i Hudsona (Siwek, Mańkowski, 1981) pokazano na przykładzie studni o głębokości 68 m, odwierconej metodą obrotową na płuczkę. Ujęto w sposób zupełny czwartorzędową warstwę wodonośną o miąższości 14 m, zbudowaną z piasków drobno- i średnioziarnistych. Zwierciadło wody w warstwie wodonośnej ma charakter naporowy. Pompowanie jednostopniowe powtarzalne wykonano w trzech cyklach dynamicznych; każdy o czasie trwania 1,5 h.

Osiągnięto następujące wyniki:

Cykl pompowania	Q – wydajność [m <sup>3</sup> /h]	s – depresja po czasie 1,5 h [m]	$\frac{s}{Q}$
1	15,8	3,0	0,190
2	32,5	6,5	0,200
3	55,0	11,8	0,215

W wyniku obliczeń przedstawionych na rysunku 4.7 i w tabeli 4.5 otrzymano wartość współczynnika oporu studni  $C = 0,00066 \text{ h}^2\text{m}^5$ . Wskazuje to na zaawansowane zanieczyszczenie płuczką warstwy wodonośnej związane z niedostatecznym oczyszczeniem otworu po procesie wiercenia (III klasa wg Waltona).

W literaturze hydrogeologicznej opisywana jest również inna metoda stosowana dla zbadania parametrów hydraulicznych studni. Polega ona na prowadzeniu krótkotrwałych pompowań wielostopniowych, ale bez przerw stabilizacyjnych zwierciadła wody pomiędzy wzrastającymi wydatkami. Ponieważ w kolejnych stopniach dynamicznych nie są osiągnięte warunki filtracji ustalonej, następuje nakładanie się kolejnych przyrostów depresji na danym stopniu na trwające nadal przyrosty depresji wywołane pompowaniem na poprzednim stopniu. W związku z tym konieczne jest stosowanie korekty depresji, uzyskiwanej na kolejnych stop-



Rys. 4.7. Wyznaczenie współczynnika oporu studni metodą Bruina i Hudsona dla przykładu omówionego w tekście

Tabela 4.5. Rozkład depresji w poszczególnych krótkich pompowaniach ( $t = 1,5$  h)

Wydajność pompowania	Depresja rzeczywista w warstwie wodonośnej	Zeskok hydrauliczny	Depresja całkowita w studni (wg wzoru Jacoba)	Sprawność studni
$Q$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	$s_w = BQ$ [m], gdzie $B = 0,197 \text{ h}/\text{m}^2$	$\Delta s = CQ^2$ [m] gdzie $C = 0,00066 \text{ h}^2/\text{m}^5$	$s_c = BQ + CQ^2$ [m]	$\eta = \frac{s_w}{s_c}$
$Q_1 = 15,8$	2,83	0,16	$s_1 = 2,83 + 0,16$	0,94
$Q_2 = 32,5$	5,82	0,69	$s_2 = 5,82 + 0,69$	0,89
$Q_3 = 55,0$	9,85	2,00	$s_3 = 9,85 + 2,00$	0,83

niach dynamicznych (z wyjątkiem pierwszego stopnia). Korektę przeprowadza się graficznie na wykresach depresji wyznaczonych bezpośrednimi pomiarami. Przykłady korygowania depresji w krótkotrwałych pompowaniach wielostopniowych podają Siwek i Mańkowski (1981). Ze względu na opisane uciążliwości interpretacyjne metody krótkotrwałych pompowań wielostopniowych nie zaleca się do wyznaczania parametrów hydraulicznych studni. Za właściwszą, aczkolwiek nieco dłużej trającą z powodu przerw stabilizacyjnych, uznaje się uprzednio opisaną metodę krótkotrwałych pompowań jednostopniowych powtarzalnych, która nie wymaga wprowadzania korekt ekstrapolacyjnych wielkości depresji w stosunku do wyników uzyskiwanych w bezpośrednich pomiarach.

## 5. METODY INTERPRETACJI WYNIKÓW PRÓBNYCH POMPOWAŃ W WARSTWACH WODONOŚNYCH O NIEOGRANICZONYM ZASIĘGU

### 5.1. Warstwa wodonośna o zwierciadle naporowym

#### 5.1.1. Nieustalony stan strumienia w warstwie o szczelnym stropie i spągu

##### 5.1.1.1. Metoda podwójnie logarytmiczna Theisa

Metoda podwójnie logarytmiczna Theisa polega na graficznym rozwiązaniu równania [2.21]:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u), \quad u = \frac{r^2}{4at}, \quad a = \frac{T}{\mu_s}.$$

Dla ułatwienia obliczeń parametrycznych według tej funkcji przedstawiono ją za Langefeldem i Ungemachem (1962) w postaci nomogramu funkcji  $E(z)$ , (rys. 5.1, plansza I, dodatek 5).

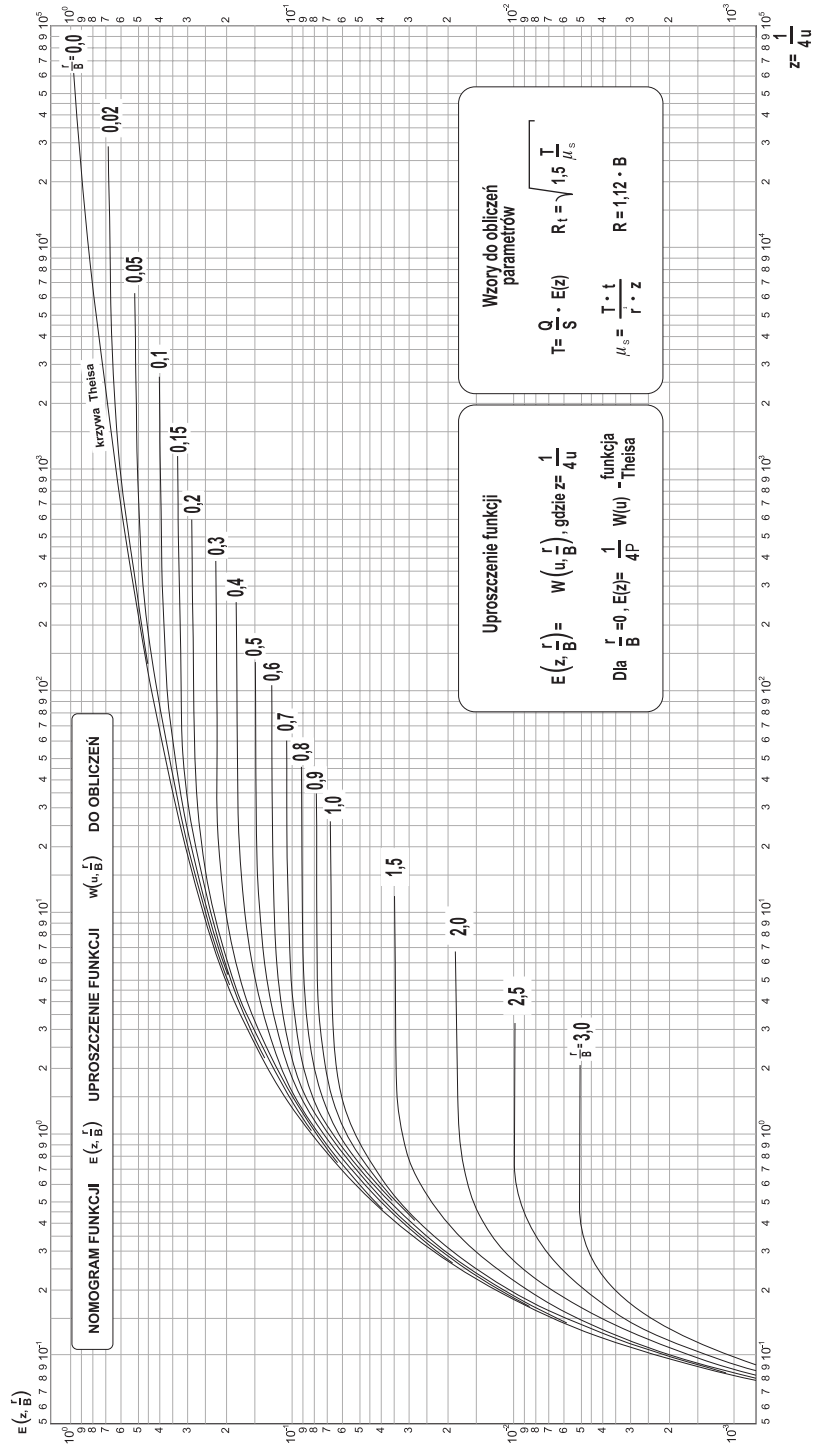
Modyfikacja wzoru Theisa dla potrzeb obliczeniowych polega na wprowadzeniu funkcji pomocniczej:

$$E(z) = \frac{W(u)}{4\pi}, \quad z = \frac{1}{4u}.$$

Po jej wprowadzeniu do równania [2.21] uproszczony wzór Theisa ma postać:

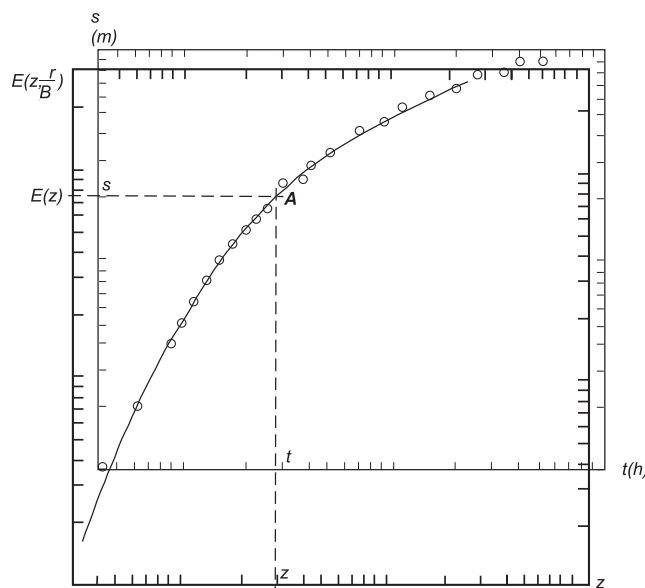
$$s = \frac{Q}{T} E(z), \quad z = \frac{Tt}{r^2 \mu_s} \quad \text{lub} \quad z = \frac{at}{r^2} \quad [5.1]$$

**Opis metody rozwiązań graficznych.** Wielkości depresji zmierzone w danym otworze obserwacyjnym w poszczególnych momentach czasu od rozpoczęcia pompowania z wydajnością  $Q = \text{const}$  nanosi się odręcznie na układ współrzędnych  $\lg s = f(\lg t)$ , odkładając na osi rzędnych wartości depresji, a na osi odciętych wartości czasu, w przypadku gdy nie korzysta się ze specjalnych programów interpretacyjnych. Do sporządzenia wykresu doświadczalnego wykorzystuje się papier z



Rys. 5.1. Wykres uproszczonej funkcji  $E(z, \frac{r}{B})$  do obliczeń parametrów hydrogeologicznych wg schematów Theisa i Hantusha (patrz: plansza I)





Rys. 5.2. Identyfikacja krzywej doświadczalnej  $\lg s = f(\lg t)$  z wykresem krzywej wzorcowej

siatką podwójnie logarytmiczną. Następnie wykres doświadczalny porównuje się ze sporządzonym wykresem wzorcowym poprzez jego nałożenie na nomogram funkcji  $E(z)$ . Po uzyskaniu możliwie maksymalnej zgodności obu wykresów, przy zachowaniu równoległości osi ich układów współrzędnych, wyznacza się dla nich tzw. punkt arbitralny. Dla obranego punktu arbitralnego A odczytuje się wartości jego współrzędnych:

$[s, t]$  – z wykresu doświadczalnego,

$[E(z), z]$  – z wykresu krzywej wzorcowej.

Identyfikację zbioru punktów krzywej doświadczalnej  $\lg s = f(\lg t)$  z wykresem krzywej wzorcowej oraz schemat wyznaczania współrzędnych punktu arbitralnego przedstawiono na rysunku 5.2. Uzyskane wartości współrzędnych podstawia się do wzorów pozwalających na obliczenie poszczególnych parametrów:

– przewodności:

$$T = \frac{Q}{s} E(z), \quad [5.2]$$

– współczynnika odsączalności sprężystej:

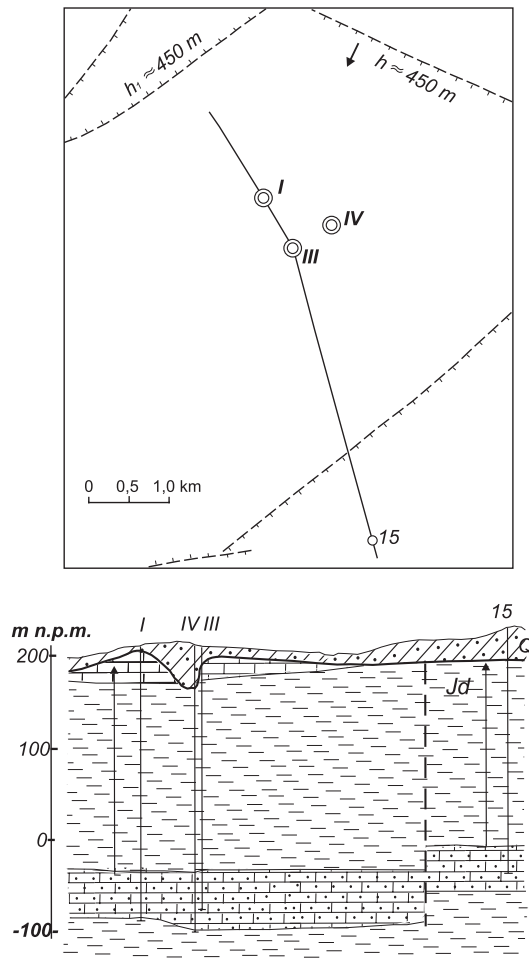
$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} \quad [5.3]$$

– współczynnika piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{zr^2}{t}. \quad [5.4]$$

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowężłowe w rejonie Wielunia.** Do eksploatacji ujęto naporową warstwę wodonośną, którą stanowią piaskowce kościeliskie doggeru występujące na głębokości 244–290 m pod nakładem rudonośnych ilów. Badania wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Łodzi w lutym 1972 r. Prowadząca badania: J. Strumiłło.

Szkic sytuacyjny oraz przekrój geologiczny rejonu badań przedstawia rysunek 5.3. Duża miąższość nakładu zbudowanego w przewadze z ilów, iłołupków i mułowców oraz równie ilaste podłoże stanowi o tym, że prezentowana warstwa wodonośna jest klasycznym przykładem warunków opisanych schematem Theisa. Pompowano otwór III z wydajnością  $Q = 110 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ . Obserwowano opadanie zwierciadła wody w otworze I, w odległości od otworu pompowanego  $r = 650 \text{ m}$ . Wyniki obserwacji zestawiono w tabeli 5.1, a sporządzony wykres doświadczalny na rysunku 5.4. Zgodnie z opisem metody obliczeń graficznych przeprowadzo-



Rys. 5.3. Szkic sytuacyjny i przekrój hydrogeologiczny hydrowężła w rejonie Wielunia

Tabela 5.1. Opadanie zwierciadła wody w otworze I w czasie pompowania otworu III z  $Q = 110 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 25–29.02.1972

t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]
1,42	0,05	4,6	1,00	13,3	2,66	25	3,84	49	5,31
1,50	0,08	5,1	1,16	14,3	2,76	27	4,01	51	5,41
1,67	0,15	5,6	1,29	15,3	2,91	29	4,19	53	5,50
1,75	0,21	6,0	1,39	16,3	3,01	31	4,30	55	5,58
1,83	0,25	6,8	1,54	17,3	3,12	33	4,42	57	5,66
2,00	0,29	7,3	1,65	18,3	3,24	35	4,55	59	5,74
2,25	0,31	7,8	1,76	19,3	3,33	37	4,67	61	5,82
2,50	0,39	8,3	1,85	20,0	3,43	39	4,78	63	5,89
2,75	0,50	8,8	1,95	21,0	3,51	41	4,92	65	5,97
3,00	0,58	9,3	2,04	22,0	3,60	43	5,02	67	6,06
3,25	0,65	10,3	2,19	23,0	3,67	45	5,12	69	6,12
3,50	0,75	11,3	2,35	24,0	3,77	47	5,21	71	6,17
4,00	0,88	12,3	2,52						

no identyfikację wykresu doświadczalnego z wykresem krzywej wzorcowej Theisa (plansza I, dodatek 1).

Po dokonaniu identyfikacji wykresu doświadczalnego obrano punkt arbitralny A (rys. 5.4), dla którego odczytano współrzędne:

- z wykresu doświadczalnego  $s = 2,5 \text{ m}$  dla  $t = 12 \text{ h}$ ,
- z wykresu funkcji wzorcowej  $E(z) = 0,09$  dla  $z = 1,1$ .

Obliczenia parametrów warstwy wodonośnej:

- przewodności:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{110}{2,5} \cdot 0,09 = 3,96 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnika odsączalności sprężystej:

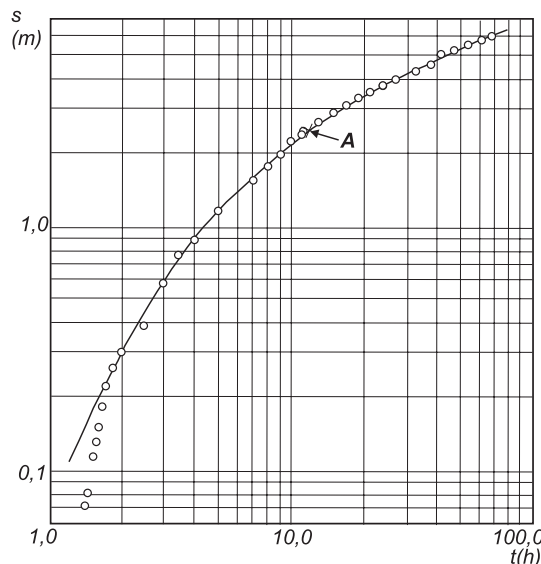
$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{3,96 \cdot 12}{650^2 \cdot 1,1} = 0,000102,$$

- współczynnika piezoprzewodności:

$$a = \frac{zr^2}{t} = \frac{1,1 \cdot 650^2}{12} = 38730 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnika filtracji, gdy  $m_{sr} = 46,0 \text{ m}$

$$k = \frac{T}{m_{sr}} = \frac{3,96}{46} = 0,086 \text{ m/h}.$$



Rys. 5.4. Warstwa piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia. Wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu I. Interpretacja według metody Theisa

### 5.1.1.2. Metoda przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

Metoda przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba<sup>1</sup> polega na graficznym rozwiązaniu równania [2.25] :

$$s = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r^2 \mu_s}, \quad \frac{T}{\mu_s} = a.$$

Równanie to zapisane w postaci:

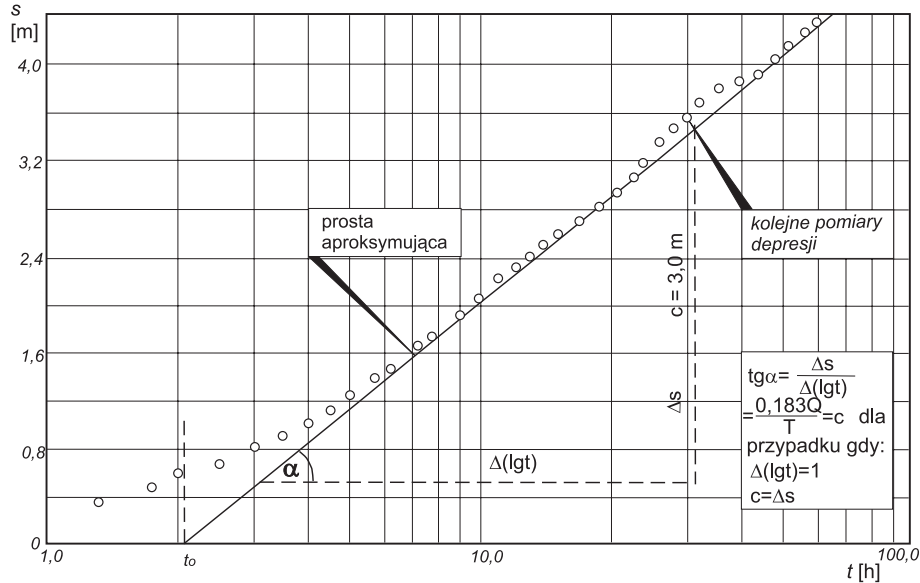
$$s = \frac{0,183Q}{T} \left( \lg \frac{2,25T}{r^2 \mu_s} + \lg t \right),$$

jest funkcją liniową typu  $y = c (b + x)$  o stałych

$$b = \lg \frac{2,25T}{r^2 \mu_s}, \quad c = \frac{0,183Q}{T}.$$

Ta ostatnia wielkość jest współczynnikiem kierunkowym prostej. Zmienną niezależną równania jest  $t$ , a zmienną zależną  $s$ . Współczynnik kierunkowy  $c$  można wyznaczyć metodą wykreślną. Pozwala to na obliczenie parametrów hydrogeologicznych z wykresu opadania zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym, jeśli ten wykres sporządzony zostanie w postaci zależności  $s = f(\lg t)$  na papierze półlogarytmicznym, tak jak przedstawiono na rysunku 5.5. Rozwiązanie graficzne polega na wyznaczeniu wielkości stałych równania przybliżenia logarytmicznego.

<sup>1</sup> W literaturze anglosaskiej występuje często pod nazwą Coopera-Jacoba.



Rys. 5.5. Graficzne rozwiązanie wzoru przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

Współczynnik kierunkowy  $c$  prostej jest równy tangensowi kąta zawartego między tą prostą a osią odciętych:

$$c = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Dla pełnego cyklu logarytmicznego  $\Delta t = 1$  (np.  $\lg 100 - \lg 10 = 1$ ), a więc  $c = \Delta s$ .

Wyznaczenie na wykresie doświadczalnym  $s = f(\lg t)$  wielkości  $c$  pozwala z kolei na obliczenie przewodności warstwy wodonośnej z zależności:

$$T = \frac{0,183Q}{c} \quad [5.5]$$

W celu określenia współczynnika odsączalności sprężystej  $\mu_s$  wykres prostej prowadzimy do przecięcia się z osią odciętych w punkcie  $t_0$  (rys. 5.5), co można zapisać w postaci równania:

$$\frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25Tt_0}{r^2 \mu_s} = 0.$$

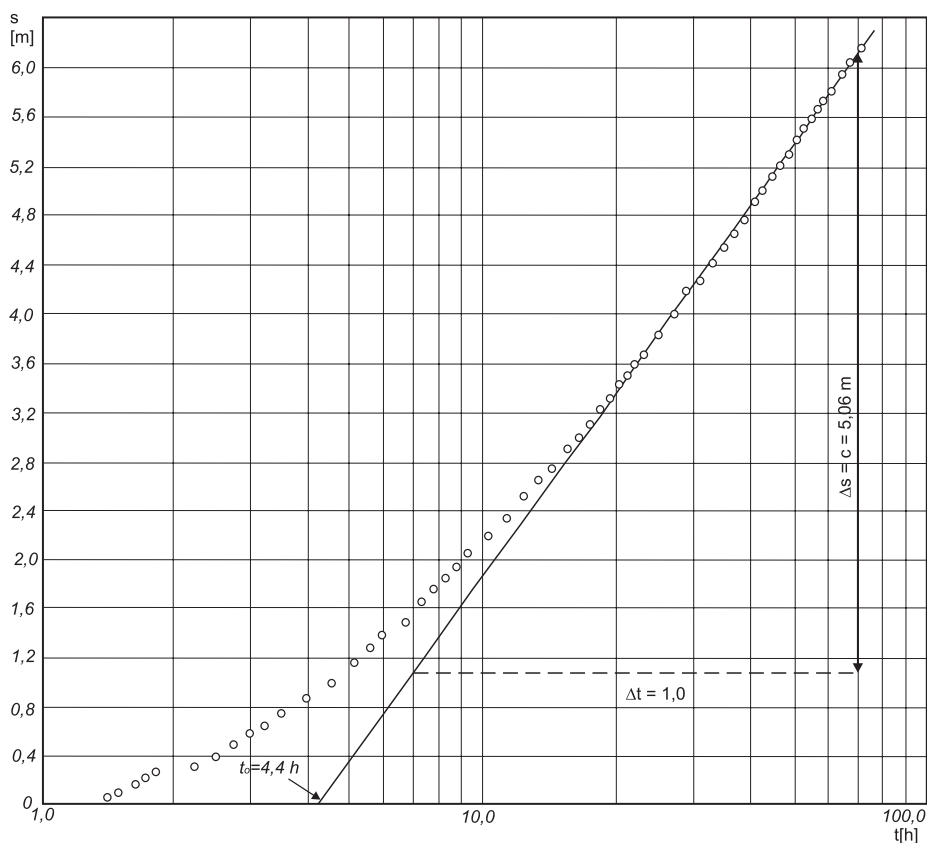
W czasie pompowania czynnik  $\frac{0,183Q}{T} \neq 0$ , zatem  $\lg \frac{2,25Tt_0}{r^2 \mu_s} = 0$ , a ponieważ tylko  $\lg 1 = 0$  możemy zapisać:

$$\frac{2,25Tt_0}{r^2 \mu_s} = 1.$$

Przekształcając to wyrażenie względem  $\mu_s$  otrzymamy wzór na obliczenie współczynnika odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{2,25Tt_0}{r^2}. \quad [5.6]$$

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe w rejonie Wielunia.** W celu przedstawienia sposobu obliczeń według wzoru przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba wybrano ponownie pompowanie hydrowęzłowe, które przedstawiono przy omawianiu metody podwójnej logarytmicznej Theisa. Wykres  $s = f(\lg t)$ , sporządzony według danych zestawionych w tabeli 5.1 podano na rysunku 5.6. Po naniesieniu na wykres wyników pomiarów opadania zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym I wykreślono prostą odpowiadającą aż do jej przecięcia się z osią czasu. Następnie odczytano z wykresu wartości współczynnika kierunkowego  $c = 5,06$  m oraz  $t_0 = 4,4$  h.



Rys. 5.6. Warstwa piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia. Wykres doświadczalny  $s = f(\lg t)$  dla otworu I. Interpretacja według metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

Obliczenia parametrów warstwy wodonośnej:

- przewodności:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 110}{5,06} = 3,98 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnika odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{2,25Tt_o}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 3,98 \cdot 4,4}{650^2} = 0,00093,$$

- współczynnika piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{3,98}{0,000093} = 42796 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnika filtracji, gdy  $m_{sr} = 46,0 \text{ m}$ :

$$k = \frac{T}{m_{sr}} = \frac{3,98}{46} = 0,0865 \text{ m/h}.$$

### 5.1.2. Nieustalony stan strumienia w warstwie ze stałym przesiąkaniem

Przypadek został zbadany i opracowany teoretycznie przez Hantusha (1956). Różni się od schematu Theisa, ponieważ zakłada możliwość przesiąkania wody ze stropu i spągu do eksploatowanej warstwy wodonośnej. Daje to od razu dużą liczbę kombinacji, wynikających z różnej przepuszczalności osadów stropowych i spągowych.

#### 5.1.2.1. Metoda podwójnie logarytmiczna Waltona

Dla celów rozwiązań praktycznych Walton (1962) opracował cały zespół krzywych teoretycznych. Funkcja Hantusha, dla której Walton opracował nomogramy, ma postać [2.29]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right), \quad u = \frac{r^2}{4at}, \quad a = \frac{T}{\mu_s}, \quad B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}}.$$

Wartości funkcji  $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ , podane są w dodatku 1, a na rysunku 5.1 i na planszy I

zamieszczono jej nomogramy w postaci funkcji  $E\left(z, \frac{r}{B}\right) = \frac{W\left(u, \frac{r}{B}\right)}{4\pi}$ ; gdzie  $z = \frac{1}{4u}$ .

Uproszczony zapis wzoru Hantusha ma po wprowadzeniu funkcji  $E\left(z \frac{r}{B}\right)$  postać:

$$s = \frac{Q}{T} E\left(z, \frac{r}{B}\right), \quad z = \frac{Tt}{r^2 \mu_s}, \quad \text{lub } z = \frac{a \cdot t}{r^2}, \quad B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}}. \quad [5.7]$$

Opis metody rozwiązań graficznych. Wielkości depresji zmierzone w danym otworze obserwacyjnym w poszczególnych momentach czasu od rozpoczęcia pompowania z wydajnością  $Q = \text{const}$  nanosi się na układ współrzędnych logarytmicznych  $\lg s = f(\lg t)$ , podobnie jak przy metodzie Theisa, odkładając na osi rzędnych wartości depresji, a na osi odciętych wartości czasu. Następnie uzyskany wykres doświadczalny porównuje się do wykresu wzorcowego na nomogramie funkcji  $E\left(z, \frac{r}{B}\right)$  (plansza I). Na nomogramie, oprócz funkcji Theisa  $\frac{r}{B} = 0$ , są naniesione

wszystkie wykresy rodziny funkcji Hantusha z ustalonym przesiąkaniem  $\left(\frac{r}{B} > 0\right)$ .

Identyfikacja wykresu doświadczalnego polega na wyborze z zespołu krzywych teoretycznych tej krzywej, która odpowiada najbardziej wykresowi doświadczalnemu. Po uzyskaniu zgodności wykresów odczytuje się wartości współrzędnych punktu arbitralnego A (podobnie jak i przy metodzie Theisa):

- $[s, t]$  – z wykresu doświadczalnego;
- $[E(z); z]$  – z wykresu krzywej wzorcowej.

Uzyskane wartości współrzędnych podstawia się do wzorów na obliczenie poszczególnych parametrów:

- przewodności warstwy wodonośnej:

$$T = \frac{Q}{s} E\left(z, \frac{r}{B}\right), \quad [5.8]$$

- współczynnika odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z},$$

- współczynnika przesiąkania B wg typu krzywej wzorcowej  $\frac{r}{B}$  przy znanej odległości otworu obserwacyjnego „r”, np.:  $\frac{r}{B} = 0,1$  dla  $r = 150$  m;  $B = 1500$  m,
- współczynnika przeciekania (parametr przesiąkania)  $T' = \frac{k'}{m'}$ :

$$\frac{k'}{m'} = \frac{T}{B^2} \left[ \frac{1}{T} \right] \quad \text{lub} \quad [5.9]$$

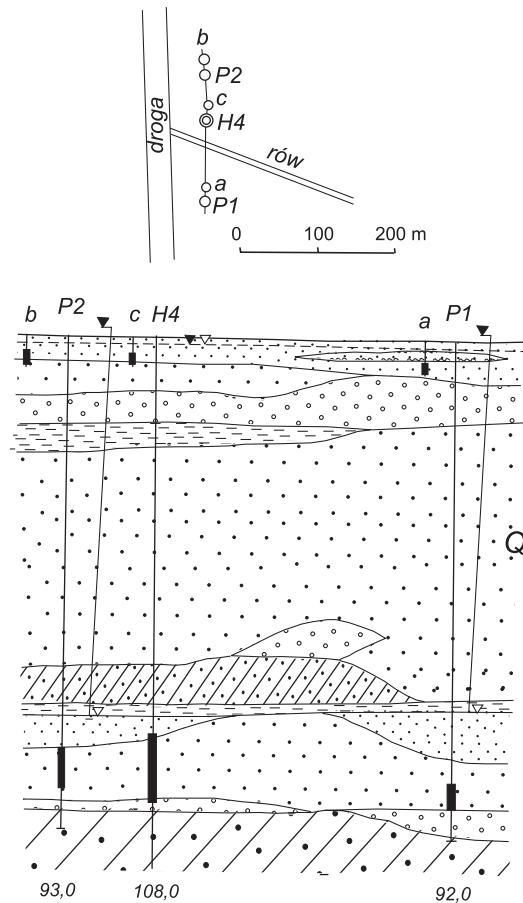


- oporu hydraulicznego warstwy, przez którą przesiąka woda:

$$D = \frac{m'}{k'} = \frac{B^2}{T} \text{ [T]}.$$

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe w Olszewnicy na między-rzeczcu Wisły–Narwi.** Do eksploatacji ujęto naporową warstwę wodonośną w poziomie plejstoceniowym. Badanie wykonał Kombinat Geologiczny Północ w 1977 r.; prowadziły je Leokadia Jałowiec i Wanda Oldyńska. Szkic sytuacyjny oraz przekrój geologiczny hydrowęzła przedstawia rysunek 5.7.

W rejonie tym do głębokości 90–100 m występuje różnowiekowy kompleks osadów piaszczysto-żwirowych i mułkowo-ilastych plejstocenu, tworzący trzy zasadnicze warstwy wodonośne. Warstwa dolna jest warstwą naporową, środkowa zaś i górna mają swobodne zwierciadło wody lub lokalnie naporowe. Naturalne



Rys. 5.7. Szkic sytuacyjny i przekrój geologiczny hydrowęzła H4 w Olszewnicy koło Nowego Dworu

spadki hydrauliczne strumieni wód podziemnych w tych warstwach są znikome. Hydrowęzeł H4 wykonano w celu zbadania parametrów filtracyjnych i hydrodynamiki dolnej warstwy wodonośnej. Składał się on z otworu rozpoznawczego, dwóch otworów obserwacyjnych: P 1 w odległości 119,0 m, P 2 w odległości 49,3 m z filtrem umieszczonym w dolnej warstwie i trzech otworów obserwacyjnych a, b, c zafiltrowanych w stropie warstwy górnej. Pompowanie otworu H4 prowadzono ze stałą wydajnością 253 m<sup>3</sup>/h przez 311 h. Na koniec pompowania depresja wynosiła: w otworze pompowym 17,69 m, P1 – 4,56 m, P2 – 5,12 m. W otworach obserwacyjnych górnej warstwy wodonośnej nie stwierdzono w tym czasie obniżenia się zwierciadła wody. Charakter opadania zwierciadła wody w otworach P 1 i P 2 był podobny, a występująca różnica w wielkościach depresji spowodowana była tylko różnicą ich odległości od otworu pompowanego. Po zakończeniu pompowania prowadzono pomiary wzniosu zwierciadła wody przez okres 783 h zarówno w otworze eksploatacyjnym, jak i w otworach obserwacyjnych. W tabeli 5.2 przedstawiono wyniki opadania zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym P1, a w tabeli 5.3 jego wzniosu po pompowaniu.

Wyniki pompowania zinterpretowano metodą Waltona, dokonując identyfikacji wykresu doświadczalnego  $\lg s = f(\lg t)$  z krzywą wzorcową na planszy I. Uzyskany wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg t)$  (rys. 5.11) jest typowy dla warstwy naporowej, nieograniczonej, zasilanej z przesiąkania i jest zgodny z warunkami hydrogeologicznymi badanej warstwy (rys. 5.7).

#### Wyniki obliczeń

Dane:

- $Q = 253 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- $r = 119,0 \text{ m}$ ,

Tabela 5.2. Opadanie zwierciadła wody w piezometrze P1 podczas pompowania otworu H4 w Olszewnicy z  $Q = 253 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 2–15.03.1977

t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]
0,016	0,02	1,00	1,68	16,0	3,07	100,0	3,94
0,033	0,13	1,33	1,83	18,0	3,11	120,0	4,04
0,050	0,25	1,66	1,96	20,0	3,15	130,0	4,07
0,066	0,36	2,00	2,05	24,0	3,20	150,0	4,14
0,083	0,44	2,66	2,21	30,0	3,16	170,0	4,18
0,110	0,59	3,50	2,37	36,0	3,30	190,0	4,24
0,150	0,69	4,50	2,49	40,0	3,43	210,0	4,29
0,160	0,74	6,00	2,62	48,0	3,57	240,0	4,29
0,180	0,79	6,50	2,66	56,0	3,64	260,0	4,32
0,210	0,88	7,50	2,73	64,0	3,70	280,0	4,37
0,280	1,01	10,0	2,85	72,0	3,77	300,0	4,54
0,410	1,21	14,0	3,00	88,0	3,86	311,0	4,56

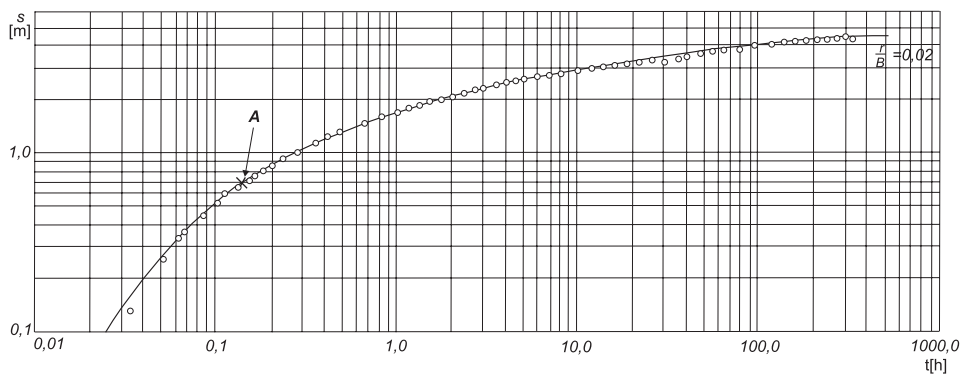
Tabela 5.3. Wznios zwierciadła wody w piezometrze P1 po pompowaniu otworu H4 w Olszewnicy z  $Q = 253 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 2–15.03.1977

t [h]	s' [m]	t [h]	s' [m]	t [h]	s' [m]	t [h]	s' [m]
0,016	0,02	1,50	1,90	24,0	3,23	200,0	4,32
0,033	0,15	1,83	2,02	30,0	3,32	230,0	4,37
0,050	0,26	2,33	2,15	36,0	3,42	250,0	4,43
0,066	0,36	3,00	2,28	40,0	3,49	260,0	4,45
0,100	0,52	4,00	2,41	48,0	3,52	300,0	4,54
0,130	0,64	5,00	2,53	56,0	3,64	311,0	4,55
0,160	0,75	7,00	2,67	64,0	3,70	330,0	4,55
0,200	0,83	8,00	2,73	72,0	3,76	350,0	4,55
0,250	0,93	12,00	2,87	96,0	3,93	400,0	4,58
0,350	1,10	14,00	2,91	120,0	4,08	500,0	4,64
0,480	1,29	16,00	2,97	140,0	4,17	600,0	4,64
0,830	1,58	18,00	3,05	160,0	4,23	700,0	4,64
1,160	1,77	20,00	3,13	180,0	4,28	783,0	4,64

- $m = 22,0 \text{ m}$ ,
- $m' = 5,4 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego A dla krzywej  $\frac{r}{B} = 0,02$ :

- $E\left(z, \frac{r}{B}\right) = 0,1$ ,
- $z = 1,0$ ,
- $s = 0,68 \text{ m}$ ,
- $t = 0,113 \text{ h}$ .

Rys. 5.8. Wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu P1 (plejstocieńska warstwa wodonośna w rejonie Olszewnicy), interpretacja według metody Waltona

Obliczone parametry:

- przewodność:

$$T = \frac{Q}{s} E\left(z, \frac{r}{B}\right) = \frac{253}{0,68} \cdot 0,1 = 37,2 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik filtracji przy miąższości ujętej warstwy  $m = 22 \text{ m}$ :

$$k = \frac{T}{m} = \frac{37,2}{22,0} = 1,69 \text{ m/h},$$

- współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{3,72 \cdot 0,113}{119^2 \cdot 1} = 0,000297,$$

- współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{37,2}{0,000297} = 125252 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik przesiąkania:

$$B = \frac{r}{0,02} = \frac{119}{0,02} = 5950 \text{ m},$$

- opór hydrauliczny przesiąkania:

$$D = \frac{m'}{k'} = \frac{B^2}{T} = \frac{5950^2}{37,2} = \frac{35402500}{37,2} = 951680 \text{ h},$$

- lub jego odwrotność, zwana współczynnikiem przeciekania albo parametrem przesiąkania:

$$\frac{1}{D} = T' = \frac{k'}{m'} = \frac{T}{B^2} = 0,000001 \frac{1}{\text{h}},$$

- zasięg ustalonego leja depresyjnego według wzoru [2.20]:

$$R = 1,12B = 1,12 \cdot 5950 = 6664 \text{ m},$$

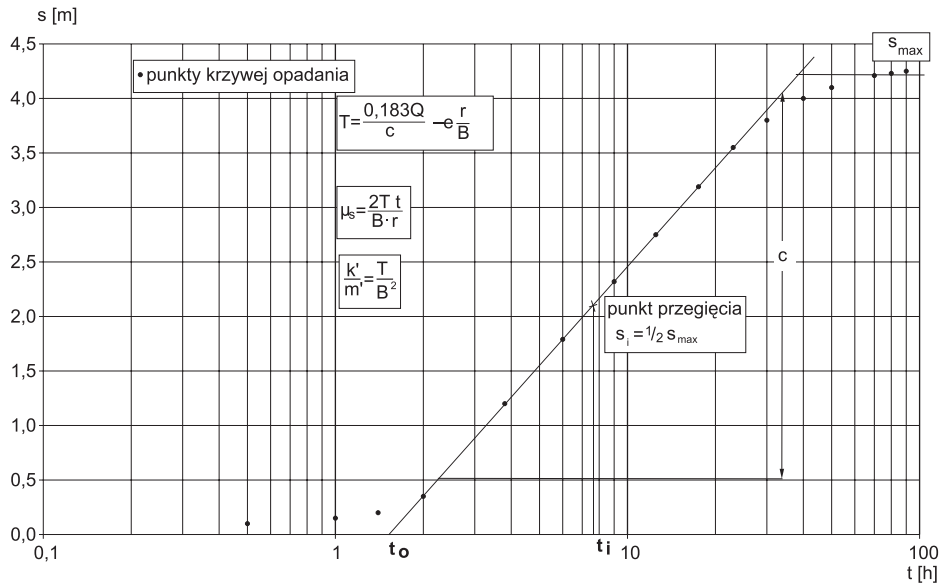
- współczynnik filtracji warstwy półprzepuszczalnej (iły, mułki ilaste):

$$k' = \frac{m'}{D} = \frac{5,4}{951680} = 0,0000056 \text{ m/h} = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ m/h}.$$

### 5.1.2.2. Metoda przybliżenia logarytmicznego Hantusha

Metoda ta nazywana jest również metodą punktu przegięcia (Forkasiewicz, 1973), która polega na analizie krzywej  $s = f(\lg t)$ , otrzymanej z obserwacji w piezometrach. Może ona być stosowana tylko dla dłuższych pompowań, gdy wartość depresji  $s$  można interpolować do  $s_{max}$  przy osiągniętej stabilizacji zwierciadła wody (rys. 5.9).

Metoda ta wykorzystuje funkcje  $K_0(x)$  i  $e^x K_0(x)$  podane w dodatku 3.



Rys. 5.9. Graficzne rozwiązanie metody przybliżenia logarytmicznego Hantusha

Postępowanie przy obliczeniach jest następujące:

- a) na podstawie wykresu  $s = f(\lg t)$  określa się  $s_{\max}$  i punkt przegięcia krzywej, w którym depresja wynosi:

$$s_i = \frac{1}{2} s_{\max} = \frac{Q}{4\pi T} K_0\left(\frac{r}{B}\right),$$

- b) następnie określa się nachylenie  $c$  krzywej w punkcie przegięcia oraz czas  $t_i$  odpowiadający temu punktowi:

$$c = \frac{2,3Q}{4\pi T} e^{-\frac{r}{B}} = \frac{0,183Q}{T} e^{-\frac{r}{B}},$$

- oraz dla tego punktu:

$$u_i' = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt_i} = \frac{r}{2B}.$$

Wielkości  $s_i$  oraz  $c$  związane są ze sobą zależnością:

$$\frac{2,3s_i}{c} = e^{\frac{r}{B}} K_0\left(\frac{r}{B}\right),$$

co pozwala określić wartości funkcji  $e^{\frac{r}{B}} K_0\left(\frac{r}{B}\right)$ .

Z tablicy funkcji (dodatek 3) odczytuje się:  $e^{\frac{r}{B}}$  oraz  $\frac{r}{B}$ , a stąd wyznacza się

$$B = \frac{r}{\left(\frac{r}{B}\right)}.$$

Parametry hydrogeologiczne warstwy oblicza się z zależności:

$$T = \frac{0,183Q}{c} e^{-\frac{r}{B}} \quad \mu_s = \frac{2Tt_i}{B \cdot r} \quad \frac{k'}{m'} = \frac{T}{B^2}$$

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe w rejonie Olszewnicy na międzyrzeczu Wisły i Narwi.** Dla zastosowania metody przybliżenia logarytmicznego Hantusha (punktu przegięcia) do obliczeń posłużono się pompowaniem hydrowęzła w Olszewnicy, wynikami obserwacji w piezometrze P1. W tym celu sporządzono wykresy opadania i wzniosu zwierciadła wody dla otworu obserwacyjnego P1 w funkcji  $s' = f(\lg t)$  wg danych przedstawionych w tabelach 5.2 i 5.3. Oba wykresy okazały się bardzo podobne, a wykres wzniosu pozwolił określić wielkość  $s_{\max}$  niezbędną dla wyznaczenia punktu przegięcia i dalszych obliczeń parametrów (rys. 5.10).

Punkty charakterystyczne krzywej:

$s_{\max} = 4,64$  m,  $c = 1,14$  m,  $t_i = 3,8$  h,  $s_i = 1/2 s_{\max} = 2,32$  m,  $r = 119$  m, stąd:

$$e^{\frac{r}{B}} K_o \left(\frac{r}{B}\right) = \frac{2,3s_i}{c} = \frac{2,3 \cdot 2,32}{1,14} = 4,68.$$

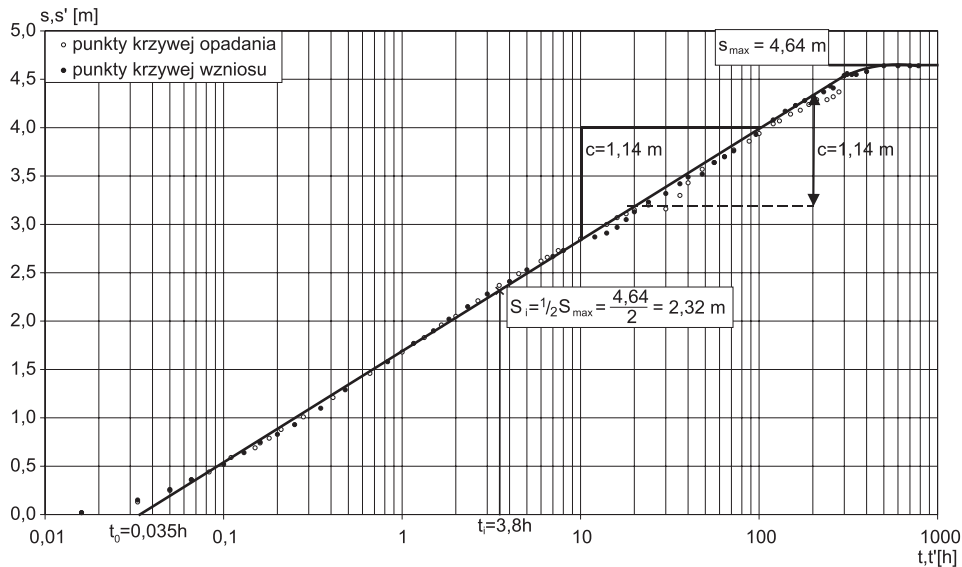
Z tablicy funkcji odczytano:

$$\frac{r}{B} = 0,011; \quad \text{stąd } B = \frac{119,0}{0,011} = 10818,0 \text{ m}$$

$$e^{\frac{r}{B}} = 1,011, \quad e^{-\frac{r}{B}} = 0,989.$$

Obliczenie  $T, \mu_s$  i  $\frac{k'}{m'}$ :

- przewodność  $T = \frac{0,183Q}{c} e^{-\frac{r}{B}} = \frac{0,183 \cdot 253,0}{1,14} \cdot 0,989 = 40,17 \text{ m}^2/\text{h}$ ,
- zasobność sprężysta  $\mu_s = \frac{2Tt_i}{B \cdot r} = \frac{2 \cdot 40,17 \cdot 3,8}{10818,0 \cdot 119,0} = \frac{305,26}{10818,0 \cdot 119,0} = 0,000237$ ,
- współczynnik piezoprzewodności  $a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{40,17}{0,000237} = 169494 \text{ m}^2/\text{h}$ ,
- współczynnik przeciekania  $\frac{k'}{m'} = \frac{T}{B^2} = \frac{40,17}{10818,0^2} = 0,000000343 \frac{1}{\text{h}}, D = \frac{m'}{k'} = 2693 \text{ h}$ ,
- współczynnik filtracji warstwy słabo przepuszczalnej  $k' = 0,00000185 \text{ m/h} = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{ m/h}$ .



Rys. 5.10. Wykresy  $s = f(\lg t)$  oraz  $s' = f(\lg t')$  opadania i wzniosu zwierciadła wody dla otworu obserwacyjnego P1 w rejonie Olszewnicy

#### Obliczenie parametrów metodą Theisa-Jacoba

Porównawczo dla podanego przykładu pompowania obliczono parametry filtracji z metody przybliżenia logarytmicznego wykresów  $s = f(\lg t)$ ,  $s' = f(\lg t')$  odczytując z wykresu na rysunku 5.10 wartości dla  $c = 1,14$  m,  $t_0 = 0,035$  h – podobnie dla wzniosu i opadania, stąd:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 253,0}{1,14} = 40,61 \text{ m}^2/\text{h}, \quad k_l = \frac{40,61}{22,0} = 1,85 \text{ m/h},$$

$$\mu_s = \frac{2,25 \cdot T \cdot t_0}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 40,61 \cdot 0,035}{119,0^2} = 0,000226,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{40,61}{0,000226} = 179690 \text{ m}^2/\text{h}.$$

W przypadku obliczeń parametrów filtracji  $T$  i  $\mu_s$  metodami Waltona i Hantusha, a dla porównania z nimi metody przybliżenia logarytmicznego uzyskano wyniki podobne. Z obliczeń metodą Theisa-Jacoba są one wyższe dla przewodności o ok. 9% od wyników obliczonych metodą Waltona, z powodu nieuwzględnienia efektu przesiąkania w tej metodzie. Błąd ten będzie się zwiększał, im bardziej dopływ wody z przesiąkania będzie wzrastał. Stąd wynika, że metoda przybliżenia logarytmicznego może być stosowana jedynie dla układów warstw w miarę szczelnych (w stropie i w spągu), prawie spełniających schemat Theisa.

### 5.1.3. Warstwa wodonośna z nieustalonym przesiąkaniem

#### 5.1.3.1. Metoda podwójnie logarytmiczna Hantusha

Poprzednio rozważane przypadki dotyczyły zasilania ujętej warstwy wodonośnej wodą przesiąkającą z warstwy nadległej lub podległej przez rozdzielające osady półprzepuszczalne, których pojemność własna wody wolnej była na tyle znikoma, że można ją było pominąć. Przewarstwienia te były więc jedynie przekazykami wody w przepływie międzywarstwowym i określała je wielkość oporu hydraulicznego przesiąkania  $D = \frac{m}{k'}$  lub jego odwrotność – parametr przesiąkania  $\frac{k'}{m'}$ .

W przypadku jednak, a tych w praktyce jest najwięcej, gdy pojemność warstwy słabo przepuszczalnej o dużej miąższości w nadkładzie warstwy wodonośnej jest nie do pominięcia, zagadnienie się komplikuje na tyle, że osiąga się zgodności wykresu doświadczalnego  $\lg s = f(\lg t)$  z dotychczas poznanymi funkcjami teoretycznymi (plansza I). Dla takiego przypadku Hantush (Walton, 1970, Forkasiewicz, 1973) proponuje więc inne rozwiązanie, które częściowo uwzględnia złożoność badanego procesu poprzez odmienną analizę fazy początkowej i końcowej pompowania. Otóż, według Hantusha, obliczenia dla początkowego odcinka trwania próbnego pompowania, gdy  $t < \frac{D}{10} \cdot \mu'$ , gdzie  $\mu'$  – współczynnik odsączalności warstwy słabo przepuszczalnej, należy wykonywać według równania:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \psi), \quad u = \frac{r^2}{4at}, \quad \psi = \left(\frac{r}{4}\right) \sqrt{\frac{\mu'}{T \cdot D \cdot \mu_s}}. \quad [5.10]$$

Wartości funkcji  $W(u, \psi)$  podano w dodatku 2, a jej nomogram na planszy III.

Wzory na obliczenie parametrów mają postacie:

– przewodność:

$$T = 0,08 \frac{Q}{s} \cdot W(u, \psi), \quad [5.11]$$

– współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u}\right)}. \quad [5.12]$$

Natomiast dla końcowego okresu trwania pompowania, gdy  $t \geq 2D \mu'$ , krzywa doświadczalna  $\lg s = f(\lg t)$  przybiera postać funkcji Theisa lub funkcji Hantusha z ustalonym przesiąkaniem (nomogramy na planszy I) i według tych funkcji przeprowadza się obliczenia.

Przy interpretacji według metody Theisa obliczona wartość współczynnika odsączalności jest sumą dwu wartości, a mianowicie współczynnika odsączalności



sprężystej  $\mu_s$  warstwy eksploatowanej oraz współczynnika odsączalności  $\mu'$  warstwy słabo przepuszczalnej, obliczonej według wzoru [5.3]:

$$\mu_s + \mu' = \frac{Tt}{r^2 z}$$

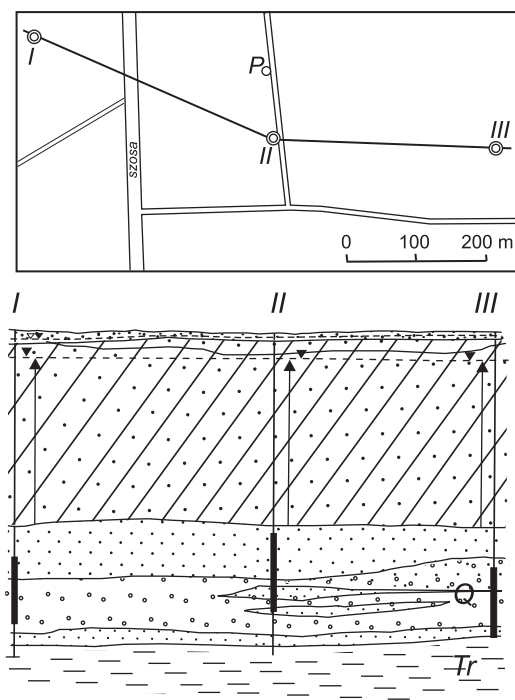
Znając wartość współczynnika odsączalności sprężystej z pierwszej fazy pompowania obliczoną według wzoru [5.12] i wartość sumaryczną, można określić współczynnik odsączalności warstwy słabo przepuszczalnej.

Przy interpretacji według metody Waltona obliczona wartość współczynnika odsączalności jest sumą:

$$\mu_s + \frac{\mu'}{3} = \frac{4Tt}{r^2 z}$$

Podobnie więc jak przy interpretacji według metody Theisa można obliczyć wartość  $\mu'$ , znając wielkość  $\mu_s$  z pierwszego okresu pompowania.

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe w rejonie Witkowa koło Gniezna.** Badanie wykonał Kombinat Geologiczny Zachód, Oddział w Poznaniu w 1976 r. Prowadzący badanie: Stanisław Dąbrowski, Eugenia Zboralska. Szkic sytuacyjny oraz przekrój hydrowęzła przedstawia rysunek 5.11.



Rys. 5.11. Szkic sytuacyjny i przekrój geologiczny hydrowęzła w rejonie Witkowa

W rejonie badań do głębokości 90 m występuje kompleks osadów plejstoceni- skich złożony – w dolnej części z piasków i żwirów kopalnej doliny o miąższości 35 m, w górnej z glin morenowych o miąższości około 55 m. W spągu osadów plejsto- ceni- skich występują osady ilaste trzeciorzędu. W obrębie osadów plejstoceni- skich występują dwie warstwy wodonośne: przypowierzchniowa o miąższości 0,5–1,0 m oraz spągowa o rozprzestrzenieniu regionalnym. Warstwa przypowierzchniowa jest warstwą swobodną, spągowa zaś – naporową. Dla udokumentowania zasobów nowo budowanego ujęcia wody wykonano trzy otwory rozpoznawcze oraz jeden poszukiwawczy (rys. 5.11). W celu określenia parametrów filtracyjnych i hydrody- namiki dolnej warstwy przeprowadzono pompowanie otworu II z wydajnością 200 m<sup>3</sup>/h przez okres 288 h. Otwory I, III i P były głównymi otworami obserwacyj- nymi, dodatkowo bowiem obserwowano studnie kopane.

W trakcie pompowania stwierdzono znaczne obniżenie się zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych i niewielkie obniżenie w studniach kopanych. Pod ko- niec pompowania depresja w otworze pompowanym wynosiła 6,69 m, w otworze P odległym o 100 m – 1,86 m, w otworze III w odległości 330 m – 1,55 m, w otworze I w odległości 330 m – 1,35 m, a w studniach kopanych – około 0,3 m. Depresja ta była niestabilna. Przykładowe wyniki opadania zwierciadła wody w otworze III ze- stawiono w tabeli 5.4.

Wyniki pompowania zinterpretowano według rozwiązania przedstawionego przez Hantusha dla warstwy wodonośnej o zwierciadle naporowym z przesiąka- niem przez warstwę słabo przepuszczalną, której zasobność (odsączalność) nie może być pominięta [5.10].

Wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg t)$  przedstawiono na rysunku 5.12, a oblicze- nia parametryczne poniżej.

**Obliczenie 1:** gdy  $t < \frac{D}{10} \mu'$

Rozwiązanie to dotyczy stadium początkowego pompowania dla czasu pompo- wania  $t < 10$  h (rys. 5.12). Wykres doświadczalny zinterpretowano według funkcji [5.10]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \psi).$$

Dane:

$$Q = 200 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}, r = 330 \text{ m}, m = 35 \text{ m}.$$

Współrzędne punktu arbitralnego A dla krzywej  $\psi = 0,1$  na nomogramie (plan- sza III):

$$W(u, \psi) = 1,0, \frac{1}{u} = 10, s = 0,28 \text{ m}, t = 0,6 \text{ h}.$$

Obliczone parametry:

$$T = \frac{0,08 \cdot Q}{s} = \frac{0,08 \cdot 200,0}{0,28} 1,0 = 57,1 \text{ m}^2/\text{h}$$

Tabela 5.4. Opadanie zwierciadła wody w otworze III w czasie pompowania otworu II z wydajnością  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 13–25.02.1976

t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]
0,017	0,01	2,0	0,51	116,0	1,27
0,050	0,04	3,0	0,64	126,0	1,31
0,067	0,04	5,0	0,67	140,0	1,30
0,083	0,05	6,0	0,76	144,0	1,31
0,150	0,10	8,0	0,81	152,0	1,33
0,200	0,13	20,0	0,86	164,0	1,34
0,250	0,15	28,0	1,01	174,0	1,39
0,300	0,19	31,0	1,08	188,0	1,40
0,350	0,22	44,0	1,09	194,0	1,45
0,400	0,22	47,0	1,10	200,0	1,48
0,450	0,23	49,0	1,12	212,0	1,47
0,500	0,25	52,0	1,13	216,0	1,49
0,580	0,27	55,0	1,13	222,0	1,50
0,670	0,29	59,0	1,15	238,0	1,47
0,750	0,31	68,0	1,18	242,0	1,48
0,830	0,33	71,0	1,19	248,0	1,52
0,920	0,35	75,0	1,20	260,0	1,52
1,000	0,37	80,0	1,23	272,0	1,54
1,170	0,40	93,0	1,26	288,0	1,55
1,330	0,42	96,0	1,27		
1,500	0,47	100,0	1,27		

$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u}\right)} = \frac{4,0 \cdot 57,1 \cdot 0,6}{330^2 \cdot 10} = 0,000126,$$

$$k = \frac{T}{m} = \frac{57,1}{35,0} = 1,63 \text{ m/h.}$$

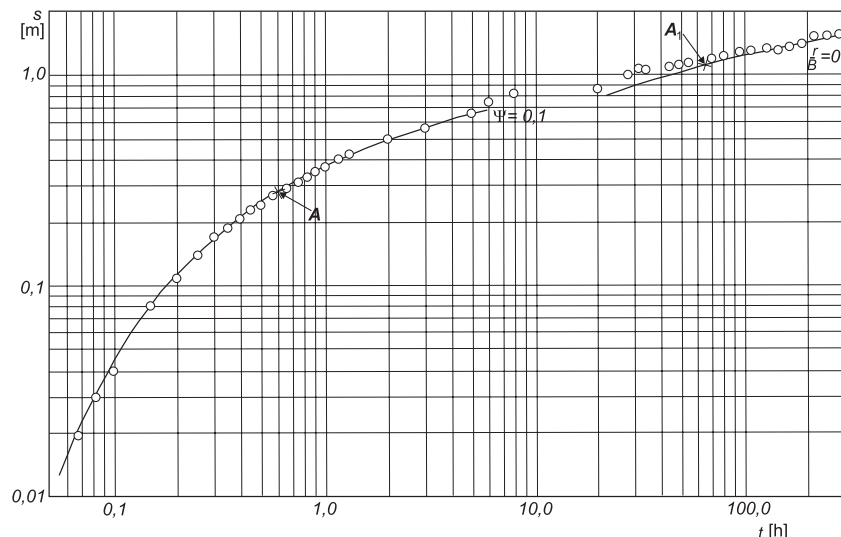
**Obliczenie 2:** gdy  $t \geq 2D\mu'$ .

Rozwiązanie dotyczy stadium końcowego pompowania dla czasu  $t > 30 \text{ h}$ .

Drugą część wykresu doświadczalnego  $\lg s = f(\lg t)$  zinterpretowano według funkcji Theisa, wykorzystując nomogram funkcji uproszczonej  $E(z)$  (plansza I).

Współrzędne punktu arbitralnego  $A_1$ :

$E(z) = 0,34$ ;  $z = 25$  – z wykresu wzorcowego,



Rys. 5.12. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  (plejstocénska warstwa wodonośna w rejonie Witkowa), interpretacja według metody Hantusha i metody Theisa

$s = 1,17$  m;  $t = 65,24$  h – z wykresu doświadczalnego.

Wyniki obliczeń:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{200}{1,17} \cdot 0,34 = 58,1 \text{ m}^2/\text{h},$$

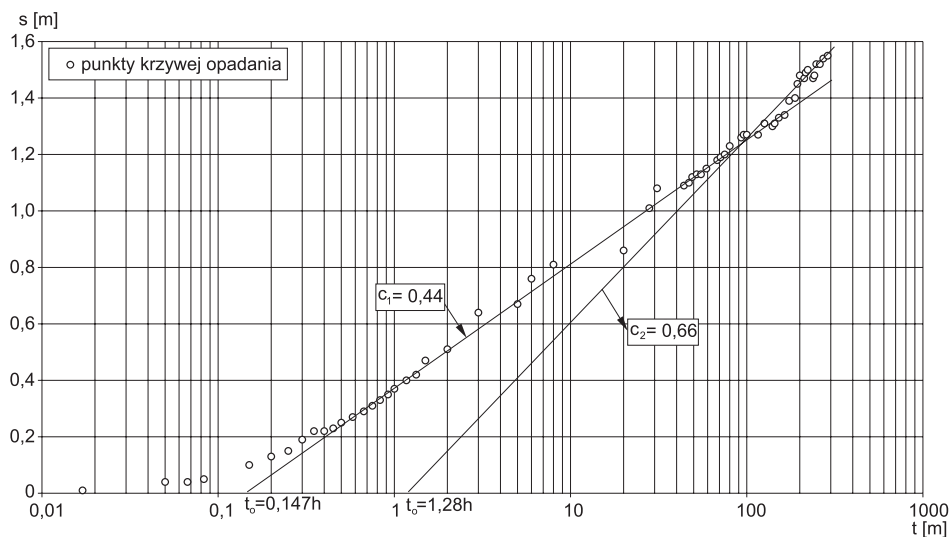
$$\mu_s + \mu' = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{58,1 \cdot 65,2}{330^2 \cdot 25} = 0,00139,$$

$$\mu' = 0,00139 - 0,000126 = 0,00127.$$

### 5.1.3.2. Możliwość zastosowania do obliczeń metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

Przy posiadaniu danych z końcowego okresu trwania pompowania, gdy  $t > 2D\mu'$  i krzywa doświadczalna ma postać funkcji Theisa dla danego układu warstw (rys. 5.12), można zinterpretować wyniki te metodą przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba (rozdz. 5.1.1.2).

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe koło Gniezna, w rejonie Witkowa.** W związku z tym, że krzywa doświadczalna końcowego okresu trwania pompowania dla otworu obserwacyjnego nr III (rys. 5.12) ma postać funkcji Theisa, tj.  $\frac{r}{B} = 0$ , można ten odcinek zinterpretować metodą przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba. Do tego celu sporządzono wykres funkcji  $s = f(\lg t)$  – rysunek 5.13. Nie ma rozwiązania wiarygodnego dla pierwszego odcinka wykresu na rysunku 5.12. Natomiast dla drugiego odcinka (rys. 5.13), który odpowiada funkcji



Rys. 5.13. Wykres  $s = f(\lg t)$  opadania zwierciadła wody w otworze III oddalonym o 330 m w czasie pompowania otworu II w Witkowie z  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 13–25.02.1976

Theisa z rysunku 5.12, ustalono wielkość nachylenia prostej  $c = 0,66 \text{ m}$  i jej przecięcia się z osią  $t$ , wyznaczono wielkość  $t_0 = 0,128 \text{ h}$ . Korzystając z tych wartości, obliczono parametry:

– przewodność  $T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 200}{0,66} = 55,45 \text{ m}^2/\text{h}$ ,

– współczynnik filtracji  $k = \frac{T}{m} = \frac{55,4}{35,0} = 1,58 \text{ m/h}$ ,

– współczynnik sumaryczny zasobności sprężystej i odsączalności  $\mu_s + \mu'$

$$\mu_s + \mu' = \frac{2,25 \cdot 55,45 \cdot 1,28}{330} = 0,00147.$$

Z przybliżenia logarytmicznego pierwszej fazy przebiegu pompowania odczytano również wielkość czasu  $t_0 = 0,147 \text{ h}$  reprezentującego czas początkowy rozwoju leja depresyjnego przy inicjalnej zasobności sprężystej badanej warstwy wodonośnej. Określono w przybliżeniu wielkość tego parametru, znając z uprzedniego rozwiązania przewodność  $T = 55,45 \text{ m}^2/\text{h}$

$$\mu_s = \frac{2,25 \cdot 55,45 \cdot 0,147}{330} = 0,000168.$$

Obliczona wielkość parametru  $\mu_s$  oraz znana z uprzedniego rozwiązania wielkość sumaryczna  $\mu_s + \mu'$  pozwala na określenie odsączalności warstwy glin zwałowych nadkładu:

$$\mu' = (\mu_s + \mu') - \mu_s = 0,00147 - 0,000168 = 0,00130.$$

Obliczone parametry filtracyjne warstwy wodonośnej metodą przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba, jak wykazano powyżej, są zbliżone do ich wielkości z rozwiązania ogólnego funkcji Hantusha:

- w przypadku  $T$  i  $k$  rozbieżność jest mniejsza od 5%,
- w przypadku parametrów  $\mu_s + \mu'$  nie przekracza 25%.

Zaprezentowane rozwiązanie obliczeń parametrów filtracyjnych warstwy naporowej z filtracji nieustalanej przy odsiakiwaniu wody z warstwy słabo przepuszczalnej, której pojemności ze względu na jej miąższość nie można pominąć, może być stosowane w przypadku pompowania długotrwałego, gdy ujawni się drugi odcinek krzywej, który spełnia schemat Theisa.

#### 5.1.4. Quasi-ustalony i ustalony stan strumienia

##### 5.1.4.1. Metoda Dupuita-Thiema

Równanie Dupuita-Thiema dla strumienia ustalonego [2.12] zapisane w postaci:

$$s = \frac{0,366Q}{T} \lg \frac{R}{r}$$

jest podobnie jak przybliżenie logarytmiczne wzoru Theisa-Jacoba [2.25] równaniem prostej. Równanie to typu  $y = cx$ , gdzie:  $c = c = \frac{0,366Q}{T}$ , jest współczynnikiem kierunkowym prostej, może być również rozwiązywane graficznie<sup>2</sup>, natomiast  $x = \lg \frac{R}{r}$ . W tym celu nanosi się na papier półlogarytmiczny równocześnie zmierzone depresje w otworach obserwacyjnych, położonych w różnych odległościach  $r$  od otworu pompowanego (rys. 5.14). Wielkości depresji odkłada się na osi rzędnych (zwykłej), a odległości otworów, w których zmierzono depresje, na osi odciętych (logarytmicznej). Uzyskany wykres funkcji  $s = f(\lg r)$  pozwala na wyznaczenie współczynnika kierunkowego  $c$ :

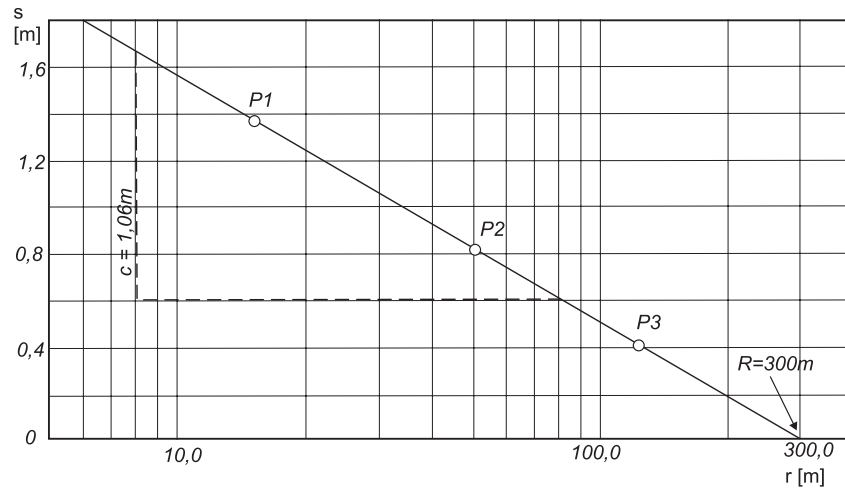
$$c = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta s}{\Delta \lg r}$$

Dla pełnego cyklu logarytmicznego, a więc dla  $\Delta \lg r = 1$ , mamy  $c = \Delta s$ . Znając wielkość współczynnika  $c$ , można obliczyć przewodność według wzoru:

$$T = \frac{0,366Q}{c} \quad [5.13]$$

Z wykresu  $s = f(\lg r)$  można również wyznaczyć zasięg leja depresyjnego, odczytując dla  $s = 0$  wartość  $r = R$ , a więc w punkcie przecięcia się wykresu z osią odległości.

<sup>2</sup> W literaturze anglojęzycznej używana jest nazwa „Cooper-Jacob Distance-Drawdown Method”.

Rys. 5.14. Wykres  $s = f(\lg r)$  – graficzne rozwiązanie wzoru Dupuita-Thiema

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe w rejonie Kijewa koło Środy Wlkp. Ujęto naporową warstwę wodonośną, którą stanowią piaski mioceńskie.** Badania wykonał Kombinat Geologiczny Zachód, Oddział w Poznaniu w kwietniu 1978 r. Prowadzący badania: H. Lamperski.

Obszar badań znajduje się w centralnej strefie trzeciorzędowego subzbiornika Wielkopolski. Strefa ta cechuje się znacznym nadkładem ilów serii poznańskiej górnego miocenu i pliocenu o miąższości 50–60 m, na której z kolei leżą gliny zwałowe o grubości 30 m. W podłożu tej części subzbiornika występują osady jurajskie w postaci margli (rys. 5.15). Zasadniczą warstwę wodonośną stanowi kompleks drobnoziarnistych piasków o miąższości 26–33 m, nad którym występują dwa pokłady węgla brunatnych, przedzielone piaskami i osadami ilasto-mułkowymi. W rejonie Kijewa wykonano 6 otworów rozpoznawczych (rys. 5.15). Pompowanie hydrowęzłowe otworu 2 prowadzono z wydajnością  $Q = 26,5 \text{ m}^3/\text{h}$  przez okres  $t_p = 144 \text{ h}$ .

Do końca pompowania warunki przepływu się nie ustaliły, co jest zjawiskiem normalnym dla rozległego zbiornika wód naporowych, jednak przyrosty depresji przy końcu pompowania były już minimalne. Z obserwacji poczynionych w otworach 2a, 1, 3 i 4 po upływie 2 h, 10 h i 144 h pompowania sporządzono wykresy  $s = f(\lg r)$ , które przedstawiono na rysunku 5.16.

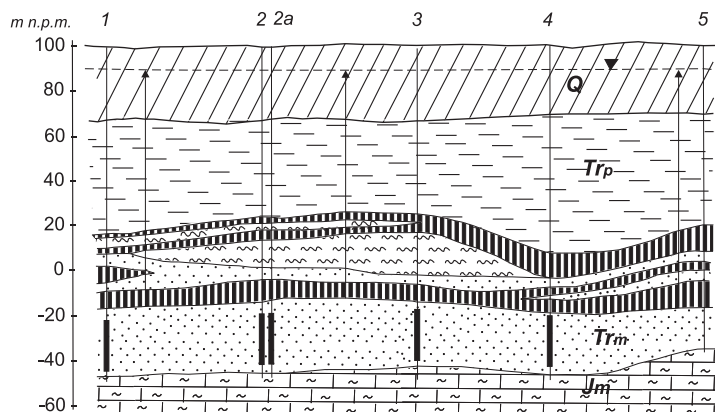
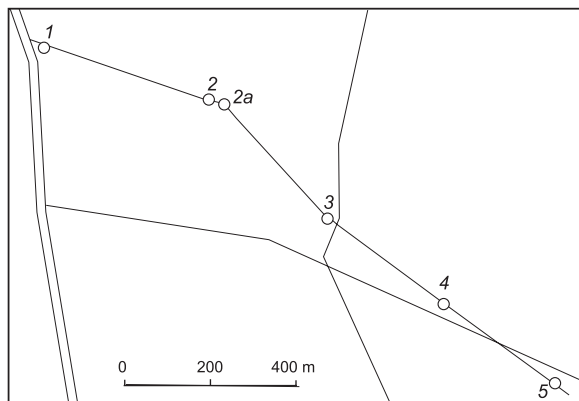
Równoległość wykresów świadczy o quasi-ustalonym przebiegu zjawiska rozwoju leja depresyjnego, a więc spełniony jest warunek [2.24]:

$$u = \frac{r^2}{4at} < 0,03 - 0,10.$$

Określenie parametrów z wykresów podanych na rysunku 5.16:

– wykres dla  $t = 2 \text{ h}$ ,  $c = 1,68 \text{ m}$ :

$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 26,5}{1,68} = 5,77 \text{ m}^2/\text{h}; R = 400 \text{ m},$$



Rys. 5.15. Szkic sytuacyjny wierzeń i schematyczny przekrój geologiczny rejonu Kijewa koło Środy Wlkp.

- wykres dla  $t = 10$  h,  $c = 1,70$  m

$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 26,5}{1,70} = 5,70 \text{ m}^2/\text{h}; R = 700 \text{ m},$$

- wykres dla  $t = 144$  h,  $c = 1,80$  m

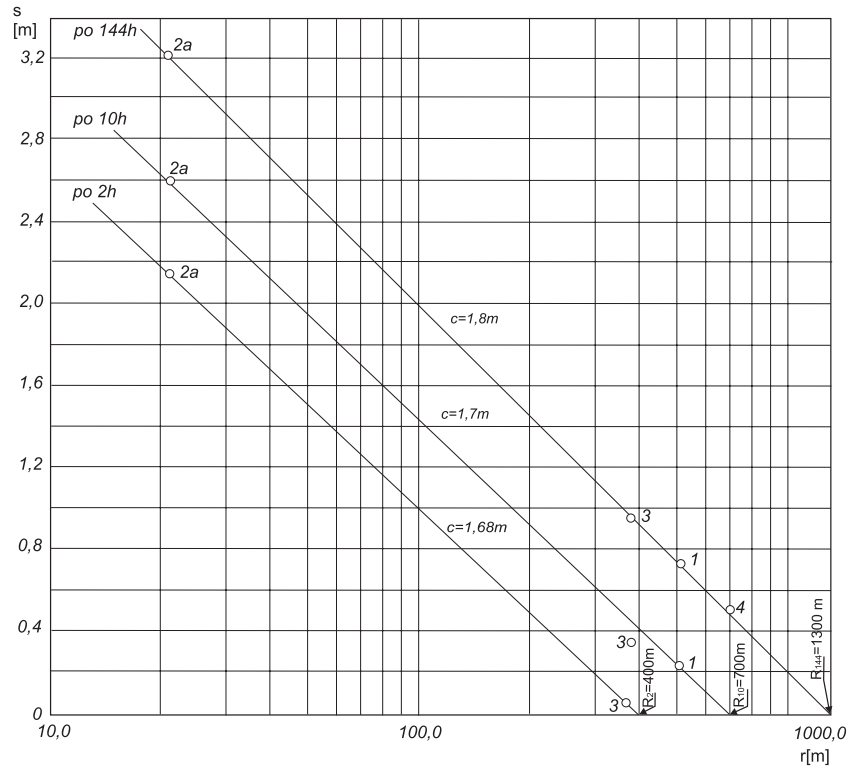
$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 26,5}{1,80} = 5,39 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$m = 31,0 \text{ m}$$

$$k = \frac{T}{m} = \frac{5,39}{31} = 0,17 \text{ m/h}; R = 1300 \text{ m}.$$

Przy opisanym quasi-ustalonym przebiegu rozwoju leja depresyjnego, obserwowanym w kilku otworach, można także określić współczynniki piezoprzewodności i odsączalności sprężystej z przekształcenia wzoru [2.27] do postaci:





Rys. 5.16. Wykresy  $s = f(\lg r)$  w czasie próbnego pompowania otworu 2 (warstwa mioceńska w rejonie Kijewa koło Środy Wlkp.)

$$a = 0,445 \frac{R_t^2}{t}. \quad [5.14]$$

Jeżeli więc do uzyskanego wzoru [5.14] podstawimy znaną wartość zasięgu leja depresji stwierdzoną na dany moment czasu od rozpoczęcia pompowania, to otrzymamy, np. dla  $t = 10$  h i  $R_t = 700$  m:

– współczynnik piezoprzewodności:

$$a = 0,445 \frac{R_t^2}{t} = 0,445 \frac{700^2}{10} = 21805 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{T}{a} = \frac{5,70}{21805} = 0,00026.$$

#### 5.1.4.2. Metoda podwójnie logarytmiczna De Glee

Metoda podwójnie logarytmiczna De Glee (Kruseman, de Ridder, 1979), nazywana także metodą Jacoba (Forkasiewicz, 1973), polega na graficznym rozwiązaniu równania [2.18]:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \cdot K_0\left(\frac{r}{B}\right); \quad B = \sqrt{T \frac{m'}{k'}}$$

gdzie:  $K_0\left(\frac{r}{B}\right)$  jest funkcją Bessela, podaną w dodatku 3 oraz na planszy II.

Równanie to ma zastosowanie wówczas, gdy dopływ wody z przesiąkania doprowadzi do ustalenia się warunków przepływu (rozd. 2.4.2.1) i gdy dysponuje się pomiarami depresji w co najmniej 3 otworach obserwacyjnych.

**Opis metody rozwiązań graficznych.** Wielkości depresji (maksymalna lub ustalona), zmierzone przy końcu pompowania w obserwowanych piezometrach, nanosi się na układ współrzędnych  $\lg s = f(\lg r)$  względem odpowiadających im wartości odległości ( $r$ ). Następnie przykłada się wykres doświadczalny na planszę funkcji  $K_0\left(\frac{r}{B}\right)$ . Po uzyskaniu zgodności krzywej doświadczalnej z wykresem funkcji obiera się wspólny dla nich punkt arbitralny i określa się dla niego wartości współrzędnych:

$[s, r]$  – z wykresu doświadczalnego,

$\left[K_0\left(\frac{r}{B}\right), x\right]$  – z wykresu krzywej wzorcowej.

Uzyskane wartości podstawia się do równania określającego przewodność:

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot s} K_0\left(\frac{r}{B}\right) = \frac{0,16Q}{s} K_0\left(\frac{r}{B}\right).$$

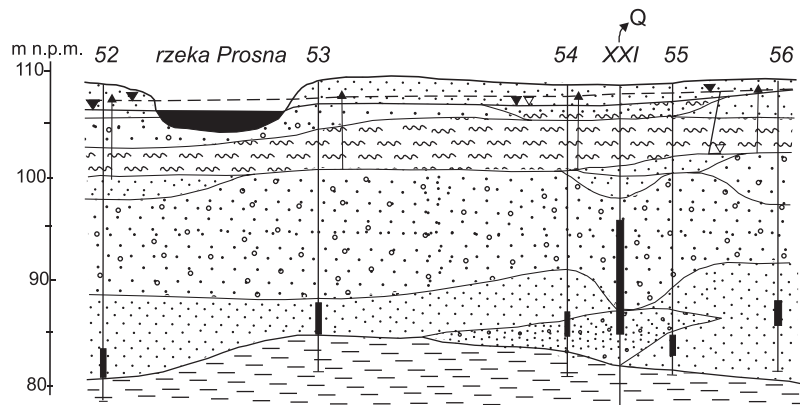
Pozostałe parametry: współczynnik przesiąkania  $B$ , opór hydrauliczny przesiąkania  $D$  i jego odwrotność, czyli parametr przesiąkania (przewodność pionowa)  $T' = \frac{k'}{m'}$  oraz zasięg leja depresji  $R$  oblicza się według podanych już uprzednio wzorów.

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe w dolinie Proсны powyżej Kalisza.** Badania wykonał Kombinat Geologiczny Zachód, Oddział w Poznaniu w sierpniu 1977 r. Prowadzący badania: Mikołaj Karpa.

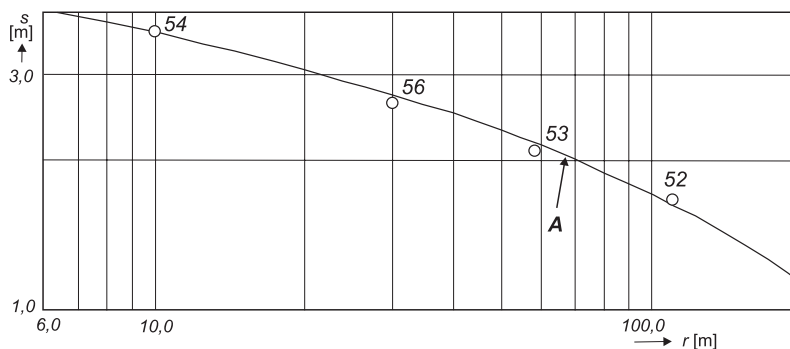
W dolinie rzeki Proсны w piętrze czwartorzędowym występują dwie warstwy wodonośne, rozdzielone warstwą słabo przepuszczalną (rys. 5.17). Dolna warstwa jest główną warstwą użytkową. Jej podłoże stanowią iły serii poznańskiej (trzeciorzęd). Pompowania otworów ujmujących główną warstwę wodonośną ujawniają zjawisko przesiąkania. Zasilanie z przesiąkania pochodzi z warstwy przypowierzchniowej, związanej hydraulicznie z Prosną (rys. 5.17).

Wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg r)$  przedstawiono na rysunku 5.18. Pompowano otwór XXI z wydajnością  $Q = 165 \text{ m}^3/\text{h}$  przez okres 460 h. Odległości otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego oraz zmierzone w nich depresje zwierciadła wody zestawiono poniżej:

Otwór nr	54	$r = 10,0 \text{ m}$	$s = 3,65 \text{ m}$
	56	$r = 30,0 \text{ m}$	$s = 2,62 \text{ m}$
	53	$r = 58,0 \text{ m}$	$s = 2,10 \text{ m}$
	52	$r = 108,0 \text{ m}$	$s = 1,66 \text{ m}$



Rys. 5.17. Przekrój geologiczny przez hydrowęzeł w dolinie Prosny

Rys. 5.18. Wykres  $\lg s = (\lg r)$ , plejstocénska warstwa wodonośna w dolinie Prosny, interpretacja według metody De Glee**Wyniki obliczeń**

Dane:

Współrzędne punktu arbitralnego:

 $s = 2,05 \text{ m}$ ,  $r = 67 \text{ m}$  – z wykresu doświadczalnego. $K_0\left(\frac{r}{B}\right) = 2,41$ ,  $x = 0,1$  – z wykresu funkcji  $K_0(x)$ . $Q = 165 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $m = 20 \text{ m}$ ,  $m' = 5 \text{ m}$ .

Obliczone parametry:

– przewodność:

$$T = \frac{0,16Q}{s} K\left(\frac{r}{B}\right) = \frac{0,16 \cdot 165}{2,05} \cdot 2,41 = 31,0 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{m} = \frac{31}{20} = 1,55 \text{ m/h},$$

- współczynnik przesiąkania:

$$B = \frac{r}{x} = \frac{67}{0,1} = 670 \text{ m,}$$

- opór hydrauliczny przesiąkania:

$$D = \frac{m'}{k'} = \frac{B^2}{T} = \frac{670^2}{31} = 14481 \text{ h,}$$

lub jego odwrotność – współczynnik przeciekania (parametr przesiąkania):

$$\frac{1}{D} = \frac{k'}{m'} = \frac{T}{B^2} = \frac{31}{670^2} = 0,000069 \frac{1}{\text{h}},$$

- współczynnik filtracji warstwy słabo przepuszczalnej (mułki):

$$k' = \frac{m'}{D} = \frac{5}{14481} = 0,000345 \text{ m/h.}$$

## 5.2. Warstwy wodonośne o zwierciadle niezupełnie swobodnym

### 5.2.1. Nieustalony stan strumienia – metoda podwójnie logarymiczna Boultona

Metoda podwójnie logarymiczna Boultona polega na graficznym rozwiązaniu równania [2.30]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u_a, u_y, \frac{r}{B_1}\right), \quad u_a = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt}, \quad u_y = \frac{r^2 \mu}{4Tt},$$

W tym celu wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg t)$  porównuje się z nomogramem funkcji wzorcowych, przedstawionych na planszy IV.

Plansza ta zawiera dwie rodziny krzywych teoretycznych (A i B): na lewo krzywe typu  $W\left(u_A, \frac{r}{B_1}\right)$  a na prawo krzywe typu  $W\left(u_y, \frac{r}{B_1}\right)$ . Metoda interpretacji polega na nałożeniu krzywej doświadczalnej  $\lg s = f(\lg t)$  najpierw na jedną z rodziny krzywych  $W\left(u_A, \frac{r}{B_1}\right)$ .

Współrzędne punktu arbitralnego:

- $[s, t]$  – z wykresu doświadczalnego,
- $\left[W\left(u_A, \frac{r}{B_1}\right), \frac{1}{u_A}, \frac{r}{B_1}\right]$  z wykresu wzorcowego,

pozwalają na obliczenie:

- przewodności według wzoru:

$$T = \frac{0,08Q}{s} \cdot W\left(u_A, \frac{r}{B_1}\right) \quad [5.15]$$

- współczynnika odsączalności sprężystej według wzoru:

$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u_A}\right)} \quad [5.16]$$

Następnie przesuwamy się krzywą doświadczalną równoległe do osi współrzędnych na prawo, szukając najlepszej zgodności wykresu z krzywą wzorcową rodziny B, bacząc, aby ta krzywa miała tę samą wartość  $\frac{r}{B_1}$  co z rodziny A. Ponownie odczy-

tane współrzędne nowego punktu arbitralnego  $s, t$ :  $W\left(u_y, \frac{r}{B_1}\right)$ ;  $\frac{1}{u_y}, \frac{r}{B_1}$  dają możli-

wość obliczenia:

- przewodności:

$$T = \frac{0,08Q}{s} \cdot W\left(u_y, \frac{r}{B_1}\right), \quad [5.17]$$

- współczynnika odsączalności grawitacyjnej:

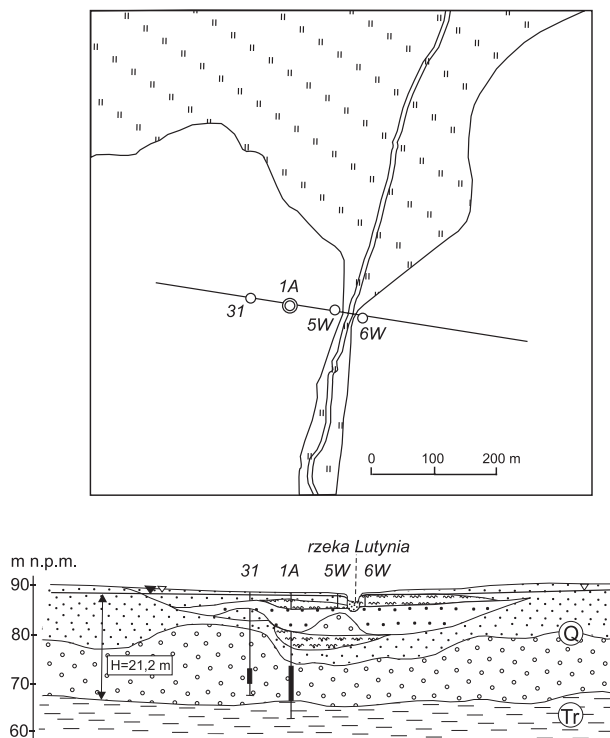
$$\mu = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u_y}\right)}, \quad [5.18]$$

- wskaźnika opóźnienia

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{B_1^2 \mu}{T}. \quad [5.19]$$

**Przykład obliczeń. Pompowanie hydrowęzłowe warstwy wodonośnej w Pradolinie Żerkowsko-Rydzyńskiej w rejonie Jarocina.** Badanie wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne w Poznaniu w 1975 r.; prowadzący: Mikołaj Karpa. Szkic sytuacyjny rejonu oraz schematyczny przekrój hydrowęzła w pradolinie przedstawia rysunek 5.19.

Na badanym odcinku pradolina ma szerokość 3 km. Wypełniają ją osady piaszczysto-żwirowe ostatniego zlodowacenia o miąższości 10–25 m, ułożone w dolinym cyklu sedymentacyjnym: żwiry, piaski gruboziarniste, piaski średnioziarniste, piaski drobnoziarniste, lokalnie z wkładkami mułków. W spągu osadów pradolin-



Rys. 5.19. Szkic sytuacyjny i przekrój geologiczny hydrowęzła w Pradolinie Żerkowsko-Rydzińskiej w rejonie Wilkowyi

nych występują ility trzeciorzędu. Kompleks piaszczysto-żwirowy stanowi warstwę wodonośną o swobodnym zwierciadle wody, zalegającym na głębokości 0,5–4 m. Warstwa wodonośna w stanie naturalnym jest drenowana przez rzekę Lutynię. Hydrowęzeł położony był mniej więcej w środku pradoliny, w odległości 100 m od Lutyni, której koryto na tym odcinku jest ekranowane mułkami od warstwy wodonośnej (rys. 5.19). Hydrowęzeł składał się z otworu pompowanego 1A i trzech otworów obserwacyjnych założonych na linii prostopadłej do rzeki, w odległościach: otwór 31–71,5 m; otwór 5W – 93,5; otwór 6W – 110,7 m. Próbné pompowanie prowadzono ze stałą wydajnością 62,7 m<sup>3</sup>/h przez 239 godzin.

Na koniec pompowania depresja wynosiła: w otworze pompowanym – 8,10 m, w otworach obserwacyjnych odpowiednio: 31 – 0,69 m, 5W – 0,62 m, 6W – 0,60 m. Wyniki pomiarów opadania zwierciadła wody zestawiono w tabeli 5.5, a wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg t)$  z próbnego pompowania przedstawiono na rysunku 5.20. Jego identyfikacji dokonano, posługując się nomogramem funkcji Boultona (plansza IV).

#### Wyniki obliczeń

I faza opadania – krzywa typu A;  $\frac{r}{B_1} = 0,15$ .

Dane:  $Q = 62,7 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 71,5 \text{ m}$ ,  $H = 21,2 \text{ m}$ .

Tabela 5.5. Opadanie zwierciadła wody w otworze 31 podczas pompowania otworu 1A z  $Q = 62,7 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 12–21.02.1975

$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]
0,017	0,0	0,58	0,31	6,5	0,46
0,033	0,03	0,67	0,32	7,0	0,47
0,050	0,07	0,76	0,33	9,0	0,47
0,067	0,10	0,83	0,34	10,0	0,48
0,083	0,13	0,92	0,35	13,0	0,49
0,100	0,15	1,00	0,36	17,0	0,50
0,120	0,16	1,08	0,37	20,0	0,51
0,130	0,17	1,17	0,38	23,0	0,52
0,150	0,18	1,50	0,38	32,0	0,53
0,170	0,19	1,58	0,39	42,0	0,54
0,180	0,20	1,75	0,40	69,0	0,55
0,200	0,20	1,83	0,41	93,0	0,56
0,220	0,21	2,00	0,41	101,0	0,57
0,250	0,22	2,17	0,42	117,0	0,58
0,280	0,23	2,67	0,42	141,0	0,61
0,320	0,24	2,83	0,43	145,0	0,62
0,350	0,25	3,50	0,43	165,0	0,63
0,380	0,26	3,75	0,44	177,0	0,64
0,420	0,27	4,50	0,44	189,0	0,66
0,450	0,28	4,75	0,45	213,0	0,67
0,500	0,29	5,50	0,46	225,0	0,68

Współrzędne punktu arbitralnego A1:

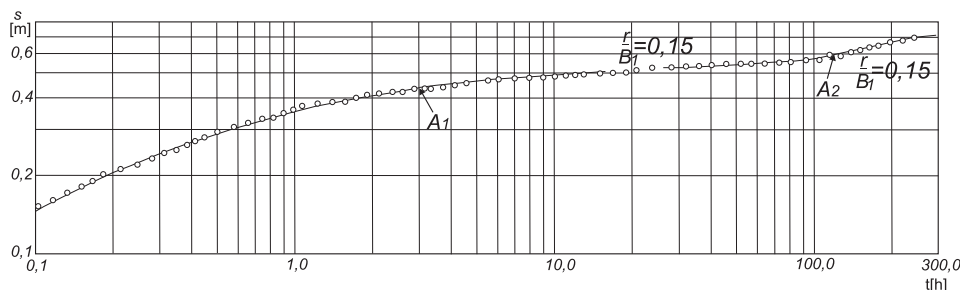
$$W(u_A) = 4,3, \frac{1}{u_A} = 200, s = 0,47 \text{ m}, t = 3,05 \text{ h.}$$

Obliczone parametry:

$$T = \frac{0,08Q}{s} \cdot W(u_A) = \frac{0,08 \cdot 62,7}{0,47} 4,3 = 45,8 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{H} = \frac{45,8}{21,2} = 2,16 \text{ m/h},$$

$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left( \frac{1}{u_A} \right)} = \frac{4,0 \cdot 45,8 \cdot 3,05}{71,5^2 \cdot 200} = 0,000547.$$



Rys. 5.20. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  (pradolinna warstwa wodonośna w rejonie Wilkowyi), interpretacja według metody Boultona

II faza opadania – krzywa typu B;  $\frac{r}{B_1} = 0,15$ .

Dane:  $Q = 62,7 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 71,5$ ,  $H = 21,2 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego A2:

$$W(u_y) = 5,2, \frac{1}{u_y} = 300, s = 0,6 \text{ m}, t = 120 \text{ h}.$$

Obliczone parametry:

$$T = \frac{0,08Q}{s} \cdot W(u_A) = \frac{0,08 \cdot 62,7}{0,6} 5,2 = 43,4 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{H} = \frac{43,4}{21,2} = 2,05 \text{ m/h},$$

$$\mu = \frac{4Tt}{r^2 \left( \frac{1}{u_y} \right)} = \frac{4,0 \cdot 43,4 \cdot 120,0}{71,5^2 \cdot 300,0} = 0,014.$$

### 5.2.2. Możliwość zastosowania do obliczeń metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

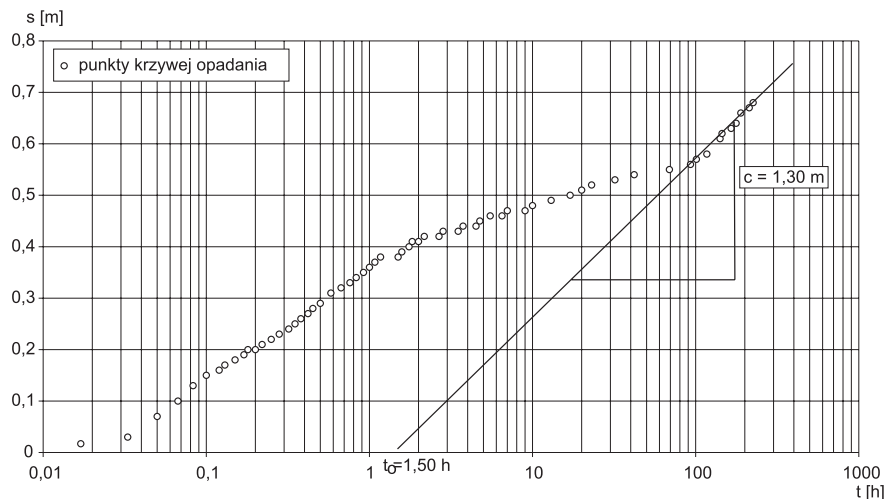
Przy posiadaniu wyników długotrwałego pompowania warstwy niezupełnie swobodnej, jak w przypadku pompowania w rejonie Wilkowyi, gdy uzyska się trzeci odcinek na wykresie przybliżenia logarytmicznego spełniający schemat warstwy typu Theisa, można ten odcinek wykorzystać do obliczeń parametrów filtracyjnych.

Z przedstawionego na rysunku 5.21. wykresu przybliżenia logarytmicznego odczytano z odcinka końcowego dane do obliczeń:

$$c = 0,30 \text{ m}, t_o = 1,50 \text{ h},$$

stąd obliczono:





Rys. 5.21. Wykres  $s = f(\lg t)$  – pradolinna warstwa wodonośna w rejonie Wilkowyi – interpretacja wg metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 62,7}{0,30} = 38,3 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{H} = \frac{38,3}{21,2} = 1,80 \text{ m/h},$$

$$\mu = \frac{2,25Tt_o}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 38,3 \cdot 1,5}{71,5^2} = 0,025.$$

W porównaniu do wyników obliczeń metodą Boultona (druga faza opadania) wynik ten jest:

- w przypadku przewodności niższy o 13%
- w przypadku odsączalności wyższy o 86%.

Wyniki powyższe wykazują, że do obliczeń parametrów filtracyjnych dla warstwy niezupełnie swobodnej należy stosować metodę Boultona, gdyż wyniki uzyskane metodą Theisa-Jacoba są obarczone zbyt dużym błędem.

### 5.3. Warstwy wodonośne o zwierciadle swobodnym

Teoretycznie problem rozwoju reakcji hydrodynamicznych w warstwach o zwierciadle swobodnym nie znalazł dotąd ścisłego i ostatecznego rozwiązania. Zależą tu takie szczególne komplikacje, jak:

- trójwymiarowość przepływu w sąsiedztwie studni,
- zmniejszanie się przewodności warstwy wraz ze wzrostem depresji,
- zróżnicowanie procesu odsączania się wody z warstwy wodonośnej, omówione już uprzednio przy charakterystyce metody Boultona.

Przy interpretacji wyników próbnych pompowań warstw wodonośnych o zwierciadle swobodnym istnieją trzy możliwości postępowania (Forkasiewicz, 1973):

- jeżeli  $s < 0,1 H$ , należy stosować metody wyprowadzone dla warstw o zwierciadle naporowym,
- jeżeli  $0,1 H < s < 0,3 H$ , należy stosować metody dla warstw jw. pod warunkiem wprowadzenia depresji skorygowanych  $s_c$ :

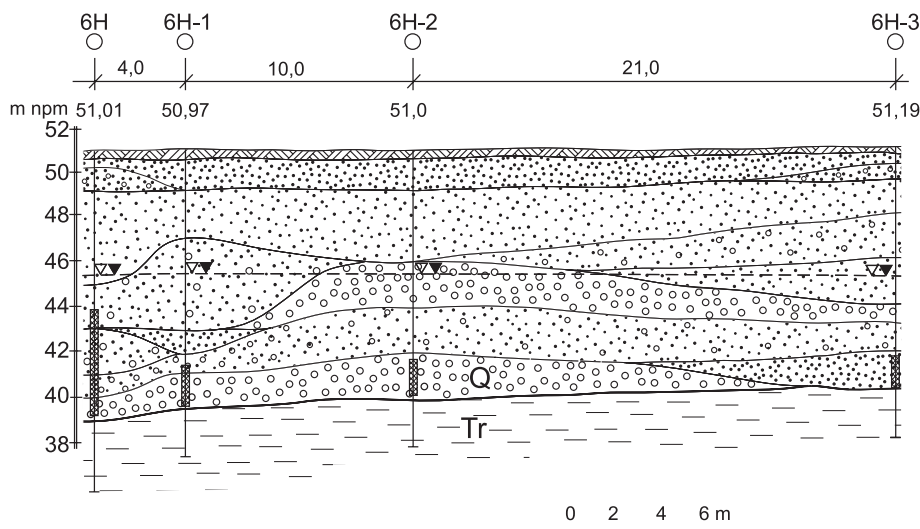
$$s_c = s - \frac{s^2}{2H}$$

- jeżeli  $s > 0,3 H$ , w tych skrajnych przypadkach należy stosować metody specjalne dla warstw o zwierciadle swobodnym, biorąc pod uwagę składową pionową prędkości oraz zmniejszenie się wartości przewodności hydraulicznej  $T$ .

Poniżej podano przykłady zastosowań wzorów filtracji nieustalanej i ustalanej dla interpretacji wyników próbnych pompowań z warstw o zwierciadle swobodnym, przy  $s < 0,1 H$  i  $0,1 H < s < 0,3 H$  w różnych warunkach hydrogeologicznych.

### 5.3.1. Pompowanie hydrowęzłowe na wysokim tarasie rzeki Brdy

**Przykład badań: Próbne pompowanie hydrowęzłowe na tarasie wysokim, plejstocенskim doliny Brdy w rejonie Bydgoszcz-Czyżkówko.** Badanie wykonała firma Hydroconsult Sp. z o.o. z Poznania w 2004 roku dla potrzeb rozpoznania warunków hydrogeologicznych w związku z zamiarami budowy ujęcia infiltracyjnego wody dla m. Bydgoszczy. Prowadzący badania: Stanisław Dąbrowski, Witold Rynarzewski. Szkic sytuacyjny oraz przekrój hydrogeologiczny hydrowęzła przedstawia rysunek 5.22.

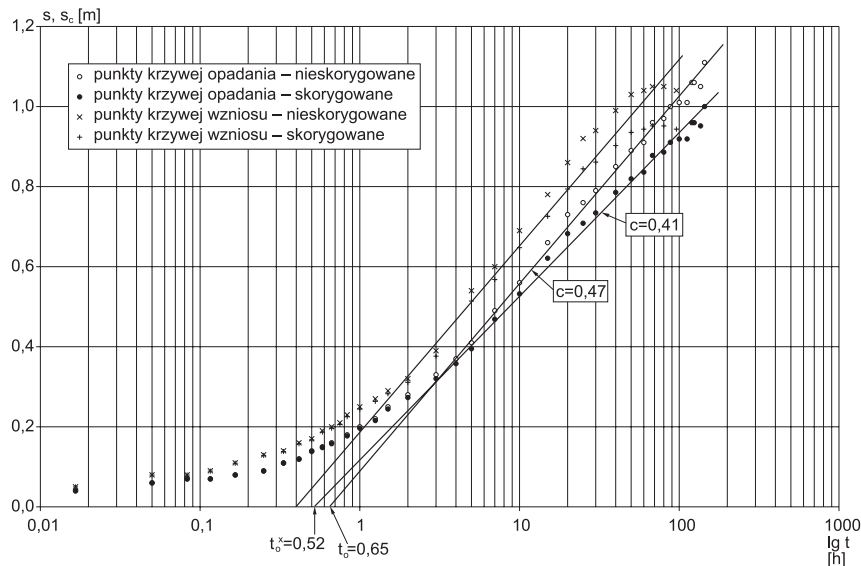


Rys. 5.22. Szkic i przekrój hydrogeologiczny hydrowęzła 6H w miejscowości Bydgoszcz-Czyżkówko

Taras wysoki doliny Brdy z ostatniego zlodowacenia budują głównie osady piasków średnioziarnistych i gruboziarnistych, przy miąższości do 18 m z przewarstwieniami żwirów. W spągu serii wodonośnej występują ility poznańskie górnego miocenu. Warstwa wodonośna o swobodnym zwierciadle wody, zalegającym na głębokości od 3 do 7 m, jest zasilana wyłącznie przez infiltrację opadów. Płaski strumień wód podziemnych, o spadku 0,0015, kieruje się do obniżenia holocenckiego rzeki Brdy. Hydrowęzeł składa się z otworu pompowanego 6H oraz 3 otworów obserwacyjnych, założonych wzdłuż linii prostej w odległościach: 6H-1 – 4,0 m, 6H-2 – 14,0 m i 6H-3 – 35 m, zafiltrowanych, jak to zilustrowano na rysunku 5.22. Próbné pompowanie prowadzono ze stałą wydajnością  $61,8 \text{ m}^3/\text{h}$  przez 144 h. Na koniec pompowania depresja wynosiła: w otworze pompowanym – 3,96 m, w otworach obserwacyjnych: 6H-1 – 1,68 m, 6H-2 – 1,11 m, 6H-3 – 0,61 m. Po zakończeniu pompowania przeprowadzono pomiary wzniosu zwierciadła wody przez 96 h.

#### Wyniki obliczeń według metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

Wyniki pomiarów opadania i wzniosu w otworze 6H-2, spełniającym wymogi lokalizacyjne dla obliczeń metodą Theisa-Jacoba, zestawiono w tabelach 5.6 i 5.7. Wykresy doświadczalne  $(s, s') = f(\lg t)$  oraz  $(s, s') = f(\lg t')$ , sporządzono dla porównania wyników dwukrotnie, biorąc wartości depresji nieskorygowane i skorygowane, gdyż depresja na koniec pompowania w tym otworze wynosiła  $0,2 H$ . Wykresy przedstawiono na rysunku 5.23. Obliczeń parametrów dokonano jedynie z wykresów opadania, gdyż krzywe wzniosu są podobne w wielkościach  $c$ , natomiast



Rys. 5.23. Wykresy  $s = f(\lg t)$  z pompowania hydrowęzłowego w miejscowości Bydgoszcz-Czyżkówko. Opadanie i wznios zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym 6H-2, znajdującym się w odległości 14 m od otworu 6H pompowanego z wydajnością  $Q = 61,8 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$

Tabela 5.6. Opadanie zwierciadła wody w otworze 6H-2 podczas pompowania otworu 6H z  $Q = 61,8 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 24.01–30.01.2001 (wartości nieskorygowane)

$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]
0,017	0,04	0,666	0,16	7	0,49	68	0,96
0,050	0,06	0,833	0,18	10	0,56	80	0,97
0,083	0,07	1,000	0,20	15	0,66	88	1,00
0,116	0,07	1,250	0,22	20	0,73	96	1,01
0,166	0,08	1,500	0,25	25	0,76	100	1,01
0,250	0,09	2,000	0,28	30	0,79	112	1,06
0,333	0,11	3,000	0,33	40	0,85	120	1,06
0,416	0,12	4,000	0,37	50	0,89	136	1,05
0,500	0,14	5,000	0,41	60	0,91	144	1,11

Tabela 5.7. Wznios zwierciadła wody w otworze 6H-2 po pompowaniu otworu 6H z  $Q = 61,8 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 24.01–30.01.2001 (wartości nieskorygowane)

$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]
0,017	0,05	0,500	0,17	2	0,32	30	0,94
0,050	0,08	0,583	0,19	3	0,39	40	0,99
0,083	0,08	0,666	0,20	5	0,54	50	1,03
0,116	0,09	0,750	0,21	7	0,60	60	1,04
0,166	0,11	0,833	0,23	10	0,69	68	1,05
0,250	0,13	1,000	0,25	15	0,78	80	1,05
0,333	0,14	1,250	0,27	20	0,86	96	1,04
0,416	0,16	1,500	0,29	25	0,92		

wielkości  $t_0$  są mniejsze, co może wynikać ze znacznego naturalnego nachylenia zwierciadła wody wpływającego na kształt leja depresyjnego.

Wyniki obliczeń wg metody Theisa-Jacoba, gdzie:

$$T = \frac{0,183Q}{c}, \quad k = \frac{T}{H}, \quad \mu = \frac{2,25Tt_0}{r^2}, \quad a = \frac{T}{\mu}.$$

Dane:  $Q = 61,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 14,0 \text{ m}$ ,  $H = 5,6 \text{ m}$ ,

$c^x = 0,41 \text{ m}$ ,  $t_0^x = 0,52 \text{ h}$  – wykres skorygowany,

$c = 0,47 \text{ m}$ ,  $t_0 = 0,65 \text{ h}$  – wykres nieskorygowany.

#### Wyniki obliczeń

Wykres skorygowany:  $T = 27,6 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $k = 4,9 \text{ m/h}$ ,  $\mu = 0,19$ ,  $a = 145 \text{ m}^2/\text{h}$ .

Wykres nieskorygowany:  $T = 24,1 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $k = 4,30 \text{ m/h}$ ,  $\mu = 0,18$ ,  $a = 134 \text{ m}^2/\text{h}$ .

Rozbieżność wyników spowodowana nieuwzględnieniem poprawki na depresję powoduje zaniżenie przewodności  $T$  o 15%, a parametru odsączalności  $\mu$  o 6%.

### Wyniki obliczeń według metody Dupuita-Thiema

Sporządzone wykresy w funkcji  $s = f(\lg r)$  (rys. 5.24) na koniec próbnego pompowania dla wielkości depresji skorygowanej i nieskorygowanej pozwoliły obliczyć:

- uśrednione wielkości parametrów  $T$  i  $k$ ,
- zasięg lejki depresji  $R$ ,
- wielkość zeskoku na krawędzi filtra w otworze pompowanym o promieniu  $r_o = 0,15$  m.

Wyniki obliczeń z funkcji  $s = f(\lg r)$ , według wzorów:

$$T = \frac{0,366Q}{c}, \quad k = \frac{T}{H}$$

Dane  $Q = 61,8$  m<sup>3</sup>/h,  $c^x = 0,8$  m – skorygowane,  $H^x = 5,8$  m,  
 $c = 1,15$  m – nieskorygowane,  $H_{sr} = 5,5$  m,

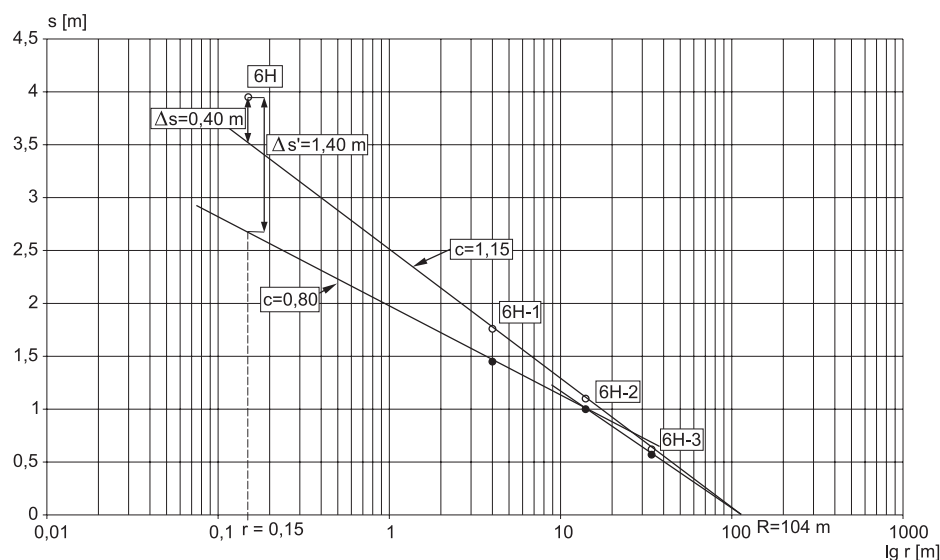
stąd:  $T^x = 28,3$  m<sup>2</sup>/h,  $k = 4,9$  m/h – dla skorygowanej depresji,

$T = 19,7$  m<sup>2</sup>/h,  $k = 3,58$  m/h – dla nieskorygowanej depresji.

Odczytany zasięg lejki z wykresu dla  $s = 0$  po 144 godzinach pompowania wyniósł  $R = 104$  m, zaś wielkości zeskoku na filtrze studni oszacowano na:  $\Delta s = 0,40$  m dla wyników nieskorygowanych i  $\Delta s = 1,40$  m dla wielkości skorygowanych.

Przedstawione obliczenia wykazują, że dla obliczeń wg Dupuita-Thiema należy również korygować wartości depresji zwierciadła wód w otworach obserwacyjnych.

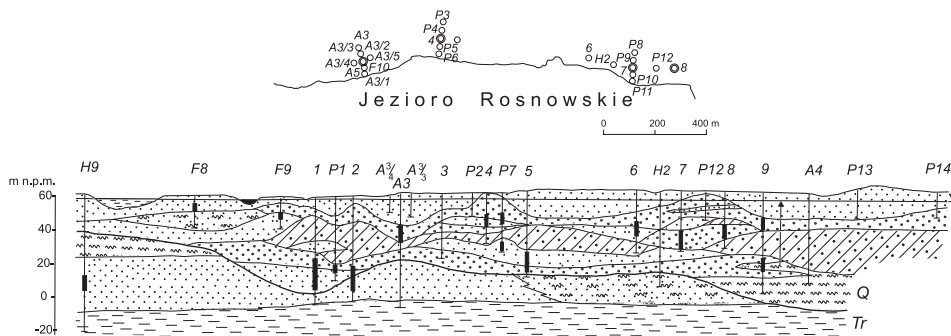
Do sporządzenia wykresów  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$  (rys. 5.23) obliczono depresje skorygowane z relacji  $s_c = s - \frac{s^2}{2H}$ , gdyż depresja obserwowana w otworze 6H-2 wynosiła  $0,2 H$ .



Rys. 5.24. Wykres  $s = f(\lg r)$  z pompowania hydrowężla 6H w miejscowości Bydgoszcz-Czyżkówko

### 5.3.2. Pompowania hydrowęzłowe w Pradolinie Pomorskiej

**Przykłady badań.** Wykonawcą badań było Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania w latach 1968–1969. Prowadzący badania: Tadeusz Kłyza i Jan Przybyłek. Na rysunku 5.25 podano przekrój geologiczny, obrazujący rozmieszczenie hydrowęzłów A-3, 4 oraz 7 wzdłuż osi pradoliny oraz ich szkice sytuacyjne. Wszystkie hydrowęzły zlokalizowane zostały na tarasie środkowym i ujmowały warstwę pradoliną, zbudowaną ze żwirów oraz piasków różnoziarnistych z przewagą frakcji grubszej.



Rys. 5.25. Przekrój geologiczny wzdłuż Pradoliny Pomorskiej wraz ze szkicami hydrowęzłów A-3, 4 i 7

Interpretację wyników próbných pompowań przeprowadzono dwiema metodami graficznymi:

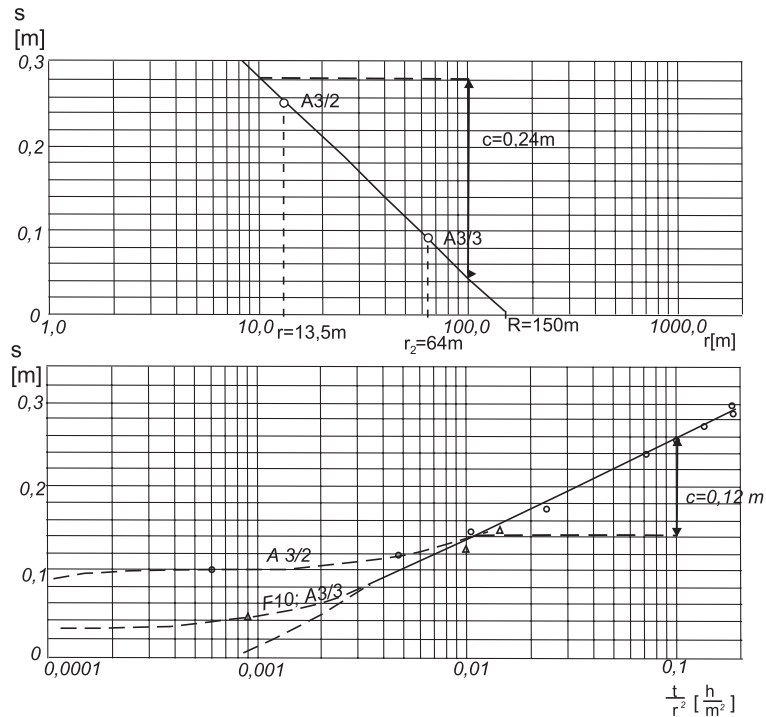
- według metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba, wykorzystując możliwości sporządzenia dwóch typów wykresów:  $s = f(\lg t)$  i  $s = f\left(\lg \frac{t}{r^2}\right)$ ,
- według metody Dupuita-Thiema: wykresy  $s = f(\lg r)$ .

**Próbne pompowanie w hydrowęźle A-3** przeprowadzono z wydajnością  $49 \text{ m}^3/\text{h}$  przez okres 58 h. Na rysunku 5.26 przedstawiono dwa wykresy:  $s = f\left(\lg \frac{t}{r^2}\right)$  i  $s = f(\lg r)$ . Wykres został sporządzony na podstawie pomiarów opadania zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych F10, A3/2, A3/3. Nachylenie prostej odpowiadającej  $c = 0,12 \text{ m}$ ,  $\frac{t_0}{r^2} = 0,0008$ .

Obliczone parametry:

- przewodność według wzoru [5.5]:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 49}{0,12} = 73,5 \text{ m}^2/\text{h},$$



Rys. 5.26. Wykres  $s = f(\lg r)$  i  $s = f\left(\lg \frac{t}{r^2}\right)$  dla hydrowężła A-3 (Pradolina Pomorska)

- współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{H} = \frac{73,5}{25} = 2,94 \text{ m/h,}$$

- współczynnik odsączalności grawitacyjnej według wzoru [5.6]:

$$\mu = 2,25 \left( \frac{t_0}{r^2} \right) = 2,25 \cdot 73,5 \cdot 0,0008 = 0,13,$$

- współczynnik przewodności:

$$a = \frac{T}{\mu} = \frac{73,5}{0,13} = 565 \text{ m}^2.$$

Wykres  $s = f(\lg r)$  został sporządzony na podstawie równoczesnych pomiarów zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych A3/2 i A3/3 po 20 godzinach trwania pompowania. Nachylenie prostej odpowiadającej  $c = 0,24$  m,  $R = 150$  m,  $t = 20$  h.

Obliczone parametry:

- przewodność według wzoru [5.13]:

$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 49}{0,24} = 74,7 \text{ m}^2/\text{h,}$$

- współczynnik przewodności według wzoru [5.14]:

$$a = 0,445 \frac{R^2}{t} = 0,445 \frac{150^2}{30} = 500 \text{ m}^2/\text{h}$$

- współczynnik odsączalności grawitacyjnej:

$$\mu = \frac{T}{a} = \frac{74,7}{500} = 0,149.$$

Próbne pompowanie hydrowężła 4 było przeprowadzone z wydajnością 67 m<sup>3</sup>/h przez okres 75 h. Wykresy z pompowania przedstawiono na rysunku 5.27. Wykres  $s = f\left(\lg \frac{t}{r^2}\right)$  sporządzony na podstawie pomiarów opadania zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych P3 i P4. Nachylenie prostej odpowiadającej  $c = 0,215$ ,  $\frac{t_0}{r^2} = 0,001$ .

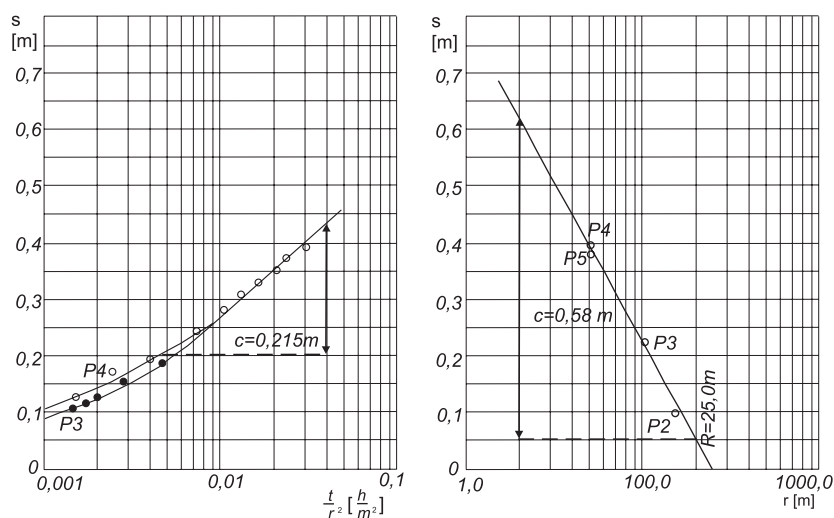
Obliczone parametry:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 67}{0,215} = 57,4 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{H} = \frac{57,4}{20} = 2,87 \text{ m/h},$$

$$\mu = 2,25T \left(\frac{t_0}{r^2}\right) = 2,25 \cdot 57,4 \cdot 0,001 = 0,129,$$

$$a = \frac{T}{\mu} = \frac{57,4}{0,129} = 444 \text{ m}^2/\text{h}.$$



Rys. 5.27. Wykresy  $s = f\left(\lg \frac{t}{r^2}\right)$  i  $s = f(\lg r)$  dla hydrowężła 4 (Pradolina Pomorska)



Wykres  $s = f(\lg r)$  został sporządzony na podstawie równoczesnych pomiarów zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych P2, P3, P4, P5. Nachylenie prostej odpowiadającej  $c = 0,58$  m;  $R = 250$  m po  $t = 75$  h.

Obliczone parametry:

$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 67}{0,58} = 42,3 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$a = 0,445 \frac{R^2}{t} = 0,445 \frac{250^2}{75} = 371 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu = \frac{T}{a} = \frac{42,3}{371} = 0,114.$$

**Próbné pompowanie hydrowężła 7** było przeprowadzone z wydajnością  $185 \text{ m}^3/\text{h}$  przez okres 70 h. Wykresy z pompowania przedstawiono na rysunku 5.28. Wykres  $s = f(\lg t)$  został sporządzony na podstawie pomiarów opadania zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym P9. Nachylenie wykresu  $c = 0,445$  m,  $t_o = 2,3$  h, odległość otworu obserwacyjnego P9 od otworu pompowanego  $r = 51$  m.

Obliczone parametry:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 185}{0,445} = 76,1 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{H} = \frac{76,1}{35} = 2,17 \text{ m/h},$$

$$\mu = 2,25T \left( \frac{t_o}{r^2} \right) = 2,25 \cdot 76,1 \cdot \frac{2,3}{51^2} = 0,151,$$

$$a = \frac{T}{\mu} = \frac{76,1}{0,151} = 504 \text{ m}^2/\text{h}.$$

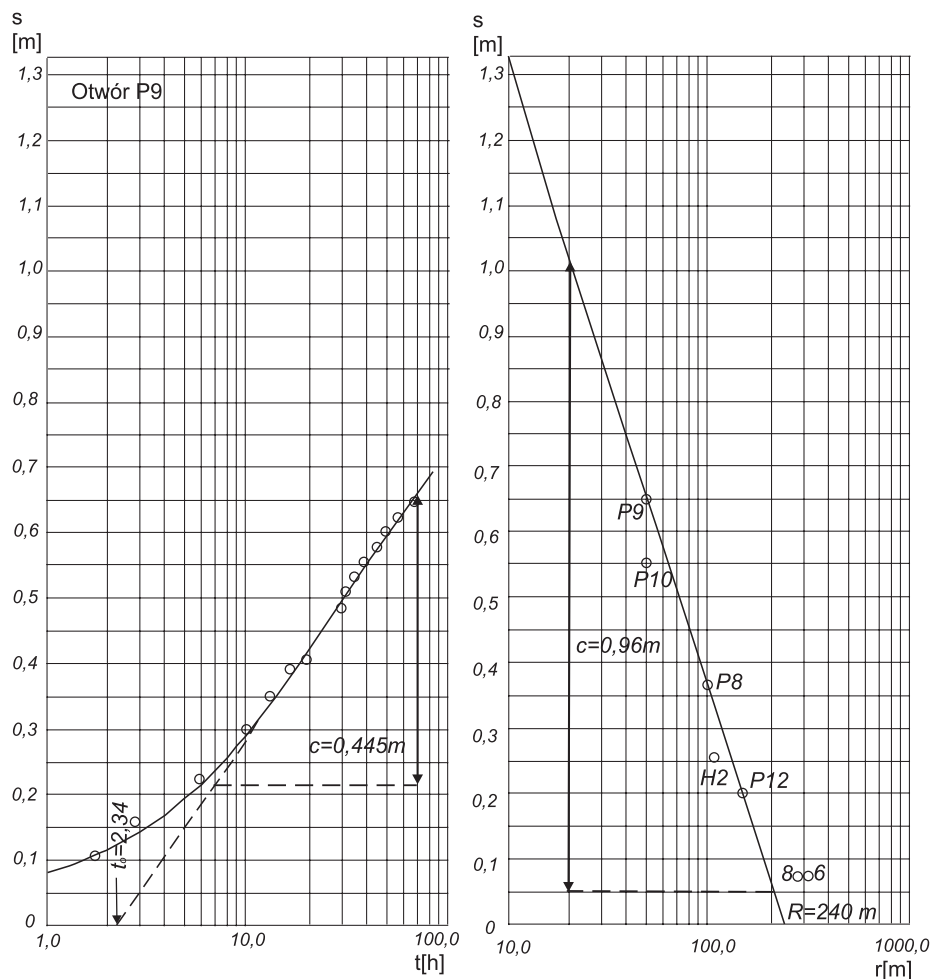
Wykres  $s = f(\lg r)$  został sporządzony na podstawie równoczesnych pomiarów zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych P8, P9, P10, P12. Nachylenie wykresu  $c = 0,96$  m,  $R = 240$  m dla  $t = 70$  h.

Obliczone parametry:

$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 185}{0,96} = 70,5 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$a = 0,445 \frac{R^2}{t} = 0,445 \frac{240^2}{70} = 366 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu = \frac{T}{a} = \frac{70,5}{366} = 0,19.$$

Rys. 5.28. Wykresy  $s = f(\lg t)$  i  $s = f(\lg r)$  dla hydrowęzła 7 (Pradolina Pomorska)

W tabeli 5.8 zestawiono obliczone parametry dla wszystkich trzech hydrowęzłów. Z porównania obliczonych wartości wynika, że:

- wartości przewodności obliczone według dwóch różnych metod są bardzo zbliżone, a różnica w wynikach mieści się w przedziale 2–8%; dowodzi to poprawności przeprowadzonych obliczeń;
- wartości współczynnika odsączalności obliczone według wykresu  $s = f(\lg r)$  z zasięgu lejka depresji po danym czasie są wyższe o 13–21% od wartości obliczonych z wykresów przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba.

Uznaje się, że wartości współczynnika odsączalności grawitacyjnej obliczone z zasięgu lejka depresji przy końcu fazy nieustalonej pompowania dokładniej odzwierciedlają rzeczywistą odsączalność grawitacyjną badanej warstwy.

Porównując zasięgi lejów depresyjnych w rejonie hydrowęzłów 4 i 7 (250, 240 m), z których pompowania były przeprowadzone w prawie identycznym czasie

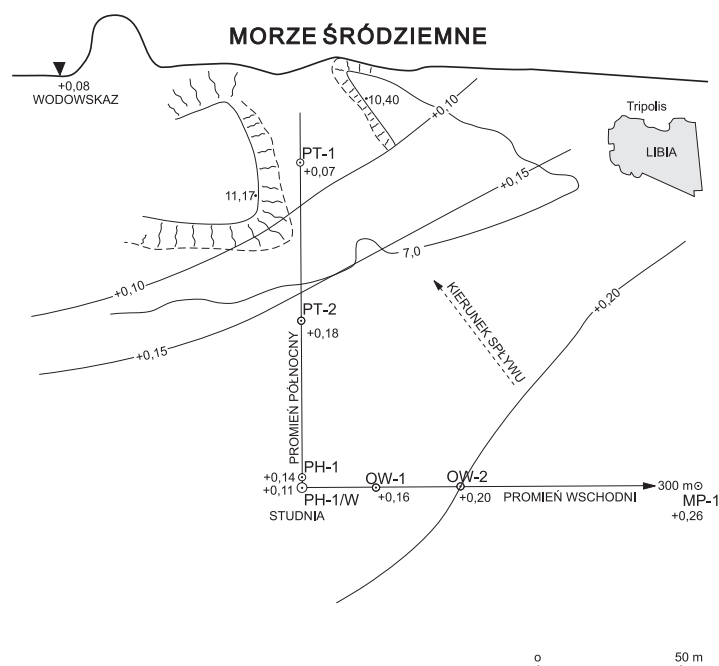
Tabela 5.8. Zestawienie porównawcze parametrów z pompowań hydrowęzłowych w Pradolinie Pomorskiej

Hydrowęzeł	Q [m <sup>3</sup> /h]	t <sub>p</sub> [h]	Wykresy $s = f(\lg t)$			Wykresy $a = f(\lg r)$		
			T [m <sup>2</sup> /h]	$\mu$	a [m <sup>2</sup> /h]	T [m <sup>2</sup> /h]	$\mu$	a [m <sup>2</sup> /h]
A3	49	20	73,5	0,13	565	74,7	0,15	500
4	67	75	57,4	0,13	444	42,3	0,11	371
7	185	70	76,1	0,15	504	70,5	0,19	366

(przy  $t = 75$  h, 70 h), ale przy różnych wydajnościach (67, 185 m<sup>3</sup>/h), można łatwo potwierdzić znane spostrzeżenie, że rozwój lejów depresji jest niezależny od wydajności pompowania (por. równania [2.11] i [2.13]).

### 5.3.3. Pompowanie hydrowęzłowe warstwy wodonośnej z podwójną porowatością (porowo-szczelinowa)

Badania hydrogeologiczne przeprowadzono na afrykańskim wybrzeżu Morza Śródziemnego – w Trypolitanii (Libia), kilkadziesiąt kilometrów na zachód od Trypolisu (rys. 5.29). Badania przeprowadziła firma Geopol w 1989 roku. Prowadzący badania: Jan Przybyłek, Lucjan Safader.



Rys. 5.29. Szkic hydrogeologiczny hydrowęzła badawczego z planem hydroizohips dla warstwy wodonośnej formacji Gargaresh w Trypolitanii

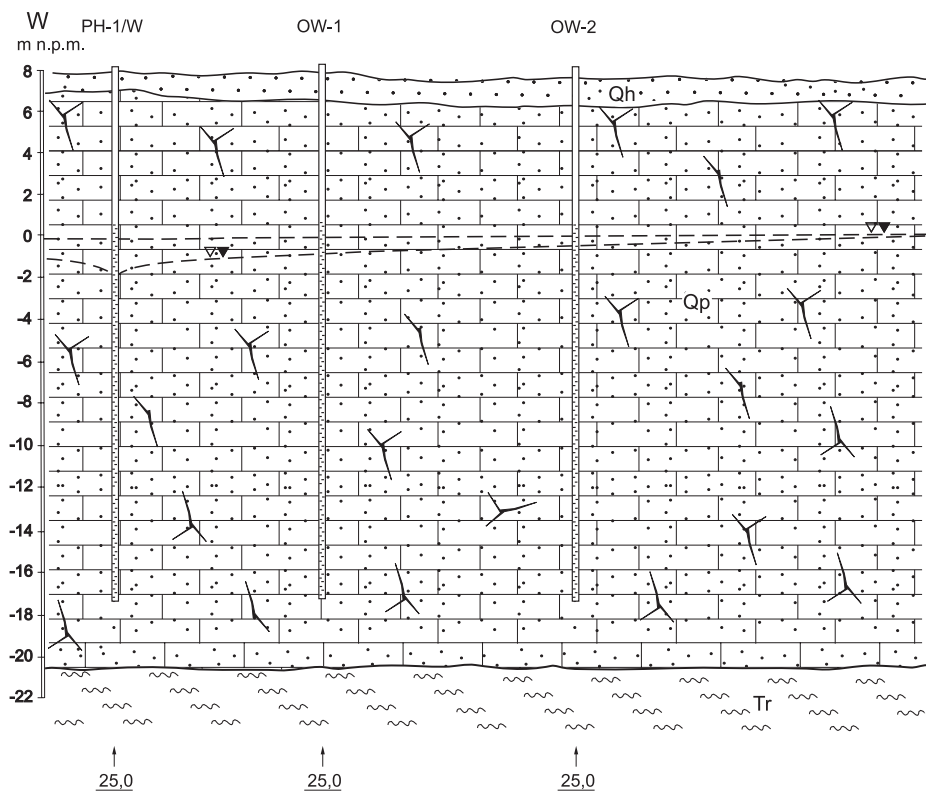
Tabela 5.9. Dane o wykonanych otworach w hydrowężle badawczym

Numer otworu	Rzędna terenu [m n.p.m.]	Głębokość otworu [m]	Głębokość do zwierciadła wody [m]	Średnica otworu [mm]	Średnica filtru [mm]	Odległość od pompowanej studni [m]
Studnia PH-1/W	7,49	25,0	7,38	380	218	–
PH-1	7,58	25,0	7,44	112	bezfiltrowy	3,0
OW-1	7,70	25,0	7,54	216	114	25,0
OW-2	7,35	25,0	7,15	216	114	54,7
PT-2	6,68	27,5	6,50	112	bezfiltrowy	58,0
PT-1	5,67	25,0	5,60	112	bezfiltrowy	113,0
MP-1	8,38	13,6	8,12	112	bezfiltrowy	300,0

Wybrzeże morskie na tym odcinku jest zbudowane z eolianitów węglanowych (kalkarenitów) wyniesionych 8–10 m n.p.m. Występujące na zachód od Trypolisu skały kalkarenitowe zostały nazwane „formacją Gargaresh” (od nazwy zachodniego przedmieścia Trypolisu) dla wyróżnienia grupy tych osadów bogatych w faunę górnego plejstocenu (piętro tyrręskie). Celem opisywanych badań hydrogeologicznych było określenie parametrów niezbędnych do zaprojektowania głębokiego odwodnienia koniecznego dla posadowienia dużego obiektu budowlanego (Przybyłek, 2002).

Na rysunku 5.29 przedstawiono sytuację hydrowężla badawczego, składającego się z 6 otworów (tab. 5.9), zlokalizowanych tuż za wałem nadbrzeżnym w miejscu, gdzie zaplanowano budowlę.

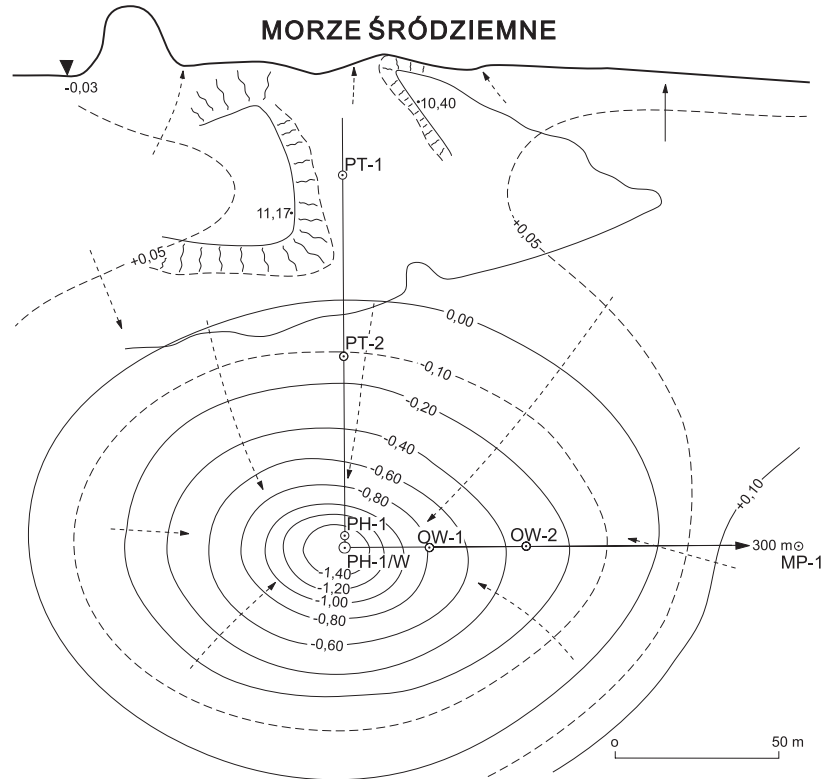
W rejonie zaplanowanego hydrowężla kompleks osadów kalkarenitowych przewiercono w otworze PT-2 (rys. 5.29), osiągając ich spąg na głębokości 27,0 m p.p.t. W spągu formacji Gargaresh napotkano osady ilasto-piaszczyste, zaliczane do trzeciorzędowej formacji Jeffara, które to osady stanowią warstwę izolacyjną dla lokalnego systemu krążenia wód podziemnych. Pozostałe otwory zaprojektowanego hydrowężla zakończono na głębokości 25 m (rys. 5.30). Poza rejonem hydrowężla i spodziewanym zasięgiem leja depresji w próbnym pompowaniu wykonano jeden płytszy otwór MP-1 (głęb. 13,6 m) w odległości 300 m na wschód od otworu studziennego PH-1/W. Otwór ten wykonano w celu prowadzenia obserwacji naturalnych zmian stanów wód podziemnych pod wpływem zmian stanu morza wskutek sztormów. Swobodne zwierciadło wody podziemnej stwierdzono w poszczególnych otworach na głębokości od 5,6 do 8,1 m poniżej terenu, w zależności od jego konfiguracji (tab. 5.9). Miąższość zawodnionej warstwy wynosi 20,5 m (rys. 5.30). W warunkach naturalnych zaobserwowano niewielki spadek zwierciadła wody podziemnej w kierunku morza (rys. 5.29). Stany morza kontrolowano na specjalnie zamocowanym wodowskazie, umieszczonym na zalewanej przez wodę morską półce zbudowanej z kalkarenitu.



Rys. 5.30. Przekrój hydrogeologiczny przez wschodni promień hydrowężła nad Morzem Śródziemnym w Trypolitanii (Libia)

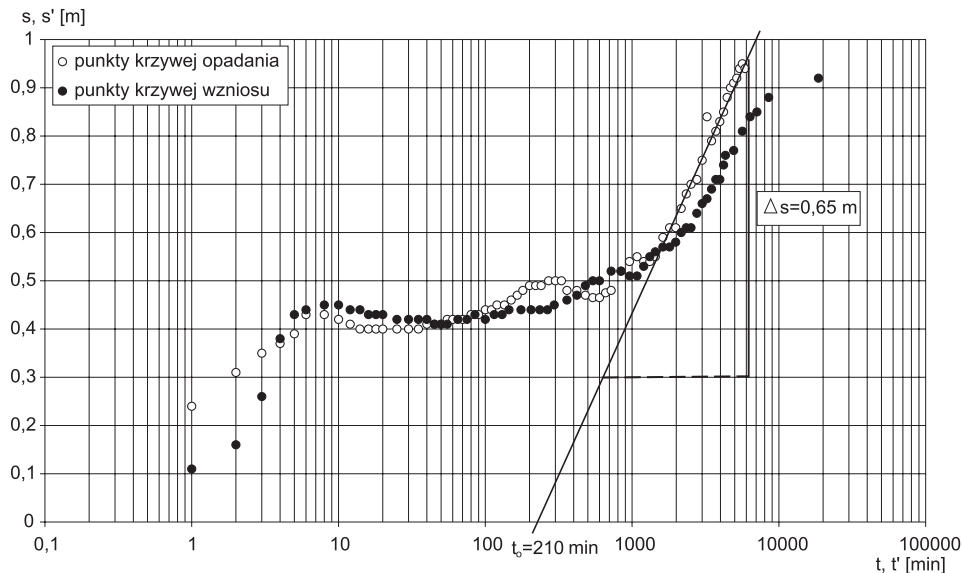
Pobrane z wierceń rdzenie skalne uwiarydliły cechy teksturalne i strukturalne badanego zespołu osadów. Ziarna piasku węglanowego o zróżnicowanej wielkości w poszczególnych partiach skalnych były słabiej lub silniej spójone cementem również natury węglanowej. Stwierdzono, że kalkarenity posiadają zarówno horyzontalne, jak i diagonalne warstwowanie, a w przewierconym (rys. 5.30) – około 27 m miąższości – kompleksie tych osadów występują bardzo licznie, i to na różnych głębokościach szczeliny diagonalne oraz mikrokawerny. W trakcie wiercenia otworu badawczo-obszernego PH-1 stwierdzono w interwale głębokości 19,50–20,0 m oraz 21,0–22,5 m i podobnie w otworze PT-2 w interwale 23,4–23,9 m duże kawerny wypełnione materiałem piaszczysto-ilastym (Przybyłek, 2002).

Hydrowężel badawczy składał się z otworu studziennego PH-1/W oraz otworów obserwacyjnych rozmieszczonych na dwóch prostopadłych do siebie promieniach: północnym i wschodnim. Czterodobowe pompowanie pomiarowe wykonano ze stałą wydajnością  $Q = 19,64 \text{ l/s} = 70,7 \text{ m}^3/\text{h}$  w okresie od 7 maja 1989 roku, godz. 8.00, do 11 maja 1989 roku, godz. 10.00, uzyskując przy końcu pompowania w otworze studziennym depresję 8,45 m, przy której wydajność jednostkowa studni wyniosła  $q = 8,37 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Lej depresji który ukształtował się po czterech dobach pompowania, przedstawiono na rysunku 5.31. W przebiegu pompowania



Rys. 5.31. Leń depresji po czterech dobach próbnego pompowania studni PH-1/W ze stałą wydajnością  $Q = 70,7 \text{ m}^3/\text{h}$

można wyróżnić trzy fazy przyrostu depresji, ilustrujące przebieg zjawisk hydrodynamicznych w analizowanej warstwie wodonośnej (rys. 5.32). W czasie pierwszej fazy, kilkuminutowej, nastąpił bardzo szybki przyrost depresji w najbliższych otworach hydrowęzła. W odległym o 25 m od studni otworze OW-1 przyrost w ciągu pierwszych 6 minut wyniósł 0,43 m, a w odległym o 54,7 m od studni otworze OW-2 odpowiednio 0,16 m. W fazie tej nastąpiła gwałtowna reakcja hydrodynamiczna – typowa dla warstwy o zwierciadle naporowym z rozwiniętym systemem szczelin. Po fazie I miała miejsce faza II – trwająca do 22. godziny pompowania o proporcjonalnie niewielkim przyroście depresji w efekcie opóźnionego odsączania się wody z wnętrza masywu kalkarenitów, po której nastąpiła faza III, charakteryzująca się już grawitacyjnym odsączaniem wody nagromadzonej wyłącznie w międzyziarnowych porach kalkarenitów w obszarze objętym lejem depresji; faza prowadząca w efekcie do odwodnienia górnej części (osuszenia) masywu skalnego na głębokość wyrażoną depresją zwierciadła wody przy końcu pompowania. Mechanizm opisanych zjawisk znajduje odzwierciedlenie również w przedstawionej analizie wzniosu zwierciadła wody po próbnym pompowaniu, co zilustrowano poprzez umieszczenie wykresu wzniosu  $s' = f(\lg t')$  na tym samym rysunku 5.32 co omówiony już wykres opadania zwierciadła wody  $s = f(\lg t)$ . Do



Rys. 5.32. Analiza parametryczna przyrostu depresji w otworze obserwacyjnym OW-1 metodą Theisa-Jacoba

obliczeń parametrów filtracji według wzoru przybliżenia logarytmicznego funkcji Theisa  $W(u)$  wykorzystano metodę Theisa-Jacoba, wyznaczając nachylenie prostej dla wycinka wykresu opadania zwierciadła wody  $s = f(\lg t)$  w otworze OW-1 w końcowej fazie pompowania. Wyniki obliczeń podano w tabeli 5.10.

Zaobserwowane zjawiska pozwoliły na stwierdzenie, że w przypadku badanego ośrodka skalnego mamy do czynienia z podwójną porowatością warstwy wodonośnej i z jej zachowaniem się podczas pompowania badawczego zgodnie ze schematem opisanym przez Boultona (1963). Dlatego też na rysunku 5.33 przedstawiono analizę parametryczną depresji (opadanie i wznios zwierciadła wody) w otworze obserwacyjnym OW-1 z wykorzystaniem metody krzywych wzorcowych, uwzględniających efekt opóźnionego odsączania warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym, zaznaczając przyjęty do obliczeń parametrów filtracji punkt arbitralny na krzywej doświadczalnej opadania  $\lg s = f(\lg t)$ . Wyniki obliczeń parametrów filtracji przedstawiono w tabeli 5.10.

Podjęto również analizę rozwoju leja depresji zilustrowaną wykresami funkcji  $s = f(\lg r)$  dla wschodniego promienia hydrowęzła na rysunku 5.34. Wykresy leja depresji przedstawione na tym rysunku dotyczą dwóch momentów czasowych: **pierwszego** – po  $t_1 = 6$  h – jeszcze w fazie funkcjonowania odsączalności grawitacyjnej z systemu szczelinowo-krasowego masywu kalkarenitów, oraz **drugiego** – przy końcu pompowania  $t_2 = 70$  h – w fazie pełnej odsączalności grawitacyjnej wody z kompleksu porowego kalkarenitów.

Przy konstrukcji wykresów równania Dupuit-Thiema (wzory 2.11–2.13), podanych na rysunku 5.34, zastosowano korektę zaobserwowanych depresji, wprowadzając poprawkę wynikającą ze swobodnego charakteru zwierciadła wody. Oblicze-

Tabela 5.10. Parametry warstwy wodonośnej formacji Gargaresh obliczone na podstawie próbnego pompowania z wydajnością  $Q = 19,64$  l/s =  $70,7$  m<sup>3</sup>/h; miąższość warstwy wodonośnej  $H = 20,5$  m

Wykres	Piezometr nr	Czas [h]	Dane z wykresu		Współczynnik filtracji wzór	Współczynnik odsączalności wzór	Współczynnik odsączalności $\mu$ [ - ]	Przewodność hydrauliczna	
			$\Delta s$ [m]	$t_0$ [h]				$R$ [m]	wzór
$\lg s = f(\lg t)$	OW-1 25,0	-	Współrzędne punktu A: $s = 0,55$ m, $t = 1400$ min = 23,3 h, $1/u = 11,7$ , $W(u) =$ 2,0		$k = \frac{T}{H}$ 2,79	$\mu = \frac{4Tt}{r^2 \left( \frac{1}{u} \right)}$ 0,261	0,261	$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u)$ 5,68	$k \cdot 10^{-3}$ [m <sup>2</sup> /s]
$s = f(\lg t)$	OW-1 25,0	-	0,65	3,5	$k = \frac{2,3Q}{4\pi\Delta sH}$ 2,70	$\mu = \frac{2,25Tt_0}{r^2}$ 0,251	0,251	$T = kH$ 5,53	5,53
$s = f(\lg r)$	Promień	0,1	1,30	-	2,70	0,0006	0,0006	5,53	5,53
	wschodni PH-1, OW-1, OW-2	6,0	1,10	-	$k = \frac{2,3Q}{2\pi\Delta sH}$ 3,19	$\mu = \frac{2,25Tt}{R^2}$ 0,051	0,051	$T = kH$ 6,54	6,54
		70,0	1,14	-	3,08	0,193	0,193	6,31	6,31



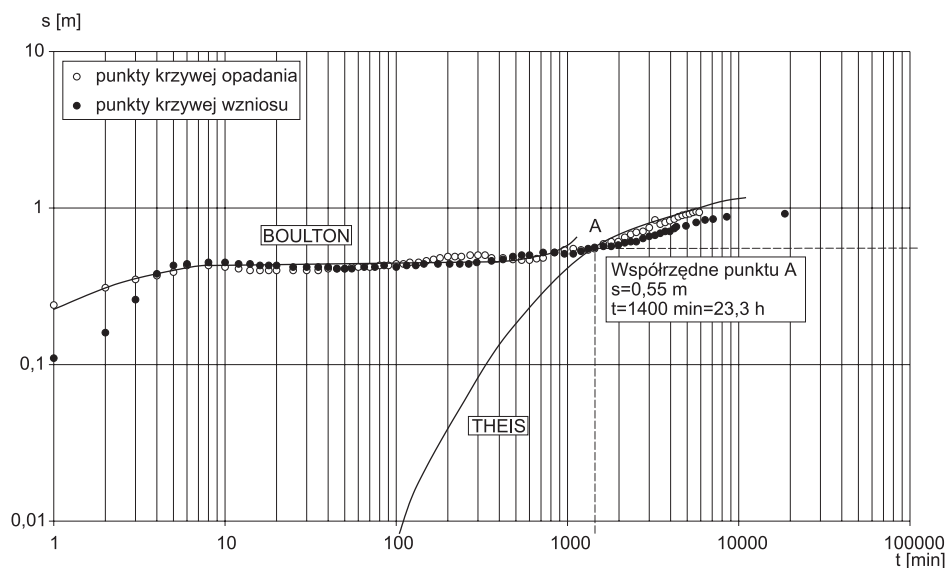
Tabela 5.11. Korekta depresji pomierzonej w pompowaniu hydrowęzłowym w związku ze swobodnym charakterem warstwy wodonośnej

Czas pompowania od startu		Piezometr nr	Odległość od studni [m]	Depresja (s) [m]	
minuty	godziny			obserwowana (a)	skorygowana (b)
360	6	PH-1	3,0	1,53	1,48
		OW-1	25,0	0,48	0,47
		OW-2	54,7	0,26	0,26
4200	70	PH-1	3,0	1,95	1,86
		OW-1	25,0	0,85	0,83
		OW-2	54,7	0,41	0,41

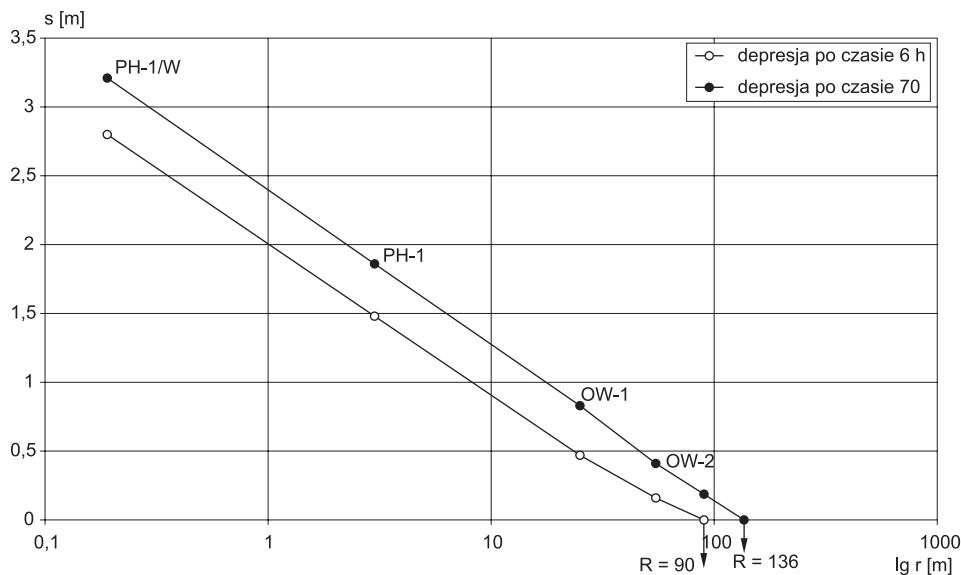
nia korekcyjne zestawiono w tabeli 5.10. Dane odczytane z wykresów ( $\Delta s$ ,  $R$ ) oraz obliczone parametry ( $k$ ,  $m$ ,  $T$ ) metodą Theisa-Jacoba podano w tabeli 5.10.

Po zakończonym pompowaniu przeprowadzono pomiary wzniosu zwierciadła wody we wszystkich badanych otworach. Odnotowano bardzo szybką odbudowę naporu hydrodynamicznego w centrum lejka depresji. Po jednej godzinie od zakończenia pompowania w otworze obserwacyjnym OW-1, odległym o 25 m od pompowanej studni, nastąpił przyrost wysokości zwierciadła wody o 0,42 m, a więc o wielkość odpowiadającą depresji, która powstała w otworze OW-1 tuż po rozpoczęciu pompowania (porównaj wykres na rys. 5.32).

Wyniki pomiarów wzniosu zwierciadła wody w piezometrze OW-1 wykorzystano dla sporządzenia wykresów kontrolnych w stosunku do wykresów opadania



Rys. 5.33. Analiza parametryczna przyrostu depresji w otworze obserwacyjnym OW-1 metodą krzywych wzorcowych Boultona



Rys. 5.34. Analiza parametryczna krzywych leja depresji na wykresie  $s = f(\lg r)$  dla wschodniego promienia hydrowęzła badawczego w kolejnych momentach czasowych:  $t_1 = 6$  h,  $t_2 = 70$  h. Odległość otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego PH-1/W: PH-1 – 3,0 m, OW-1 – 25,0 m, OW-2 – 54,7 m

zwierciadła wody w pompowaniu, nanosząc odpowiednio: na rysunku 5.32 –  $s' = f(\lg t')$ , na rysunku 5.33 –  $\lg s' = \lg t'$ . Dla wyznaczenia depresji  $s'$  – przyrostu słupa wody w otworze – naliczono jego wielkość w stosunku do poziomu dynamicznego zwierciadła wody zmierzonego przy końcu pompowania.

#### Podsumowanie wyników badań

Formacja kalkarenitów Gargaresh cechuje się podwójną porowatością osadów wyrażoną jakościowo przez obserwacje pobranych z wierzeń rdzeni skalnych (Grzelewski i in., 1989) i ilościowo na drodze interpretacji wyników próbnego pompowania hydrowęzłowego (Przybyłek, 2002). Pierwsze fazy tego pompowania (rys. 5.32) ujawniły niskie wielkości współczynnika odsączalności ( $\mu < 0,06$ ) związane z lokalną porowatością szczelinową i mikrokrasem; faza końcowa, która nastąpiła po 20 godzinach pompowania i trwała do jego końca, przebiegała już przy odsączalności znacznie wyższej ( $\mu = 0,19-0,26$ ), związanej z całkowitą porowatością masywu kalkarenitowego reprezentowaną w przewodzie przez porowatość międzyziarnową. Przeprowadzone na podstawie próbnego pompowania obliczenia współczynnika filtracji według różnych metod wykazują niewielki rozrzut wartości (tab. 5.10).

## 6. METODY INTERPRETACJI WYNIKÓW PRÓBNYCH POMPowań W WARSTWACH WODONOŚNYCH OGRANICZONYCH JEDNOSTRONNIE

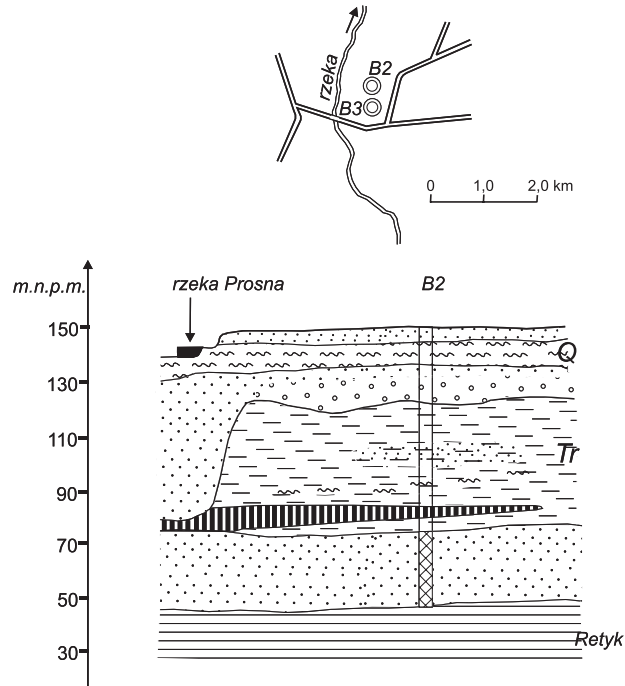
W celu zaprezentowania oddziaływania granic warstw wodonośnych (por. rozdz. 2.5) podamy dwa przykłady próbných pompowań. Pierwszym przykładem jest pompowanie z warstwy piasków mioceńskich w pobliżu strefy jej drenażu regionalnego wzdłuż głębokiej doliny Proсны w rejonie Wieruszowa – granica zasilająca ( $H = \text{const}$ ). Drugim – pompowanie z warstwy opisywanych już piasków kościeliskich doggeru w rejonie Wielunia (por. rozdz. 5.1) w pobliżu strefy uskoku tektonicznego: granica strukturalna – szczelna ( $Q = 0$ ).

Chcemy przy tym zwrócić uwagę na trzy zagadnienia:

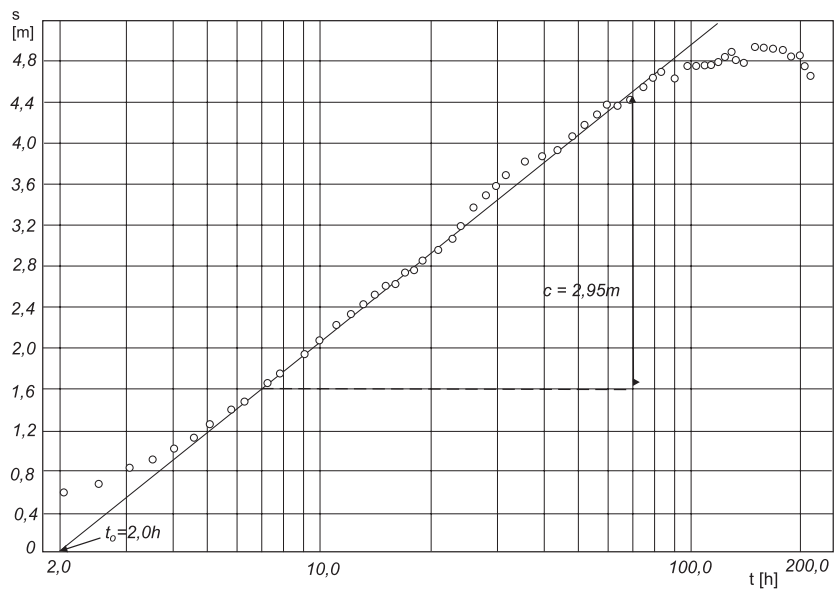
- 1) że można do czasu pojawienia się wpływu danej granicy rozpatrywać i analizować przebieg zjawisk w pompowaniu jak dla warstwy nieograniczonej, identyfikując wykres  $\lg s = f(\lg t)$ ;
- 2) że po uzyskaniu stabilizacji dynamicznego zwierciadła wody w pompowaniu można wykorzystać obserwacje wzniosu po zakończeniu pompowania do obliczeń parametrów filtracyjnych;
- 3) że na podstawie wykresu doświadczalnego  $\lg s = f(\lg t)$ , na którym ujawnił się wpływ granicy szczelnej, można obliczyć odległość do tej granicy oraz parametry filtracyjne warstwy wodonośnej, korzystając z nomogramu na planszy V lub specjalnych programów.

### 6.1. Warstwa wodonośna z granicą zasilania

Warstwa mioceńska w rejonie Wieruszowa występuje na głębokości 85–116 m p.p.t. Nadkład warstwy wodonośnej stanowią mułki i ily górnego miocenu i pliocenu o miąższości prawie 50 m, a podłoże – iłowce retyku (rys. 6.1). W tych warunkach zarówno nadkład, jak i podłoże warstwy wodonośnej w rejonie ujęcia, można uznać praktycznie za szczelne. Próbne pompowanie wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Łodzi w 1972 r. Prowadząca badania: Irena Chęcińska. Hydrowęzeł składał się z dwóch otworów B2 i B3 (rys. 6.1). Otwór B2 pompowano z wydajnością 70 m<sup>3</sup>/h przez 217 h, a obserwowano w tym czasie opadanie zwierciadła wody w otworze pompowanym i w otworze B3. Wyniki obserwacji w otworze B3 podano w tabeli 6.1 i w formie wykresu na rysunku 6.2. Wykres ten można podzielić na odcinki: (1) gdy  $u < 0,1$ , przebieg zjawiska nie podlega wówczas przybliżeniu logarytmicznemu, (2) gdy wykres doświadczalny można przedstawić prostą odpo-



Rys. 6.1. Szkic sytuacyjny hydrowęzła oraz schemat budowy geologicznej rejonu Wieruszowa. Odległość pomiędzy otworami B2 i B3 wynosi 375 m



Rys. 6.2. Wykres  $s = f(\lg t)$  dla otworu B3 (warstwa piasków miocenijskich w rejonie Wieruszowa). Po 90 godz. pompowania widać wpływ granicy zasilającej ( $H = \text{const}$ ) sąsiedztwo poligenetycznej doliny rzeki Prosny

Tabela 6.1. Opadanie zwierciadła wody w otworze B3 podczas pompowania otworu B2 z  $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 30.08–8.09.1972

t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]
0,25	0,02	6,2	1,46	23	3,05	58	4,30	120	4,75
0,33	0,03	6,7	1,56	24	3,16	60	4,34	124	4,79
0,42	0,05	7,2	1,64	26	3,34	62	4,35	128	4,84
0,50	0,08	7,7	1,72	28	3,45	64	4,32	132	4,88
0,67	0,14	9,0	1,92	30	3,55	66	4,32	136	4,76
0,83	0,19	10,0	2,05	32	3,66	68	4,32	140	4,76
1,00	0,24	11,0	2,20	34	3,70	70	4,37	148	4,90
1,25	0,33	12,0	2,32	36	3,79	72	4,44	156	4,92
1,50	0,40	13,0	2,40	38	3,82	76	4,51	164	4,77
1,75	0,47	14,0	2,50	40	3,84	80	4,60	172	4,87
2,00	0,59	15,0	2,58	42	3,87	84	4,65	180	4,87
2,50	0,65	16,0	2,60	44	3,90	92	4,60	188	4,8
3,00	0,81	17,0	2,70	46	3,95	96	4,65	196	4,85
3,50	0,90	18,0	2,77	48	4,02	100	4,73	204	4,73
4,00	1,01	19,0	2,81	50	4,10	104	4,74	217	4,62
4,50	1,12	20,0	2,87	52	4,15	108	4,75		
5,00	1,24	21,0	2,93	54	4,20	112	4,73		
5,70	1,37	22,0	3,00	56	4,25	116	4,65		

wiadającą, (3) gdy punkty wykresu doświadczalnego zaczynają się odchyłać i układają na odcinku równoległym do osi czasu, obrazującym stabilizację dynamicznego zwierciadła wody.

Uzyskanie stabilizacji dynamicznego zwierciadła wody w postaci przedstawionej na rysunku 6.2 wskazuje na rozcięcie łąk poznańskich w obrębie doliny Prosnicy i stworzenie od strony Prosnicy warunków granicy zasilającej ( $H = \text{const}$ ) dla warstwy mioceńskiej. Dla prostej odpowiadającej, podanej na rysunku 6.2, wyznaczono współczynnik kierunkowy  $c = 2,95 \text{ m}$  oraz  $t_0 = 2,0 \text{ h}$ .

Obliczenie parametrów według wzorów [5.5] i [5.6] :

– przewodność warstwy:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 70}{2,95} = 4,34 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{2,25Tt_0}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 4,34 \cdot 2}{375^2} = 0,00014,$$

– współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{4,34}{0,00014} = 31000 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{m} = \frac{4,34}{31} = 0,14 \text{ m/h}.$$

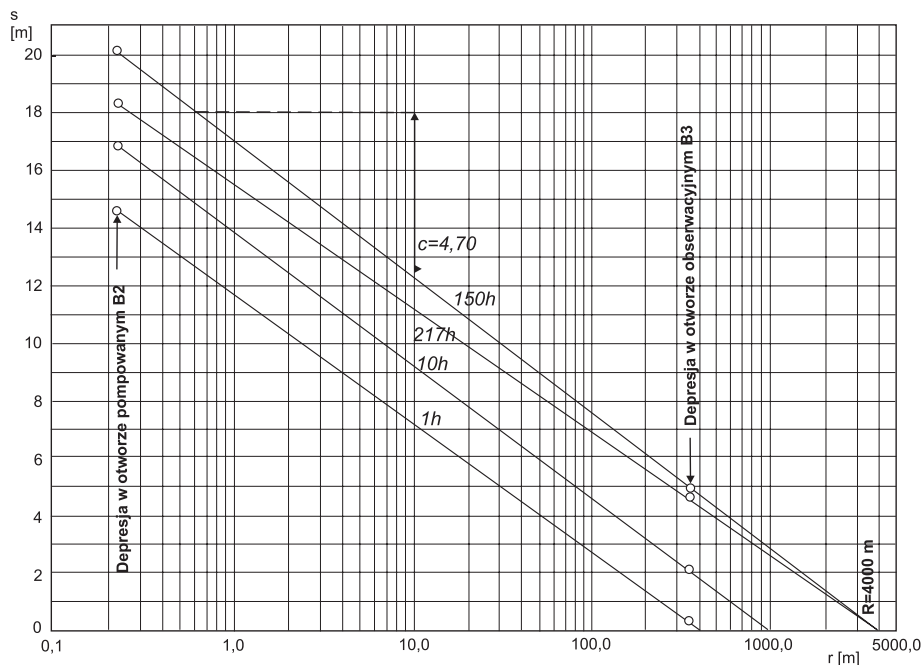
**Zasięg leja depresji.** Według wzoru [2.27] dla czasu  $t = 150 \text{ h}$  uzyskano stabilizację dynamicznego zwierciadła wody (patrz tab. 6.1 oraz rys. 6.2):  $R = 1,5\sqrt{a \cdot t} = 1,5\sqrt{31000 \cdot 150} = 3225 \text{ m}$ .

Na rysunku 6.3 przedstawiono profile leja depresji w postaci wykresów  $s = f(\lg r)$  w kolejnych momentach trwania pompowania:

$t_1 = 1 \text{ h}$	$s_0 = 14,51 \text{ m}$	$s_1 = 0,24 \text{ m}$	$R = 400 \text{ m}$ ,
$t_2 = 10 \text{ h}$	$s_0 = 16,90 \text{ m}$	$s_1 = 2,05 \text{ m}$	$R = 1000 \text{ m}$ ,
$t_3 = 150 \text{ h}$	$s_0 = 20,20 \text{ m}$	$s_1 = 4,90 \text{ m}$	$R = 3900 \text{ m}$ ,
$t_4 = 271 \text{ h}$	$s_0 = 18,42 \text{ m}$	$s_1 = 4,62 \text{ m}$	$R = 3900 \text{ m}$ ,

( $s_0$  – depresja w otworze pompowanym B2,  $s_1$  – depresja w otworze obserwacyjnym B3).

Dla stanu  $t_3 = 150 \text{ h}$  współczynnik kierunkowy wynosi  $c = 4,70$ , a zasięg leja depresji  $R = 3900 \text{ m}$ .



Rys. 6.3. Wykresy  $s = f(\lg r)$ , warstwa piasków miocénskich w rejonie Wieruszowa

Obliczenia parametrów według wzorów [5.13] i [5.14] :

$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 70}{4,70} = 5,45 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$a = 0,445 \frac{R^2}{t} = 0,445 \frac{3900^2}{150} = 45123 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{T}{a} = \frac{5,45}{45123} = 0,00012.$$

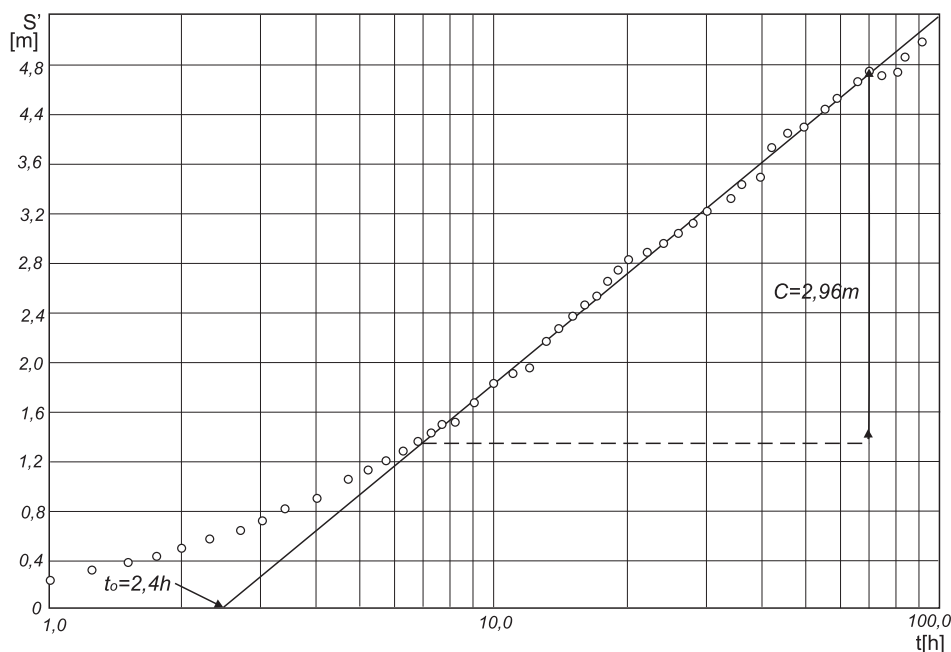
Rysunek 6.4 przedstawia wznios zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym B3. Wykres ten jest skonstruowany w postaci zależności  $s' = f(\lg t)$ , przy czym  $s'$  jest wielkością przyrostu słupa wody w otworze naliczaną w stosunku do stanu wyjściowego, którym jest zwierciadło dynamiczne przy końcu pompowania (tab. 6.2). Taka konstrukcja wykresu wzniosu pozwala (rozd. 2.4.2.2) obliczyć oprócz przewodności warstwy współczynnik odsączalności sprężystej, który w tym przypadku można nazwać współczynnikiem magazynowania.

Obliczenia parametrów według wzorów [5.5] i [5.6]:

Dane z wykresu:  $c = 2,96 \text{ m}$ ,  $t_0 = 2,4 \text{ h}$ ,  $r = 375 \text{ m}$

– przewodność:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 70}{2,96} = 4,33 \text{ m}^2/\text{h},$$



Rys. 6.4. Wykres  $s = f(\lg t)$  wzniosu zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym B3 po próbnym pompowaniu otworu B2 (warstwa piasków mioceńskich w rejonie Wieruszowa)

Tabela 6.2. Wznios zwierciadła wody w otworze B3 po próbnym pompowaniu otworu B2 z  $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ 

$t$ [h]	$s$ [m]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$s'$ [m]
0,00	4,62	0,00	7,2	3,21	1,41	34	1,33	3,29
0,17	4,61	0,01	7,6	3,15	1,47	36	1,22	3,40
0,25	4,59	0,03	8,2	3,13	1,49	38	1,18	3,44
0,33	4,57	0,05	9,0	2,97	1,65	40	1,15	3,47
0,42	4,55	0,07	10,0	2,90	1,72	42	0,91	3,71
0,50	4,52	0,10	11,0	2,82	1,80	44	0,84	3,78
0,75	4,45	0,17	12,0	2,68	1,94	46	0,79	3,83
1,00	4,39	0,23	13,0	2,46	2,16	48	0,78	3,84
1,25	4,31	0,31	14,0	2,35	2,27	50	0,76	3,86
1,50	4,24	0,38	15,0	2,27	2,35	52	0,72	3,90
1,75	4,18	0,44	16,0	2,17	2,45	54	0,67	3,95
2,00	4,12	0,50	17,0	2,10	2,52	56	0,62	4,00
2,33	4,05	0,57	18,0	1,97	2,65	58	0,58	4,04
2,67	3,98	0,64	19,0	1,88	2,74	60	0,51	4,11
3,00	3,90	0,72	20,0	1,81	2,81	62	0,44	4,18
3,40	3,82	0,80	21,0	1,78	2,84	64	0,38	4,24
4,00	3,73	0,88	22,0	1,76	2,86	66	0,34	4,28
4,20	3,68	0,94	23,0	1,71	2,91	70	0,29	4,33
4,70	3,58	1,04	24,0	1,68	2,94	76	0,35	4,27
5,20	3,50	1,12	26,0	1,60	3,02	80	0,31	4,31
5,70	3,43	1,19	28,0	1,52	3,10	84	0,20	4,42
6,20	3,35	1,27	30,0	1,43	3,19	92	0,06	4,56
6,70	3,27	1,35	32,0	1,37	3,25			

– współczynnik zasobności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{2,25Tt_0}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 4,33 \cdot 2,4}{375^2} = 0,00017.$$

Ostatni wykres sporządzony na podstawie wyników pompowania w rejonie Wieruszowa (rys. 6.5) dotyczy wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym. Wykres sporządzono na podstawie danych zestawionych w tabeli 6.3, nanosząc na osi rzędnych głębokości do zwierciadła wody, a nie wielkości depresji, ponieważ nie wyznacza się w tym przypadku wartości  $t_0$ .

Obliczenie przewodności warstwy według wzoru [5.5] dla  $c = 3,20 \text{ m}$ :

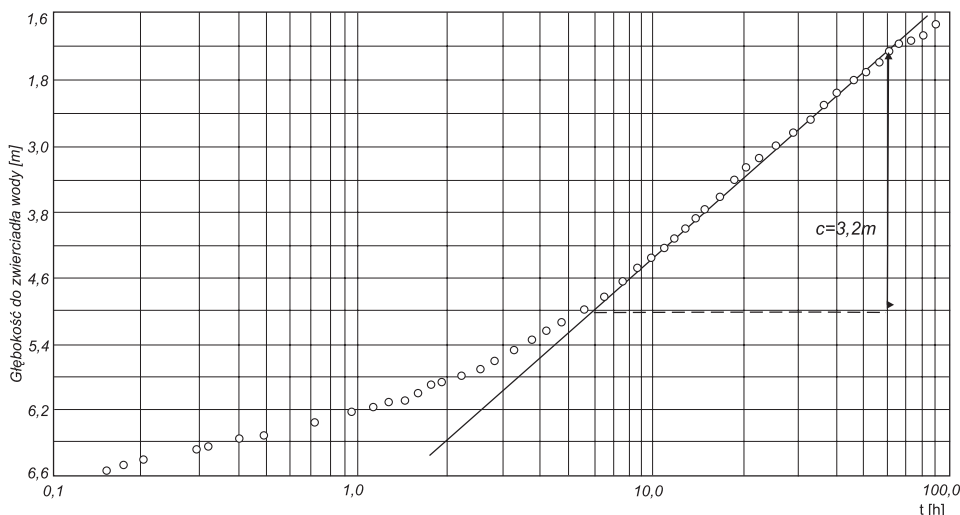
$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 70}{3,20} = 4,00 \text{ m}^2/\text{h}.$$



Tabela 6.3. Wznios zwierciadła wody w pompowanym otworze B2 po zakończeniu pompowania z  $Q = 70 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ 

t [min]	t [h]	Zw [m]	t [h]	Zw [m]	t [h]	Zw [m]
0,0	0,000	19,47	1,67	5,61	19	2,99
1	0,017	13,75	1,83	5,49	20	2,91
2	0,033	10,23	2,00	5,47	21	2,85
3	0,050	8,53	2,17	5,43	22	2,77
4	0,067	7,60	2,33	5,40	23	2,75
5	0,080	7,05	2,50	5,35	24	2,70
6	0,100	6,85	2,67	5,31	26	2,59
7	0,117	6,72	2,83	5,06	28	2,52
8	0,133	6,65	3,00	5,21	30	2,43
9	0,150	6,55	3,25	5,14	32	2,38
10	0,170	6,50	3,50	5,08	34	2,30
12	0,200	6,42	3,75	5,00	36	2,24
14	0,230	6,38	4,00	4,97	38	2,12
16	0,270	6,36	4,25	4,92	40	2,00
18	0,300	6,29	4,50	4,86	42	1,96
20	0,330	6,26	4,75	4,80	44	1,90
22	0,370	6,26	5,00	4,75	46	1,83
24	0,400	6,19	5,50	4,68	48	1,80
26	0,430	6,17	6,00	4,58	50	1,78
28	0,470	6,14	6,50	4,50	52	1,73
30	0,500	6,12	7,00	4,41	54	1,69
35	0,580	6,06	7,50	4,33	56	1,65
40	0,670	6,02	8,00	4,24	58	1,60
45	0,750	5,96	9,00	4,09	60	1,50
50	0,830	5,93	10,00	3,97	62	1,47
55	0,920	5,89	11,00	3,85	64	1,40
60	1,000	5,85	12,00	3,73	68	1,36
70	1,170	5,78	13,00	3,61	72	1,33
80	1,330	5,72	14,00	3,47	80	1,31
90	1,500	5,69	15,00	3,38	92	1,12
			16,00	3,30	100	1,10
			17,00	3,20	104	1,10
			18,00	3,15	108	1,03

Zw – głębokość do zwierciadła wody od kryzy rury cembrowej.



Rys. 6.5. Wykres wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym B2 (warstwa piasków mioceńskich w rejonie Wieruszowa)

A oto zestawienie parametrów warstwy wodonośnej obliczonych z różnych wykresów:

- z opadania wg metody Theisa-Jacoba (rys. 6.2):  
 $T = 4,3 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $\mu_s = 0,00014$ ,  $R_{150} = 3225 \text{ m}$
- z profilu depresji wg metody Dupuita-Thiema (rys. 6.3):  
 $T = 5,45 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $\mu_s = 0,00012$ ,  $R = 3900 \text{ m}$ ;
- ze wzniosu wg metody Theisa-Jacoba w otworze obserwacyjnym (rys. 6.4):  
 $T = 4,33 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $\mu_s = 0,00017$ ;
- w otworze pompowanym (rys. 6.5):  
 $T = 4,00 \text{ m}^2/\text{h}$ .

## 6.2. Warstwa wodonośna z granicą szczelną

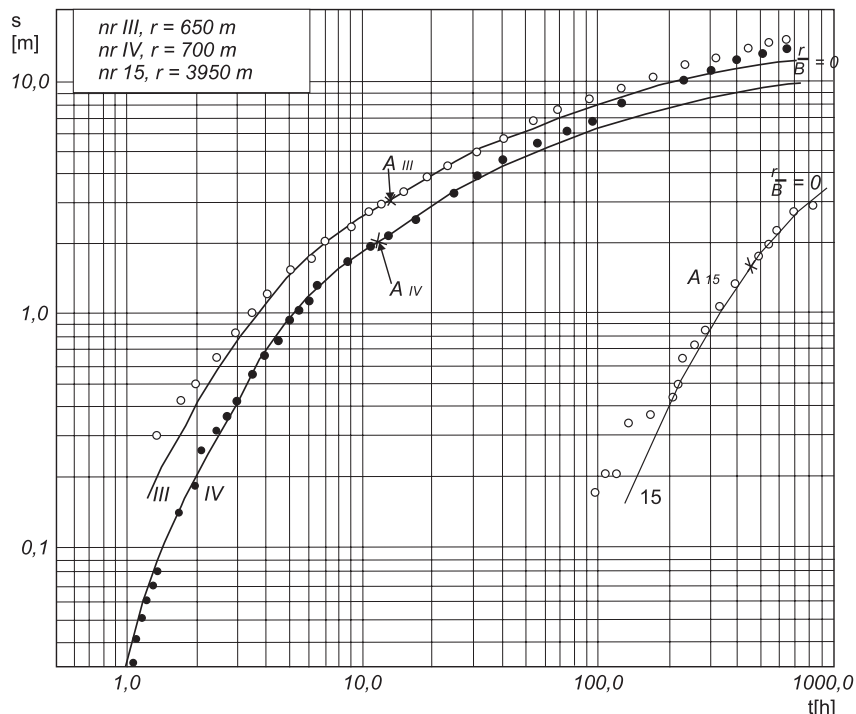
Przedmiotem analizy jest warstwa piaskowców kościeliskich doggeru, opisywana już w rozdziale 5.1. Jest to warstwa wodonośna, która ze względu na szczelność nadkładu i podłoża spełnia idealnie warunki opisane schematem Theisa (por. rys. 5.3).

Latem 1972 r. Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne w Łodzi przeprowadziło prawie miesięczne pompowanie otworu I. Prowadząca badania: Jadwiga Strumiłło. Pompowano otwór I z wydajnością  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ , obserwując dwa otwory: III –  $r = 650 \text{ m}$  i IV –  $r = 700 \text{ m}$ , oraz otwór 15 w Kamionce w odległości  $r = 3950 \text{ m}$  od otworu pompowanego. Wyniki obserwacji zestawiono w tabeli 6.4.

Na podstawie uzyskanych obserwacji sporządzono wykresy doświadczalne  $\lg s = f(\lg t)$  w interpretacji według wzoru ogólnego Theisa (rys. 6.6) i według no-

Tabela 6.4. Opadanie zwierciadła wody w otworach IV i 15 podczas pompowania otworu I z  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ 

otwór IV, $r = 700 \text{ m}$						otwór 15, $r = 3950 \text{ m}$	
$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]
1,00	0,01	31	3,88	173	8,86	88	0,03
1,25	0,05	33	4,01	181	8,99	98	0,17
1,50	0,08	35	4,15	189	9,14	122	0,20
1,75	0,13	37	4,28	197	9,46	146	0,34
2,00	0,17	39	4,49	205	9,43	170	0,36
2,25	0,25	41	4,71	213	9,77	194	0,39
2,50	0,30	43	4,79	221	9,82	218	0,49
2,75	0,35	45	4,92	229	9,98	242	0,63
3,00	0,41	47	4,94	237	10,11	266	0,75
3,50	0,53	51	5,16	245	10,13	290	0,83
4,00	0,64	55	5,44	253	10,35	314	0,91
4,50	0,74	59	5,56	261	10,46	338	1,08
5,00	0,90	63	5,80	269	10,57	362	1,23
6,00	1,11	67	5,96	277	10,63	386	1,35
7,00	1,35	71	6,13	293	10,74	410	1,47
8,00	1,42	77	6,26	309	11,04	434	1,35
9,00	1,63	81	6,32	325	11,29	458	1,65
10,00	1,72	85	6,51	341	11,51	482	1,63
11,00	1,92	89	6,63	357	11,76	506	1,79
12,00	2,07	93	6,80	373	12,24	530	1,95
13,00	2,16	97	6,96	389	12,31	566	2,20
14,00	2,29	101	7,12	405	12,63	590	2,32
15,00	2,40	105	7,23	429	12,44	708	2,78
16,00	2,50	109	7,29	453	12,60	712	2,73
17,00	2,65	113	7,35	477	12,75		
19,00	2,84	117	7,64	501	12,94		
20,00	3,09	121	7,76	525	13,38		
22,00	3,17	129	7,97	549	13,09		
24,00	3,29	137	8,17	573	13,22		
25,00	3,48	149	8,43	597	13,45		
27,00	3,52	157	8,48	621	13,57		
29,00	3,69	165	8,84	645	13,80		



Rys. 6.6. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów III, IV, 15. Interpretacja według metody Theisa (warstwa piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia)

mogramu funkcji z granicą  $\Phi\left(u, \frac{r}{d}\right)$  z planisy V (rys. 6.7). Na rysunku 6.8 przedstawiono wykresy profilu lejka depresyjnego w postaci funkcji  $s = f(\lg r)$  dla kolejnych momentów czasu pompowania:  $t_1 = 1$  h,  $t_2 = 10$  h,  $t_3 = 50$  h,  $t_4 = 70$  h,  $t_5 = 200$  h,  $t_6 = 400$  h,  $t_7 = 650$  h.

**Interpretacja wykresów**

Wykresy doświadczalne  $\lg s = f(\lg t)$  z obserwacji w otworach III i IV (rys. 6.6) są zgodne w pierwszym okresie pompowania z krzywą wzorcową Theisa  $\frac{r}{B} = 0$  i dopiero po kilkudziesięciu godzinach pompowania odchylają się w górę od niej.

Dla odcinków zgodności wykresów obrano punkty arbitralne i odczytano ich współrzędne z wykresu doświadczalnego i wzorcowego.

**Obliczenia parametryczne**

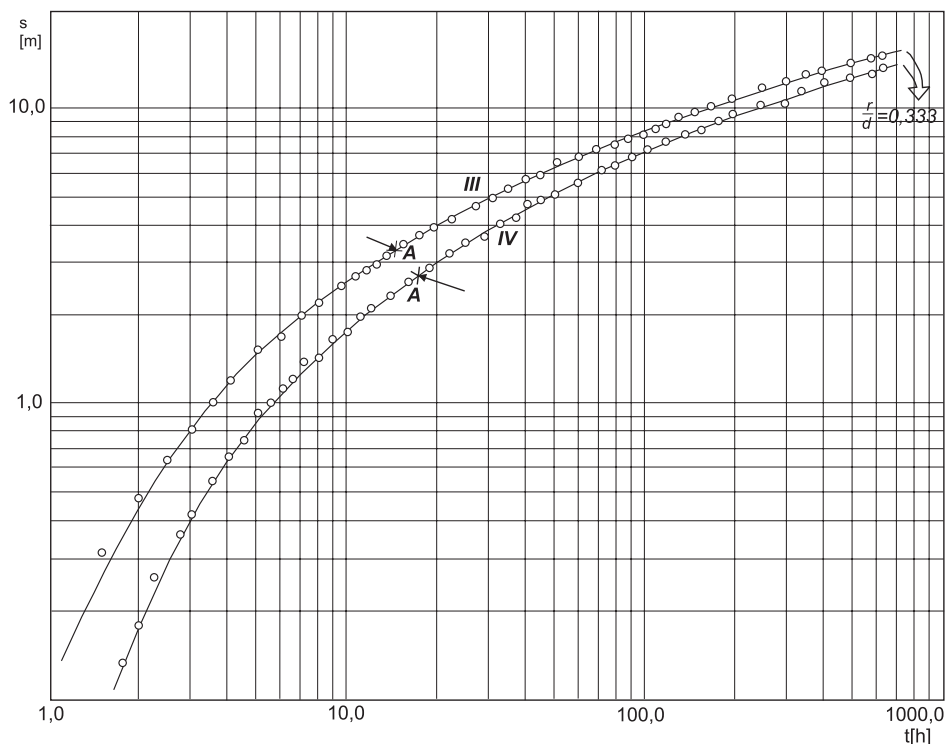
Otwór III,  $r = 650$  m.

Współrzędne punktu arbitralnego  $A_{III}$ :

$s = 3,0$ ,  $t = 13$  h,  $E(z) = 0,1$ ,  $z = 1,3$ ,

– przewodność:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{118}{3} \cdot 0,1 = 3,93 \text{ m}^2/\text{h},$$



Rys. 6.7. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów III i IV. Interpretacja według metody Theisa z granicą nieprzepuszczalną (warstwa piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia)

- współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{3,93 \cdot 13}{650^2 \cdot 1,3} = 0,000093,$$

- współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{zr^2}{t} = \frac{1,3 \cdot 650^2}{13} = 42250 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Otwór IV,  $r = 700 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego  $A_{IV}$ :

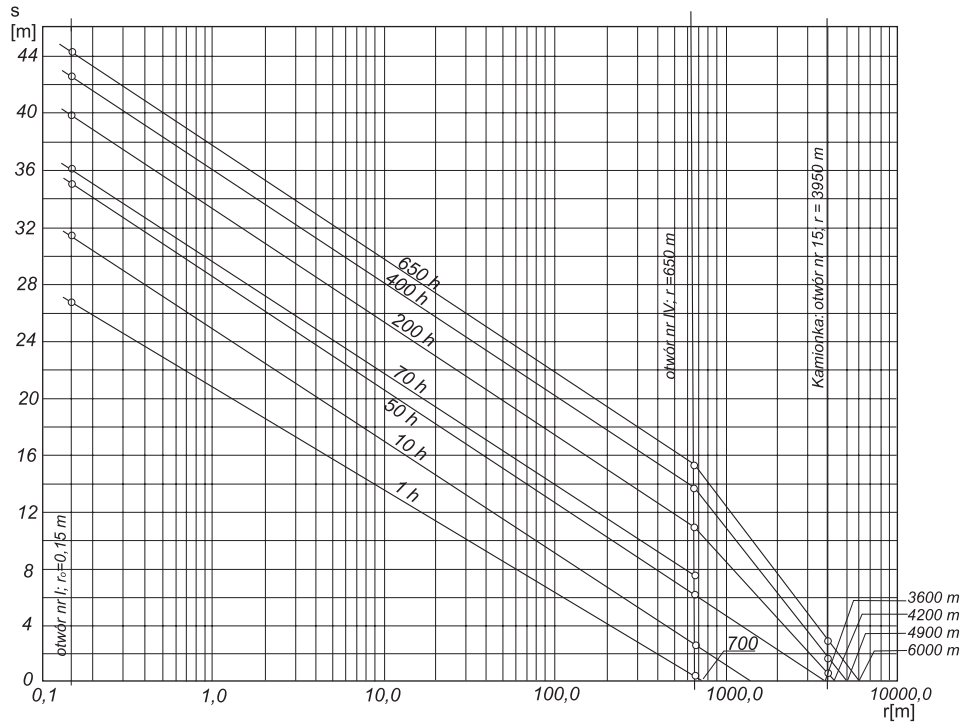
$s = 2,05 \text{ m}$ ,  $t = 12 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,076$ ,  $z = 0,9$ ,

- przewodność:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{118}{2,05} \cdot 0,076 = 4,37 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{4,37 \cdot 12}{700^2 \cdot 0,9} = 0,000119,$$



Rys. 6.8. Wykresy  $s = f(\lg r)$  w czasie rozwoju lejki depresyjnego (warstwa piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia)

– współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{zr^2}{t} = \frac{0,9 \cdot 700^2}{12} = 36750 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Nieco odmiennie wygląda interpretacja wykresu doświadczalnego  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu 15 w Kamionce i dlatego powrócimy do tego problemu po przeanalizowaniu wpływu granicy strukturalnej na przebieg wykresów dłuższego próbnego pompowania.

Odchylenia wykresów doświadczalnych powyżej krzywej Theisa są dowodem na występowanie w strefie objętej lejkiem depresyjnym bocznej granicy szczelnej. Porównując krzywe doświadczalne z wykresami wzorcowym na planszy V, zidentyfikowano je jako wykresy  $\frac{r}{d} = 0,333$ . Pozwala to (przy znanym  $r$ ) na obliczenie odległości  $d$  do granicy szczelnej:

$$\text{dla } r = 700, d = \frac{r}{0,333} = \frac{700}{0,333} = 2102 \text{ m}.$$

Na mapie geologicznej (rys. 5.3) stwierdzono w tej odległości uskoki o zrzucie 450 m, który stanowi granicę obszaru filtracji.

Powróćmy teraz do obserwacji otworu 15 w Kamionce. Otwór ten zareagował dopiero po 88 h pompowania (por. tab. 6.4), gdy już zaczął się zaznaczać na wykresach w bliskich otworach obserwacyjnych wpływ uskoku tektonicznego jako granicy szczelnej. W związku z tym, zgodnie z zasadą odbić zwierciadlanych Ferrisa, na zwierciadło wody w otworze w Kamionce działa nie tylko studnia rzeczywista, ale i jej fikcyjne odbicie zwierciadlane względem granicy nieprzepuszczalnej (por. rozdz. 2.5). Tak więc przyrost depresji w Kamionce jest wywołany parą współdziałających otworów o wydajności łącznej dwukrotnie większej od wydajności rzeczywistej. Dlatego też w obliczeniach przewodności należało podstawić do wzoru podwójną wydajność  $Q = Q_I = Q_{I'} = 118 + 118 = 236 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Obliczenia:

Odległość otworu 15 w Kamionce  $r = 3950 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego  $A_{15}$ :

$s = 1,65 \text{ m}$ ,  $t = 460 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,03$ ,  $z = 0,35$ ,

– przewodność:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{236}{1,65} \cdot 0,3 = 4,29 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{4,29 \cdot 460}{3950^2 \cdot 0,35} = 0,000126,$$

– współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{zr^2}{t} = \frac{0,35 \cdot 2950^2}{460} = 33918 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Porównanie obliczonych parametrów (w tym również pompowanie otworu III z rozdziału 5.1) przedstawiono w tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Zestawienie porównawcze obliczonych parametrów dla warstwy piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia

Otwór pompowany	Q [m <sup>3</sup> /h]	t <sub>p</sub> [h]	Otwór obserwacyjny	T [m <sup>2</sup> /h]	μ <sub>s</sub> [ - ]	a [m <sup>2</sup> /h]
III	110	72	I	3,96	0,000102	37730
I	118	645	III	3,93	0,000093	42250
			IV	4,37	0,000119	36750
			15	4,29	0,000126	33918

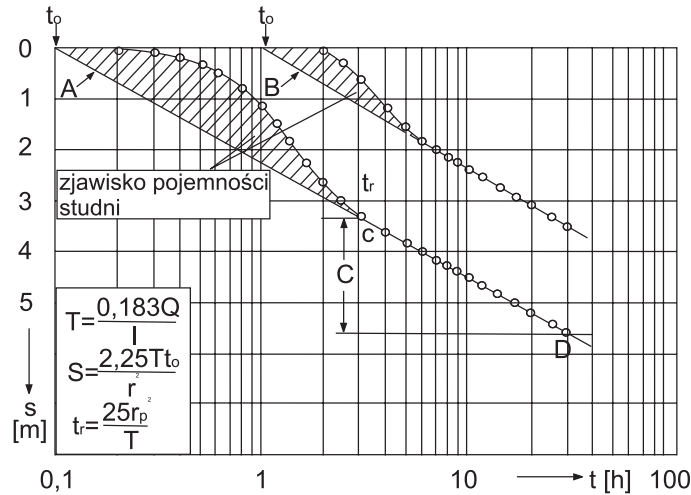
## **7. ZASADY INTERPRETACJI WYNIKÓW POMPOWAŃ PROWADZONYCH W POJEDYNCZYCH OTWORACH**

W poprzednich rozdziałach poradnika przedstawiono zasady interpretacji wyników próbnych pompowań w hydrowęzłach, które przeprowadza się dla szczegółowego określenia parametrów hydrogeologicznych i granic warstw wodonośnych. Większość jednak próbnych pompowań wykonuje się w pojedynczych otworach studziennych. Prowadzone obserwacje w hydrowęzłach, zarówno w otworach pompowanych, jak i obserwacyjnych, wykazują, że wyniki badań filtracji nieustalonej w pojedynczych otworach (otwory eksploatacyjne hydrowęzłów) mogą być również z powodzeniem wykorzystywane do wyznaczenia parametrów przewodności i współczynnika filtracji, a także rozpoznania charakteru granic badanej warstwy. Jednak wyniki obserwacji prowadzone w otworach pompowanych są w początkowych okresach opadania i wzniosu zakłócone pojemnością studni, zeskokiem hydraulicznym na filtrze oraz wahaniami w wydajności pompowania. Poniżej przedstawia się te zagadnienia w nawiązaniu do interpretacji obliczeniowej, podanej już w rozdziałach 5 i 6. Czyni się to w tym celu, aby umożliwić czytelnikowi porównanie uzyskanych wyników obliczeń w otworach obserwacyjnych hydrowęzła (rozd. 5 i 6) z interpretacją dokonaną na podstawie pomiarów zwierciadła wody bezpośrednio w otworze pompowanym hydrowęzła.

### **7.1. Wpływ pojemności studni na wyniki obserwacji opadania i wzniosu zwierciadła wody**

Deformacje na krzywych opadania i wzniosu zwierciadła wody spowodowane pojemnością studni pojawiają się na początku każdej z faz próbnego pompowania, a ich wielkość i czas trwania zależne są od wielkości wydatku. Na początku każdego pompowania część pompowanej wody pochodzi bezpośrednio ze studni bez udziału dopływu wody z warstwy wodonośnej. Udział wody z objętości studni w wydatku pompowania maleje stopniowo; jest najwyższy na początku jego trwania – w pierwszych minutach – i szybko zanika. Odwrotne zjawisko ma miejsce podczas wzniosu, gdy po zatrzymaniu pompowania następuje wypełnianie studni wodą. Zjawiska te, choć odwrotne, mają podobne charakterystyki hydrauliczne. Na wykresach próbnego pompowania objawiają się deformacje w początkowych okresach obserwacji, co przedstawiono na rysunku 7.1.





Rys. 7.1. Odzwierciedlenie na wykresach  $s = f(\lg t)$  zjawiska pojemności studni (A) i piezometru (B) (wg Forkasiewicz, 1973)

Według Forkasiewicz (1973) wzory używane do obliczeń mają błąd nie przewyższający 2%  $\left(\frac{\Delta s}{s} \leq 0,02\right)$  od momentu, kiedy czas pompowania jest dłuższy niż:

- w przypadku studni (A): 
$$t_p = \frac{25r_0^2}{T}$$
- w przypadku piezometrów (B): 
$$t_p = \frac{12,5r_0^2}{T} \left(\frac{s+s'}{s}\right)$$

gdzie:

$r_0$  – promień studni pompowanej lub piezometru,

$s$  – depresja w studni w czasie  $t_p$ ,

$s'$  – depresja w tym samym czasie w piezometrze,

stosunek  $\left(\frac{s+s'}{s}\right)$  dla piezometrów powinien być stały lub prawie stały.

Czas wpływu pojemności studni zależy od jej promienia i przewodności hydraulicznej warstwy, wydłuża się, gdy rośnie promień studni i maleje przewodność warstwy wodonośnej. W warunkach najczęściej spotykanych, przykładowo, gdy promień studni wynosi 0,15 m, a przewodność warstwy 10,0 m<sup>2</sup>/h i 5 m<sup>2</sup>/h, czas ten wynosi odpowiednio 0,5 min i 7 min. Mieści się on zwykle w czasie tworzenia się zeskoku, stąd trudno jest wydzielić na wykresach półlogarytmicznych wpływ tego czynnika. Na wspomnianych wykresach czynnik ten odzwierciedla się charakterystyczną wypukłością. W otworach obserwacyjnych wpływ pojemności odzwierciedla się zwykle tylko w otworach najbliższych położonych, w krótkim, początkowym czasie opadania i wzniosu zwierciadła wody.

## 7.2. Zeskok zwierciadła i jego określenie z krzywych opadania i wzniosu

### 7.2.1. Straty ciśnienia – zeskok zwierciadła wody w otworze pompowanym

Pompowane otwory wykazują istnienie na filtrach i w strefie przyotworowej zeskoków zwierciadła wody wynikłych z zakłóceń hydraulicznych w dopływie wody do studni z warstwy wodonośnej. Zeskok hydrauliczny powodowany jest przez szereg czynników, z których najważniejsze to:

- niezupełność ujęcia warstwy wodonośnej,
- zmiany zachodzące w wodoności w trakcie wiercenia wynikające z technologii jego wykonywania,
- złego doboru filtra i obsypki,
- z przekroczenia prędkości warunkujących zachowanie ruchu laminarnego, przy wysokiej wydajności pompowania.

Obserwowana od początku pompowania depresja  $s_c$  w studni ujmującej warstwę o zwierciadle napiętym, wynosi:

$$s_c = s_w + \Delta s$$

gdzie:

$s_w$  – teoretyczna depresja zwierciadła wody w warstwie wodonośnej dla studni zupełnej, która pozostaje w zależności od szeregu czynników, jak: wydajność pompowania, przewodność i zasobność warstwy wodonośnej, czas pompowania, a także od wpływu granic warstwy: przesiąkanie, granica szczelna – zasilająca,

$\Delta s = \Delta H_p$  – zeskok na filtrze (strata ciśnienia) związany z charakterem studni. Wyrażenie  $\Delta H_p$  rozłożyć można na dwie składowe:

$$\Delta H_p = BQ + CQ^2,$$

gdzie:

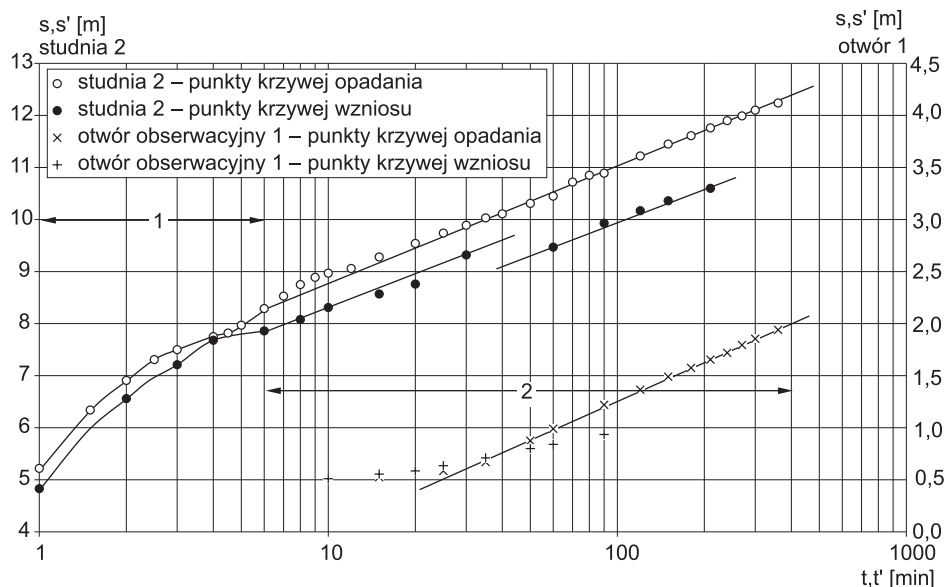
$BQ$  – liniowe straty ciśnienia (kolmatacja filtra i strefy przyfiltrowej),

$CQ^2$  – straty ciśnienia do potęgi kwadratowej wynikające z przekroczenia prędkości laminarnej,

stąd:

$$s_c = s_w + BQ + CQ^2$$

Przy prowadzeniu pompowania ze stałą wydajnością krzywa depresji zostaje przesunięta o pewną wielkość równą  $\Delta H_p$  w stosunku do krzywej depresji teoretycznej bez zmiany jej nachylenia (rys. 7.2). Stąd straty ciśnienia wywołane zeskokiem zaznaczają się tylko w studni pompowanej i są stałe w czasie dla danego wydatku.



Rys. 7.2. Wykresy  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$  z pompowania kontrolnego z wydajnością  $Q = 62,8 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  trwającego 6 h dla studni nr 2 w Wielichowie, ujmującej do eksploatacji warstwę naporową poziomą miocenijskiego na głębokości 83,0–90,0 m i 105,0–123,0 m i otworu obserwacyjnego nr 1 znajdującego się w odległości 126,3 m od pompowanej studni

1. krzywe podczas kształtowania się zeskoku hydraulicznego  $\Delta s = f(t, Q)$  w otworze pompowanym,
2. krzywe opadania i wzniosu przy ukształtowanym zeszkoku hydraulicznym  $\Delta s = \text{const}$  w otworze pompowanym

## 7.2.2. Określenie zeskoku zwierciadła wody

### 7.2.2.1. Analiza krzywej $s = f(\lg r)$

W przypadku pompowania hydrowęzła z 2–3 otworami obserwacyjnymi na promieniu i pompowania ze stałą wydajnością przez dłuższy czas, po uzyskaniu w obszarze filtracji quasi-ustalonej, wykres w skali półlogarytmicznej  $s = f(\lg r)$  odpowiada w jednorodnej warstwie linii prostej. Ekstrapolacja nachylenia wykresu do wartości promienia otworu pompowanego  $r_0$  pozwala określić depresję teoretyczną studni idealnej. Z różnicy depresji zmierzonej  $s_m$  w tworze i odczytanej teoretycznej  $s_t$  można określić wielkość zeskoku (straty ciśnienia) przy danej wydajności. Powyższych obliczeń można dokonywać również dla pompowań wielostopniowych przy dość długich okresach ich prowadzenia. Przykłady obliczeń zeskoku tą metodą podano na rysunku 5.24 zamieszczonym w rozdziale 5.

### 7.2.2.2. Analiza krzywych $s = f(\lg t)$ z pompowania studni

Dla studni pompowanych w warstwach wodonośnych, spełniających założenia schematu Theisa (rozdz. 5.1), zeskok zwierciadła wody można obliczyć z zależności:

$$\Delta s = s_m - s_t = s_m - \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u), \text{ gdzie } u = \frac{r_0^2 \cdot \mu_s}{4tT}, \quad [7.1]$$

gdzie:

$s_m$  – depresja zmierzona w czasie  $t$ ,

$s_t$  – depresja obliczona wg równania Theisa.

Gdy czas pompowania jest dość długi  $t > 10 \frac{r_0^2 \cdot \mu_s}{4T}$ , ważne jest przybliżenie Theisa-Jacoba i wówczas zeskok można obliczyć z zależności:

$$\Delta s = s_m - s_t = s_m - \frac{0,183 \cdot Q}{T} \cdot \lg \frac{2,25Tt}{r_0^2 \mu_s}. \quad [7.2]$$

Obliczenia te mogą być prowadzone, gdy posiada się z badań wcześniejszych dane o parametrach  $T$  i  $\mu_s$ . Parametr  $T$  można też obliczyć z interpretacji wyników metodą przybliżenia logarytmicznego z przeprowadzonego pompowania.

### 7.2.2.3. Analiza krzywej wzniosu $s' = f(\lg t')$

Duże podobieństwo, a czasami i identyczność krzywych wzniosu do krzywych opadania, pozwala wykorzystać je do analizy wielkości zeskoków w otworach pompowanych. Metodę tę wykorzystuje się przy braku znajomości statycznego zwierciadła wody lub określenia zeskoku dla studni ciągle eksploatowanej poprzez wykonywanie obserwacji wzniosu zwierciadła przez okres pozwalający na uzyskanie prostej przybliżenia logarytmicznego (najczęściej 15' do 1 h), gdy zostanie wyeliminowany wpływ pojemności studni.

Ze znajomości wzniosu zwierciadła wody w czasie  $t_i$  (już na prostej przybliżenia logarytmicznego) oraz parametrów  $T$  i  $\mu_s$  można obliczyć  $\Delta H_p = \Delta s$  (Forkasiewicz, 1973):

$$\Delta s = (H_i - H_0) - \frac{0,183Q}{T} \cdot \lg \frac{2,25T}{r_0^2 \mu_s} \cdot \frac{t_p \cdot t_i}{t_p + t_i}, \quad [7.3]$$

gdzie:

$H_0$  – zwierciadło wody w otworze przed zatrzymaniem pompowania,

$H_i$  – zwierciadło wody w otworze po czasie  $t_i$  wzniosu,

$t_p$  – czas pompowania.

Jeżeli czas pompowania  $t_p$  w stosunku do czasu  $t_i$  jest duży lub zwierciadło wody w otworze  $H_0$  było ustalone, równanie powyższe upraszcza się do wyrażenia:

$$\Delta s = (H_i - H_0) - \frac{0,183Q}{T} \cdot \lg \frac{2,25Tt_i}{r_0^2 \mu_s}. \quad [7.4]$$

Wielkość zeskoku z błędem nie przekraczającym 10% można również obliczyć z graficznej analizy krzywej wzniosu  $H, s' = f(\lg t')$  metodą kolejnych przybliżeń jego wielkości (Dąbrowski, 1993, Dąbrowski i in., 2004).

### 7.3. Zasady interpretacji filtracji nieustalanej z pompowań pojedynczych otworów

#### 7.3.1. Różnice między opadaniem i wzniosem zwierciadła wody w otworach pompowanych w porównaniu z otworami obserwacyjnymi

Efektom analizy wyników opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych było stwierdzenie dużej zbieżności w charakterze ujawniania się zmian zwierciadła wody na wykresach półlogarytmicznych przy prowadzeniu dłuższych pompowań przekraczających zwykle 1 dobę i więcej, zarówno dla opadania, jak i wzniosu zwierciadła. Podstawową różnicą, która występuje w otworach studziennych i piezometrach, jest ujawnienie się w tych pierwszych wpływu pojemności studni i zeskoku zwierciadła wody; ten drugi efekt często likwiduje lub ukrywa w swojej wielkości efekt pierwszy. Tego typu zjawisk zwykle nie obserwuje się przy otworach obserwacyjnych odległych powyżej 1,5 miąższości warstwy wodonośnej. Zjawiska, które dotyczą otworów studziennych i zakłócają postać sporządzonych wykresów  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$ , to:

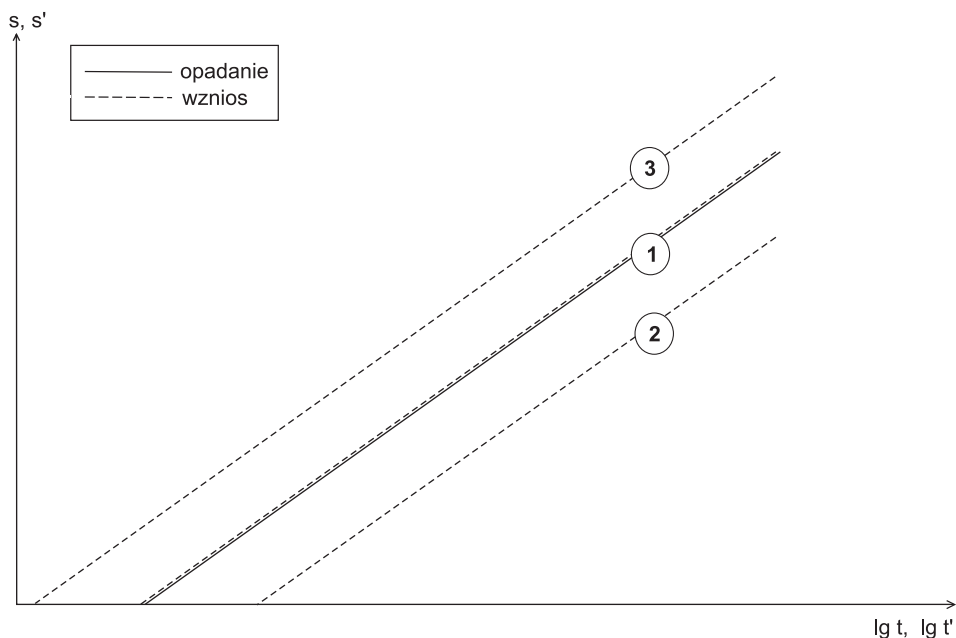
- uwidacznianie się krótkotrwałych zmian w wydatku pompowania i przerw w jego prowadzeniu, jak również mniejsza dokładność pomiarowa tych zmian,
- większe zmiany w strumieniu wokół studni na skutek wytworzenia większego zdepresjonowania,
- zmiany kierunków przepływu wody, istotnych zwłaszcza przy strumieniach o dużym spadku,
- większe zasilanie w pionie z warstw związanych, zarówno słabo przepuszczalnych, jak i wodonośnych.

Te ostatnie wpływy ujawniają się dopiero po ukształtowaniu się dopływu quasi-ustalonego w warstwie, co objawia się nachyleniem przebiegu wykresów  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$  dla studni prawie identycznym w stosunku do wykresów z otworów obserwacyjnych.

Największe rozbieżności wystąpią w układach warstw o największej rozbieżności granic. Od schematu szczelności warstwy naporowej w kierunku jej coraz większych związków z warstwami związanymi hydraulicznie, które stają się coraz bardziej swobodne.

Ma to istotny wpływ na ujawniające się różnice między opadaniem i wzniosem zwierciadła wody rejestrowanym na wykresach  $s = f(\lg t)$  oraz  $s' = f(\lg t')$ .

Generalnie na wykresach z długotrwałych pompowań można zaobserwować prawidłowości przedstawione na rysunku 7.3.



Rys. 7.3. Typowe relacje krzywych wzniosu względem krzywej opadania na wykresach półlogarytmicznych:

1. wykres wzniosu zwierciadła wody pokrywa się lub nieznacznie odbiega od krzywej opadania,
2. wykres wzniosu konsekwentnie przebiega poniżej krzywej opadania, niezależnie od wpływu granic bocznych (zasilania i szczelnych),
3. wykres wzniosu przebiega powyżej krzywej opadania, niezależnie od wpływów granic bocznych (zasilania i szczelnych)

W przypadku 1 mamy zwykle do czynienia z warstwą o szczelnym spągu i stopie o zasilaniu ze strumienia przepływającego w ujętej warstwie wodonośnej i zasobności sprężystej warstwy niezmienionej lub nieznacznie zmienionej.

Przypadek 2 stanowi efekt dodatkowego zasilania ujętej warstwy wodonośnej z nadległej warstwy słabo przepuszczalnej i warstwy wodonośnej.

Przypadek 3 to efekt zasilania ujętej warstwy z warstwy niżej zalegającej (dolnej) o większej sprężystości (ilościowo mniejszej) lub przy strumieniu z wyraźnym spadkiem hydraulicznym, gdy woda napływa z kierunków o wyższym ciśnieniu.

W układach hydrogeologicznych wielowarstwowych, gdy pompowana jest studnia w warstwie zalegającej w partii środkowej systemu, krzywa wzniosu w stosunku do krzywej opadania ulega większym zmianom i jest najczęściej kombinacją układów prostych przedstawionych na rysunku 7.3. Powyższe można też prześledzić na przykładach załączonych badań zarówno w otworach obserwacyjnych, jak i pompowanych.

### 7.3.2. Informacje hydrogeologiczne uzyskiwane z interpretacji opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworach pompowanych

W miarę pełne informacje hydrogeologiczne można uzyskać z danych z obu faz pompowania, tj. z opadania i powrotu zwierciadła w otworze pompowanym. Obserwacje powrotu zwierciadła wody winny być wykonywane co najmniej przez okres równy czasowi pompowania. Uzyskuje się je głównie przy pompowaniach na jednym stopniu dynamicznym, gdyż przy pompowaniach wielostopniowych dla interpretacji filtracji nieustalanej nadają się jedynie odcinki krzywych opadania na pierwszym stopniu oraz wzniosu po pompowaniu, ostatniego stopnia pompowania. Poniżej w zestawieniu (tab. 7.1) przedstawia się zakres możliwych do uzyskania informacji z pompowania na jednym stopniu i pompowania wielostopniowego. Przy tym ilość i wiarygodność informacji, zwłaszcza o granicach, rośnie z długością czasu pompowania i prowadzenia obserwacji wzniosu.

Tabela 7.1. Zakres możliwych do uzyskania informacji hydrogeologicznych z obserwacji filtracji nieustalanej pompowań pojedynczych otworów

Rodzaj informacji	Pompowanie jednostopniowe	Pompowanie wielostopniowe
Określenie wielkości zeskoku na filtrze	Wiarygodna z analizy opadania i wzniosu	Możliwa z faz opadania dla I stopnia i wzniosu dla ostatniego stopnia; wiarygodność ograniczona
Granice warstw:		
a) w pionie	Możliwość określenia zjawiska zasilania pompowanej warstwy z warstw związanych	Brak możliwości określenia
b) boczne	Możliwość określenia ich istnienia	Możliwość określenia ich istnienia
Określenie parametrów warstwy: przewodności $T$ i współczynnika filtracji:		
a) warstwy o szczelnym spągu i stropie oraz warstwy swobodne	Wiarygodne określenie parametrów	Możliwe określenie, lecz o mniejszej wiarygodności
b) warstwy o zasilaniu z przesiąkania Obliczenie możliwe tylko dla porównań z wynikami obliczeń dla filtracji ustalonej	Wiarygodność ograniczona; tym mniejsza, im większe przesiąkanie	Wiarygodność trudna do określenia, gdyż dysponujemy tylko wykresami $\frac{s}{Q} = f(\lg t)$

Niezwykle cenne są uzyskiwane informacje dotyczące granic warstw dla sporządzenia prognoz eksploatacji ujęć zarówno w zakresie ilościowym, jak i jakościowym zasobów wodnych niezależnie od posiadanych informacji archiwalnych o badanym systemie wodonośnym. Informacje te są wręcz niezastąpione w przypadku braku danych o charakterze granic z pompowań hydrowęzłowych i dotąd przeprowadzonego rozpoznania hydrogeologicznego danego obszaru.

## 7.4. Przykłady interpretacji próbnych pompowań z pojedynczych otworów

Przykłady te przedstawia się z wykorzystaniem otworów pompowanych hydrowęzłów uprzednio już analizowanych w rozdziałach 5 i 6. Umożliwi to Czytelnikowi własne porównanie wyników obliczeń z pojedynczego otworu i hydrowęzła i ocenę rozbieżności wyników obliczeń parametrów przewodności  $T$  i współczynnika filtracji, a także określania granic warstw wodonośnych zarówno w pionie, jak i w planie. Należy przy tym podkreślić, że z pompowań pojedynczych otworów nie można obliczyć parametrów zasobności sprężystej  $\mu$ , i odsączalności  $\mu$ , do czego są potrzebne pompowania hydrowęzłowe.

### 1. Warstwa naporowa piaskowców kościeliskich doggeru o szczelnym stropie i spągu w rejonie Wielunia

Przykład obliczeń z parametrów obserwacji opadania i wzniosu zwierciadła wody podczas próbnego pompowania otworu nr III był podany w rozdziale 5.1.1. Szkic sytuacyjny i schematyczny przekrój geologiczny przedstawia rysunek 5.3.

W tabeli 7.2 podano wartości depresji pomierzonych w otworze pompowanym w kolejnych momentach czasu od rozpoczęcia pompowania, a na rysunku 7.4 wy-

Tabela 7.2. Opadanie zwierciadła wody w otworze III, pompowanym z  $Q = 110 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 25–29.02.1972

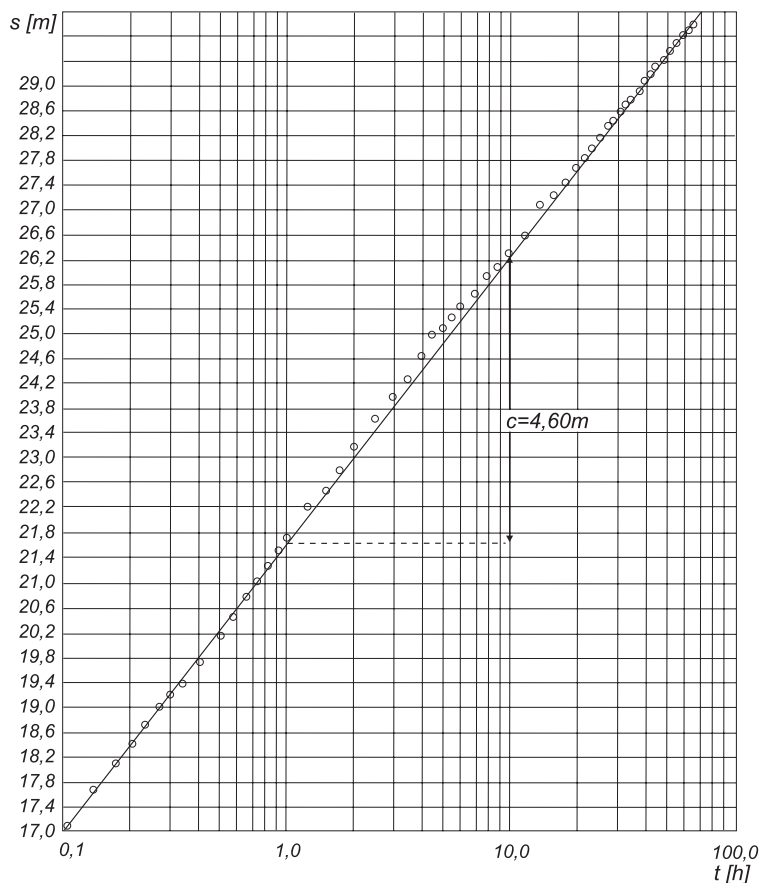
t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]
0,10	17,07	0,75	20,99	4,5	24,99	22	27,87	46	29,34
0,13	17,66	0,83	21,23	5,0	25,10	24	28,05	48	29,39
0,17	18,10	0,92	21,46	5,5	25,26	26	28,19	50	29,46
0,20	18,39	1,00	21,69	6,0	25,44	28	28,35	52	29,54
0,23	18,71	1,25	22,21	7,0	25,65	30	28,45	54	29,65
0,27	18,98	1,50	22,45	8,0	25,95	32	28,60	56	29,69
0,30	19,19	1,75	22,79	10,0	26,33	34	28,73	58	29,74
0,33	19,36	2,00	23,18	12,0	26,62	36	28,81	60	29,80
0,40	19,66	2,50	23,60	14,0	27,13	38	28,94	62	29,85
0,50	20,15	3,00	24,00	16,0	27,28	40	29,00	64	29,89
0,58	20,44	3,50	24,29	18,0	27,48	42	29,15	66	29,94
0,67	20,74	4,00	24,65	20,0	27,70	44	29,25	70	30,08



kres  $s = f(\lg t)$  z tych obserwacji. Z rysunku wynika, że wszystkie wartości depresji znajdują się od początku na prostej odpowiadającej, czyli że od razu spełniony jest warunek dla interpretacji parametrów metodą przybliżenia logarytmicznego. Dla porównania (rozd. 5, rys. 5.5) na wykresie wykonanym dla otworu obserwacyjnego nr I (rys. 5.5) zmierzone wartości depresji znalazły się na prostej dopiero po upływie ponad 20 h, zdecydowała o tym bowiem znaczna odległość otworu obserwacyjnego;  $r = 650$  m.

Przy wyznaczonej na podstawie rysunku 7.4 wartości  $c = 4,60$  m i wydajności pompowania  $Q = 110$  m<sup>3</sup>/h obliczone parametry warstwy wynoszą:

- przewodność  $T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 110,0}{4,60} = 4,38$  m<sup>2</sup>/h,
- współczynnik filtracji  $k = \frac{T}{m} = \frac{4,38}{46,0} = 0,095$  m/h.



Rys. 7.4. Wykres doświadczalny  $s = f(\lg t)$  dla otworu pompowanego III (warstwa piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia). Interpretacja według metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba

W porównaniu z obliczonymi parametrami  $T$  i  $k$  z otworu obserwacyjnego nr I, są one wyższe o 10%. Obliczenia te należy uznać za wiarygodne, gdyż różnica ta może wynikać ze zmian struktury warstwy wodonośnej w przestrzeni środowiska hydrogeologicznego; otwór obserwacyjny jest odległy o 650 m od otworu pompowanego.

## 2. Naporowa plejstocenska warstwa wodonośna w Olszewnicy na międzyrzeczu Wisły–Narwi. Opadanie i wznios zwierciadła wody w otworze pompowanym H4

Przykład obliczeń parametrów filtracyjnych z otworu obserwacyjnego P1 przy pompowaniu otworu H4 z  $Q = 253 \text{ m}^3/\text{h}$  został już przedstawiony w rozdziale 5.1.2. Szkic sytuacyjny i przekrój hydrowęzła badawczego pokazuje rysunek 5.7.

W tabelach 7.3 i 7.4 podano wartości depresji  $s$  podczas opadania zwierciadła wody w otworze pompowanym i wartości wzniosu zwierciadła wody  $s'$  liczone od końcowego obniżenia zwierciadła wody w otworze, które wyniosło 17,73 m.

Pomiary depresji w tym otworze do 20 h nie zachowały się w dzienniku próbnego pompowania. Krzywa wzniosu zwierciadła wody (rys. 7.5) już po ok. 0,1 h, wykazuje możliwości interpretacji metodą przybliżenia logarytmicznego, przy czym krzywa wzniosu znalazła się poniżej krzywej opadania, zachowując podobne nachylenie, co świadczy o istnieniu przesiąkania z nadległej warstwy wodonośnej. Porównanie krzywej opadania i wzniosu z otworów pompowanego i obserwacyjnego P1 (odległy o 119 m) wykazuje znacznie większy rozstęp między tymi krzywymi dla otworu pompowanego, co wynika z większego zdepresjonowania i dopływu wody z przesiąkania w jego najbliższym otoczeniu.

Tabela 7.3. Wyniki obserwacji opadania zwierciadła wody w otworze pompowanym H4 w Olszewnicy

$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]
21	16,49	44	16,84	112	17,37	228	17,66
22	16,80	46	16,97	120	17,44	236	17,78
23	16,52	50	17,01	128	17,47	244	17,81
24	16,59	54	17,03	136	17,57	252	17,75
26	16,59	58	17,05	144	17,60	268	17,86
30	16,71	62	17,08	157	17,59	276	17,92
32	16,75	66	17,12	165	17,63	284	17,90
34	16,77	72	17,17	172	17,59	292	17,84
36	16,78	80	17,19	179	17,60	300	17,84
38	16,80	88	17,22	187	17,63	310	17,77
40	16,81	96	17,30	195	17,68	312	17,76
42	16,82	104	17,33	218	17,77	314	17,73

Tabela 7.4. Wyniki obserwacji wzniosu zwierciadła wody  $s'$  w otworze pompowanym H4 w Olszewnicy liczone od końcowego obniżenia wody w otworze 17,73 m

$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]
0,25	13,43	21	15,59	69	16,17	201	16,74
0,50	13,74	22	15,62	73	16,21	209	16,76
1,00	14,12	23	15,65	75	16,23	221	16,77
1,50	14,35	24	15,67	79	16,26	229	16,80
6,00	15,08	26	15,68	83	16,28	241	16,83
7,00	15,10	28	15,73	91	15,96	255	16,86
8,00	15,14	30	15,76	93	16,35	301	16,95
9,00	15,18	32	15,79	95	16,36	309	16,96
10,00	15,21	34	15,81	97	16,38	317	16,96
11,00	15,24	36	15,84	122	16,52	325	16,96
12,00	15,27	38	15,86	123	16,52	333	16,96
13,00	15,30	40	15,87	124	16,53	337	16,96
14,00	15,36	44	15,93	126	16,54	377	16,95
15,00	15,41	48	15,96	145	16,60	385	16,96
16,00	15,46	50	16,00	147	16,60	409	17,01
17,00	15,50	53	16,04	155	16,63	425	17,01
18,00	15,53	57	16,08	163	16,65	733	17,06
19,00	15,56	61	16,11	171	16,68	783	17,06
20,00	15,58	65	16,13	185	16,71		

Ze względu na schemat warstwy ze stałym przesiąkaniem obliczenie parametrów filtracyjnych z obserwacji filtracji nieustalanej w otworze pompowanym jest orientacyjne i możliwe tylko metodą Theisa-Jacoba.

Dane do obliczeń:

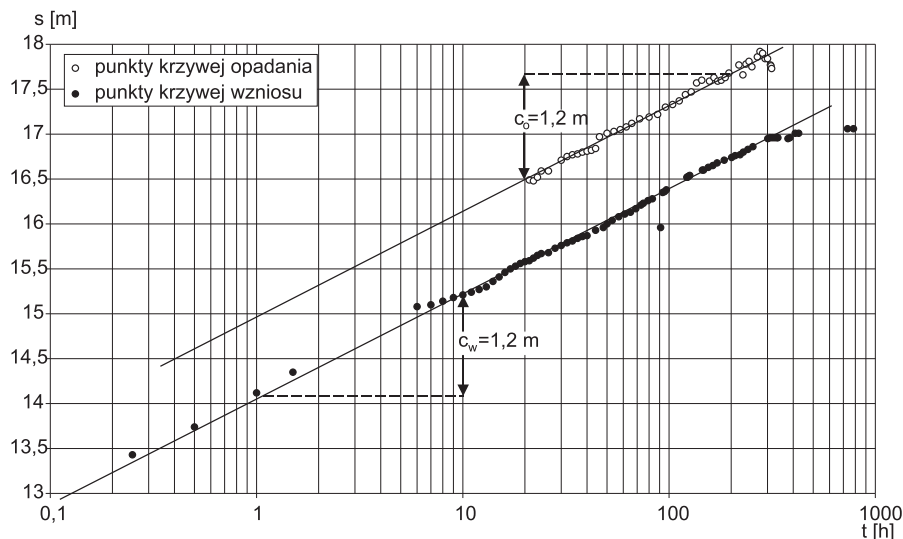
$Q = 253 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ ,  $c = 1,20 \text{ m}$  (opadanie i wznios),  $m = 22,0 \text{ m}$ .

Wyniki:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 253,0}{1,20} = 38,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{m} = \frac{38,6}{22,0} = 1,75 \text{ m}/\text{h}.$$

Względem obliczeń tych parametrów w otworze obserwacyjnym P1 metodą Waltona ( $T = 37,2 \text{ m}^2/\text{h}$  i  $k = 1,69 \text{ m}/\text{h}$ ), wyniki są większe o 3,8 % i niższe o 4 % w przypadku ich obliczeń metodą Hantusha. Wielkość rozbieżności wyników obliczeń między tymi metodami w tym przypadku jest dopuszczalna. Przy tym należy pamiętać, że wielkość tego błędu zwiększa się z wielkością przesiąkania.



Rys. 7.5. Wykresy  $s = f(\lg t)$  oraz  $s' = f(\lg t')$ . Opadanie i wznios zwierciadła wody w otworze pompowanym z  $Q = 253 \text{ m}^3/\text{h}$  w Olszewnicy

### 3. Warstwa wodonośna niezupełnie swobodna w Pradolinie Żerkowsko-Rydzyskiej – w rejonie Jarocina–Wilkowcy

Interpretacja opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym nr 1A z  $Q = 62,7 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  przez 233 h.

Przykład tego obiektu badawczego jest przedstawiony w rozdziale 5.2.1, rysunki 5.22 i 5.24, dla interpretacji parametrów filtracyjnych z otworu obserwacyjnego nr 31 odległego o 71,5 m od otworu pompowanego. Wyniki obserwacji opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym podano w tabelach 7.5 i 7.6 oraz na wykresach  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$  – rysunek 7.6.

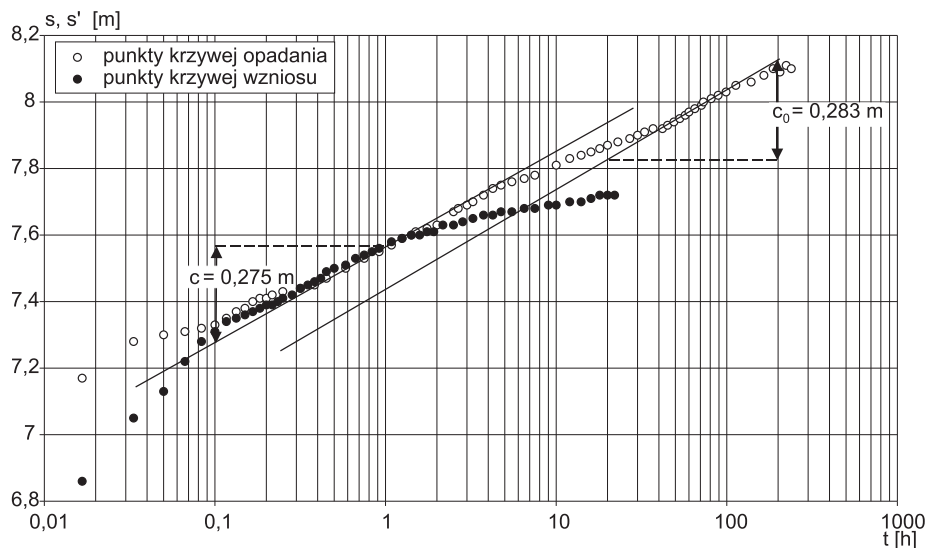
Krzywe opadania i wzniosu zachowują generalnie podobny charakter, przy czym krzywa wzniosu układa się poniżej krzywej opadania, co jest charakterystyczne dla warstwy niezupełnie swobodnej. Krzywe te wykazują 3 charakterystyczne odcinki, których interpretację przedstawiono w rozdziale 7.2.1. Z tej obserwacji w otworze pompowanym można uznać za wiarygodne parametry z analizy odcinka trzeciego krzywych – metodą Thesa-Jacoba.

Dla tych odcinków krzywych, dla metody przybliżenia logarytmicznego, odczytano wielkości  $c$ : z opadania  $c_1 = 0,275 \text{ m}$  i  $c_2 = 0,283 \text{ m}$  i wzniosu  $c_1 = 0,275 \text{ m}$  oraz średnia miąższość warstwy wodonośnej  $m = 18,5 \text{ m}$ .

Wyniki obliczeń:

$$T_1 = \frac{0,183Q}{c_1} = \frac{0,183 \cdot 62,7}{0,275} = 41,72 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$T_2 = \frac{0,183Q}{c_2} = \frac{0,183 \cdot 62,7}{0,283} = 40,54 \text{ m}^2/\text{h},$$



Rys. 7.6. Wykresy  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$ . Opadanie i wznios zwierciadła wody w otworze 1A w Wilkowyi, pompowanym z wydajnością  $Q = 62,7 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 12–22.02.1975

Tabela 7.5. Wyniki obserwacji opadania zwierciadła wody w otworze 1A pompowanym z wydajnością  $Q = 62,7 \text{ m}^3/\text{h}$  w dniach 12–22.02.1975 w rejonie Jarocina–Wilkowyi

t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]
0,02	7,17	0,58	7,50	6,5	7,77	57	7,96
0,03	7,28	0,75	7,53	7,5	7,78	60	7,97
0,05	7,30	0,92	7,55	10,0	7,81	65	7,98
0,07	7,31	1,08	7,57	12,0	7,83	71	7,99
0,08	7,32	1,25	7,59	14,0	7,84	73	8,00
0,10	7,33	1,42	7,60	16,0	7,85	81	8,01
0,12	7,35	1,50	7,61	18,0	7,86	89	8,02
0,13	7,37	1,75	7,62	20,0	7,87	99	8,03
0,15	7,38	2,00	7,63	23,0	7,88	113	8,05
0,17	7,40	2,50	7,67	27,0	7,89	139	8,06
0,18	7,41	2,67	7,68	30,0	7,90	165	8,08
0,20	7,41	3,00	7,69	33,0	7,91	187	8,10
0,22	7,42	3,25	7,70	37,0	7,92	205	8,09
0,25	7,43	3,75	7,72	42,0	7,92	223	8,11
0,32	7,44	4,25	7,74	45,0	7,93	239	8,10
0,38	7,45	4,75	7,75	49,0	7,94		
0,45	7,47	5,50	7,76	53,0	7,95		

Tabela 7.6. Wyniki obserwacji wzniosu zwierciadła wody w otworze 1A pompowanym z wydajnością  $Q = 62,7 \text{ m}^3/\text{h}$  w dniach 12–22.02.1975 w rejonie Jarocina–Wilkowy

$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]	$t'$ [h]	$s'$ [m]
0,02	6,86	0,23	7,40	0,92	7,56	4,75	7,67
0,03	7,05	0,25	7,41	1,08	7,58	5,50	7,67
0,05	7,13	0,28	7,42	1,25	7,59	6,50	7,68
0,07	7,22	0,32	7,44	1,42	7,60	7,50	7,68
0,08	7,28	0,35	7,45	1,58	7,60	9,00	7,69
0,10	7,31	0,38	7,46	1,75	7,61	10,00	7,69
0,12	7,34	0,42	7,47	1,92	7,61	12,00	7,70
0,13	7,35	0,45	7,49	2,17	7,63	14,00	7,70
0,15	7,36	0,50	7,50	2,50	7,63	16,00	7,71
0,17	7,37	0,58	7,51	2,83	7,64	18,00	7,72
0,18	7,38	0,67	7,53	3,25	7,65	20,00	7,72
0,20	7,39	0,75	7,54	3,75	7,66	22,00	7,72
0,22	7,39	0,83	7,55	4,25	7,66		

$$k_1 = \frac{T_1}{H} = \frac{41,72}{18,5} = 2,25 \text{ m/h,}$$

$$k_2 = \frac{T_2}{H} = \frac{40,54}{18,5} = 2,19 \text{ m/h.}$$

Uzyskane wyniki obliczeń są zgodne z wynikami obliczeń dla otworu obserwacyjnego 1A, które wyniosły:  $T = 43,4\text{--}45,8 \text{ m}^2/\text{h}$  i  $k = 2,05\text{--}2,16 \text{ m/h}$ .

#### 4. Warstwa wodonośna tarasu plejstocńskiego rzeki Brdy w rejonie Bydgoszcz–Czyżkówko

Interpretacja opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym H6. Przykład tego pompowania badawczego – hydrowęzłowego, został już przedstawiony w rozdziale 5.3.1, rysunki 5.22, 5.23 i 5.24 dla interpretacji parametrów filtracyjnych z otworu obserwacyjnego 6H-2 metodą Theisa-Jacoba i z funkcji  $s = f(\lg r)$  dla otworów obserwacyjnych 6H-1, 6H-2 i 6H-3. Wyniki opadania i wzniosu zwierciadła wody podano w tabelach 7.7 i 7.8 oraz na wykresach  $s = f(\lg t')$  oraz  $s' = f(\lg t')$  – rysunek 7.7. Wykresy półlogarytmiczne sporządzono dla wielkości depresji nieskorygowanej i depresji skorygowanej (depresja w otworze przekroczyła  $0,2H$ ) celem porównania tych wielkości i określenia wielkości błędów przy wielkościach nieskorygowanych, gdyż miąższość warstwy wynosiła zaledwie  $H = 6,3 \text{ m}$ .

Z analizy wykresu opadania zwierciadła wody wynika, że w otoczeniu otworu pompowanego istnieje granica warstwy wodonośnej, gdyż wielkość nachylenia krzywej  $c_2$  po około 13 h pompowania jest prawie dwukrotnie większa od nachyle-

Tabela 7.7. Wyniki obserwacji opadania zwierciadła wody w otworze 6H pompowanym z  $Q = 61,8 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 24.01–30.01.2001 (wartości nieskorygowane i skorygowane) w Bydgoszczy–Czyżkówku

$t$ [h]	$s$ [m]	$s_c$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$s_c$ [m]
0,02	1,70	1,47	7	2,48	2,00
0,05	1,72	1,49	10	2,59	2,07
0,08	1,76	1,52	15	2,73	2,15
0,11	1,78	1,53	20	2,80	2,19
0,17	1,80	1,55	25	2,90	2,24
0,25	1,84	1,58	30	2,92	2,25
0,33	1,88	1,60	40	3,00	2,30
0,42	1,90	1,62	50	3,12	2,36
0,50	1,92	1,63	60	3,22	2,41
0,58	1,95	1,65	68	3,30	2,45
0,67	1,98	1,67	80	3,33	2,46
0,83	2,02	1,70	88	3,36	2,48
1,00	2,07	1,74	100	3,45	2,52
1,25	2,09	1,75	112	3,47	2,53
1,50	2,13	1,78	120	3,77	2,66
2,00	2,21	1,83	124	3,80	2,67
3,00	2,31	1,89	136	3,93	2,72
4,00	2,39	1,94	144	3,96	2,73
5,00	2,40	1,95			

nia krzywej  $c_1$ , zarówno dla wielkości nieskorygowanych, jak i skorygowanych. Stąd za wiarygodne uznaje się wyniki obliczeń z nachylenia prostej  $c_1$ .

Wyniki obliczeń parametrów dla faz opadania i wzniosu.

Wielkości pomiarów depresji  $s$  – nieskorygowane.

Opadanie:  $c_1 = 0,5 \text{ m}$ ,  $H = 6,3 \text{ m}$ , stąd:

$$T_1 = \frac{0,183Q}{c_1} = \frac{0,183 \cdot 61,8}{0,5} = 22,62 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k_1 = \frac{T_1}{H} = \frac{22,62}{6,3} = 3,59 \text{ m/h}.$$

Wznios:  $c_w = 0,58 \text{ m}$

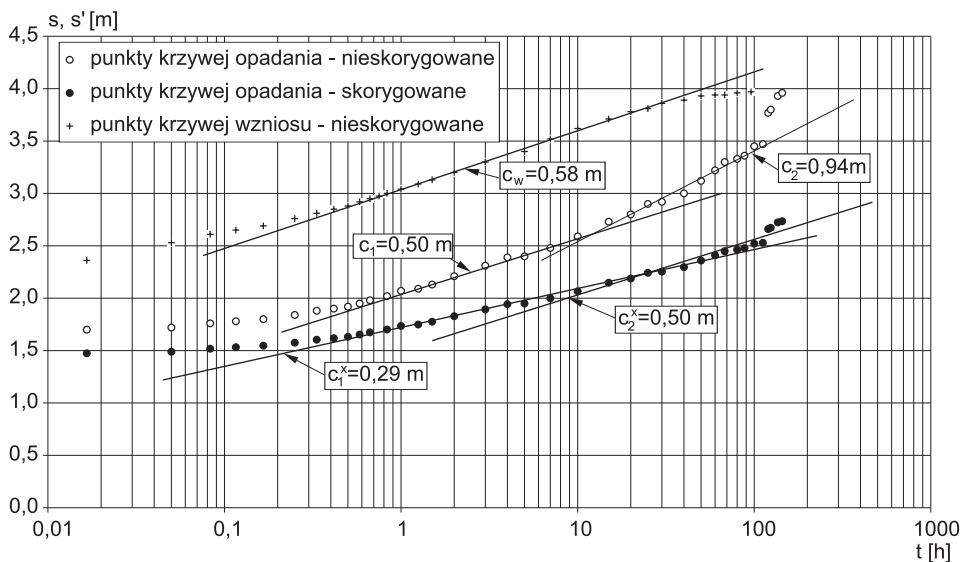
$$T_w = \frac{0,183 \cdot 61,8}{0,58} = 19,5 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k_w = \frac{T_w}{H} = \frac{19,5}{6,3} = 3,1 \text{ m/h.}$$

Wielkości pomiarów depresji  $s$  – skorygowane.  
Opadanie:  $c^x = 0,29 \text{ m}$ ,  $H = 6,3 \text{ m}$ ,

Tabela 7.8. Wyniki obserwacji wzniosu zwierciadła wody w otworze 6H pompowanym z  $Q = 61,8 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dniach 24.01–30.01.2001 (wartości nieskorygowane) w Bydgoszczy-Czyżkówku

$t$ [h]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s'$ [m]
0,02	2,36	0,75	2,98	15	3,71
0,05	2,53	0,83	3,00	20	3,78
0,08	2,61	1,00	3,04	25	3,81
0,11	2,65	1,25	3,09	30	3,86
0,17	2,69	1,50	3,13	40	3,89
0,25	2,76	2,00	3,20	50	3,93
0,33	2,81	3,00	3,30	60	3,94
0,42	2,85	5,00	3,40	68	3,94
0,50	2,88	7,00	3,52	80	3,96
0,58	2,92	10,00	3,62	96	3,97
0,67	2,95				



Rys. 7.7. Wykresy  $s = f(\lg t)$ . Opadanie i wznios zwierciadła wody w otworze 6H pompowanym z wydajnością  $Q = 61,8 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w Bydgoszczy-Czyżkówku



$$T^x = \frac{0,183 \cdot 61,8}{0,29} = 39,0 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k^x = \frac{39,0}{6,3} = 6,2 \text{ m/h}.$$

Wykonane obliczenia parametrów filtracyjnych z wykresów nieskorygowanych i skorygowanych dla otworu pompowanego wykazują rozbieżności sięgające 70% ze względu na niewielką pierwotną miąższość warstwy wodonośnej.

### 5. Warstwa piaskowców kościeliskich w rejonie Wielunia

Warstwa naporowa z granicą szczelną – otwór pompowany nr I z  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ , obserwacje opadania i wzniosu w otworze pompowanym i obserwacyjnym nr III

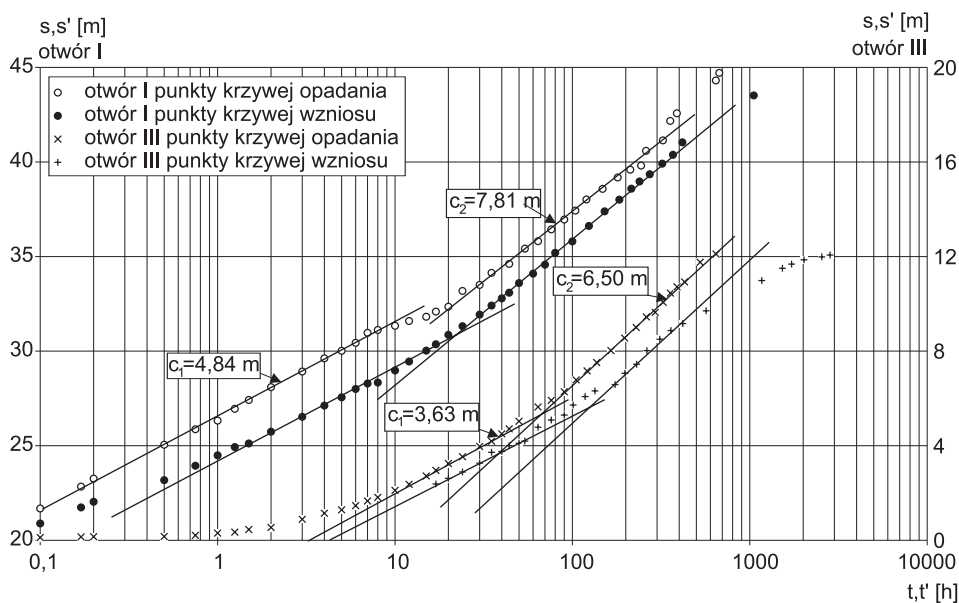
Przykład obliczeń parametrów filtracyjnych z opadania zwierciadła wody w otworach III, IV i 15 podczas tego pompowania wraz z analizą obliczenia odległości do granicy był podany w rozdziale 6.2. Poniżej przedstawione zostały wyniki analizy ujawniania się granicy i obliczeń parametrów  $T$  i  $k$  z otworu pompowanego i dla porównania z otworu obserwacyjnego według metody przybliżenia logarytmicznego. W tabelach 7.9 i 7.10 podano wartości depresji  $s$  i  $s'$  z obserwacji opadania i wzniosu dla otworu nr I pompowanego z wydajnością  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ , przez 712 h, a w tabelach 7.11 i 7.12 wartości depresji w otworze obserwacyjnym nr III podczas tego pompowania, na rysunku 7.8 zaś przedstawiono wykresy  $s = f(\lg t)$  oraz  $s' = f(\lg t')$ .

Tabela 7.9. Opadanie zwierciadła wody w otworze pompowanym nr I przy  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$  w Wieluniu

$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]
0,10	21,68	8	31,12	104	37,43
0,17	22,84	10	31,34	120	38,02
0,20	23,26	12	31,59	148	38,58
0,50	25,05	15	31,82	180	39,18
0,75	25,87	17	32,09	212	39,59
1,00	26,33	20	32,32	244	39,81
1,25	26,95	24	33,18	260	40,59
1,50	27,42	30	33,50	324	41,14
2,00	28,10	35	34,14	356	42,17
3,00	28,92	44	34,61	388	42,57
4,00	29,62	54	35,42	644	44,31
5,00	30,02	56	35,81	673	44,71
6,00	30,44	76	36,44		
7,00	30,97	90	36,96		

Tabela 7.10. Wznios zwierciadła wody w otworze pompowanym nr I przy  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$  w Wieluniu

$t$ [h]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s'$ [m]
0,10	20,89	8	28,34	80	35,20
0,17	21,74	10	28,98	100	35,80
0,20	22,04	12	29,45	124	36,62
0,50	23,18	15	30,03	152	37,39
0,75	23,94	17	30,36	184	38,01
1,00	24,49	20	30,86	215	38,59
1,25	24,93	24	31,32	239	38,97
1,50	25,12	30	31,93	373	39,35
2,00	25,74	35	32,41	321	39,91
3,00	26,53	40	32,79	369	40,38
4,00	27,12	44	33,09	417	41,04
5,00	27,56	50	33,60	1053	43,52
6,00	28,00	60	34,10		
7,00	28,29	70	34,57		



Rys. 7.8. Wykresy  $s = f(lgt)$  i  $s' = f(lgt')$  dla otworu pompowanego nr I i obserwacyjnego nr III znajdującego się w odległości 650 m przy  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$ , Wieluń – warstwa piaskowców kościeliskich

Tabela 7.11. Opadanie zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym nr III znajdującym się w odległości 650 m podczas pompowania otworu 1 w Wieluniu z  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$ 

$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]	$t$ [h]	$s$ [m]
0,10	0,15	10	2,64	121	8,96
0,17	0,18	12	2,96	137	9,40
0,20	0,19	15	3,40	165	10,03
0,50	0,20	17	3,70	197	10,69
0,75	0,26	20	4,06	229	11,25
1,00	0,38	24	4,42	261	11,81
1,25	0,43	30	4,96	293	12,05
1,50	0,57	35	5,24	325	12,58
2,00	0,68	40	5,63	357	13,07
3,00	1,11	44	5,89	389	13,40
4,00	1,43	50	6,29	429	13,66
5,00	1,61	64	7,05	525	14,70
6,00	1,83	76	7,40	645	15,13
7,00	2,08	90	7,85		
8,00	2,27	105	8,48		

Tabela 7.12. Wznios zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym nr III znajdującym się w odległości 650 m podczas pompowania otworu 1 w Wieluniu z  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$ 

$t$ [h]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s'$ [m]	$t$ [h]	$s'$ [m]
17	2,98	90	6,62	567	12,13
20	3,27	101	7,15	1168	13,73
24	3,61	118	7,60	1528	14,38
30	4,08	134	7,90	1720	14,60
35	4,65	174	8,23	2020	14,83
40	4,70	198	8,83	2548	14,98
44	5,00	230	9,31	2836	15,08
50	5,13	263	10,03		
54	5,25	311	10,63		
64	5,98	359	11,09		
76	6,36	419	11,46		

Analiza wykresów półlogarytmicznych zarówno opadania, jak i wzniosu wykazuje w otworze pompowanym po ok. 20 h wzrost nachylenia krzywej z  $c_1 = 4,84 \text{ m}$  do  $c_2 = 7,81 \text{ m}$ , w otworze obserwacyjnym zaś odległym o 650 m odpowiednio wzrost nachylenia krzywej z  $c_1 = 3,6 \text{ m}$  po 40–50 h do  $c_2 = 6,5 \text{ m}$ , tj. o wartości 1,6–1,8. Tak istotne odchylenia krzywych zostały w rozdziale 6.2 zinterpretowane jako istnienie granicy szczelnej w obszarze objętym wpływem pompowań, a którą

stanowi uskok w utworach jury środkowej o zrzucie 450 m – rysunek 6.8. Z tej przyczyny przyjęto, że do obliczeń parametrów filtracyjnych metodą Theisa-Jacoba można wykorzystać tylko pierwsze odcinki nachylenia krzywych –  $c_1$ .

Obliczenia dla otworu pompowanego nr I:

Dane:  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $c_1 = 4,84 \text{ m}$

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 118,0}{4,84} = 4,46 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{H} = \frac{4,46}{46,0} = 0,096 \text{ m/h}.$$

Wynik obliczenia parametru  $T$  w porównaniu do wyniku dla tego otworu jako obserwacyjnego przy pompowaniu otworu nr III (rozdz. 5.1.1), gdy  $T = 3,96 \text{ m}^3/\text{h}$  jest większy o 12,6%, co można uznać za dopuszczalne dla metody Theisa-Jacoba.

Obliczenia dla otworu obserwacyjnego nr III:

Dane:  $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $c_1 = 3,63 \text{ m}$ ,  $t_o = 2,5 \text{ h}$ ,

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 118,0}{3,63} = 5,95 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s \frac{2,25 \cdot T \cdot t_o}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 5,95 \cdot 2,5}{650^2} = 0,0000792,$$

$$a = \frac{T}{\mu} = \frac{5,95}{0,0000792} = 47124 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Obliczenie odległości do granicy szczelnej:

$$R_t = 1,5\sqrt{a \cdot t}$$

gdzie:  $t$  – czas ujawnienia się granicy dla otworu III  $\approx 45 \text{ h}$ , zaś nr I  $\approx 20 \text{ h}$  stąd:

$$\text{Otwór III:} \quad R_t = 1,5\sqrt{47124 \cdot 45} = 2184 \text{ m}$$

$$\text{Otwór I:} \quad R_t = 1,5\sqrt{47124 \cdot 20} = 1456 \text{ m}$$

Z powyższych danych wynika, że granica szczelna znajduje się bliżej otworu nr I o ok. 728 m, a co jest zgodne z istnieniem uskoku z tej strony (rys. 5.3). Ponadto obliczenie jest zgodne z identyfikacją odległości od granicy dla otworu nr IV znajdującego się w podobnej odległości jak otwór III tj.  $\approx 2100 \text{ m}$ .

## 8. INTERPRETACJA WYNIKÓW PRÓBNYCH POMPOWAŃ W ZŁOŻONYCH WARUNKACH HYDROGEOLOGICZNYCH

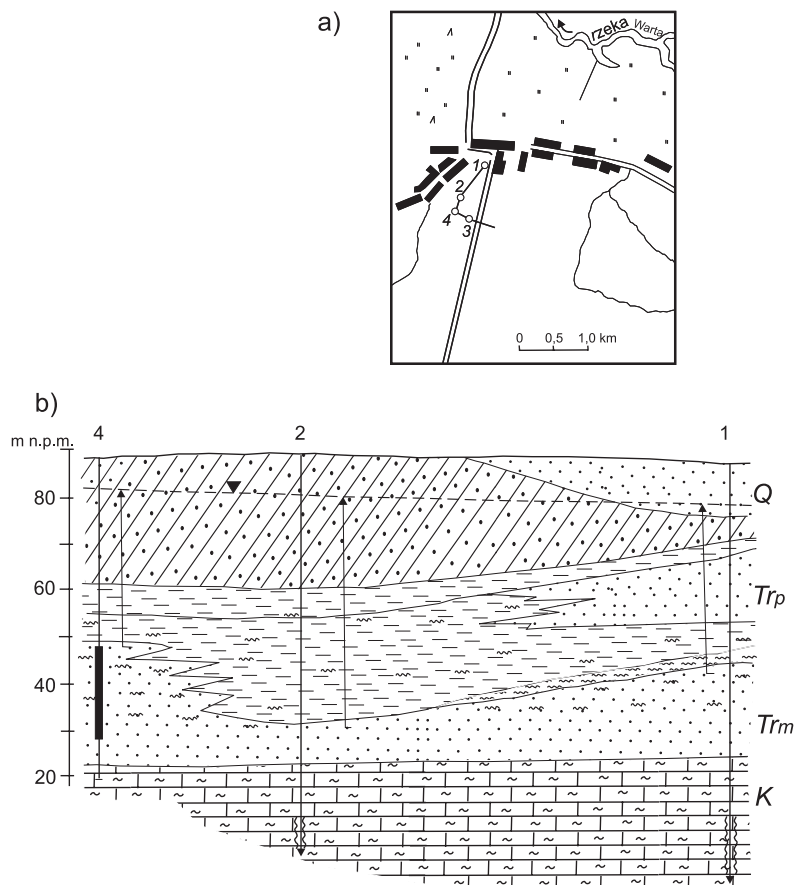
Podane w poprzednich rozdziałach przykłady próbnych pompowań dotyczyły typowych schematów hydrogeologicznych. Natomiast przy dokumentowaniu zasobów wód podziemnych hydrogeolodzy mają często do czynienia z przypadkami struktur o złożonych warunkach hydrogeologicznych. Trudno jest wówczas zdecydować się jednoznacznie na przyjęcie określonego schematu obliczeniowego, ponieważ nie są zachowane warunki jego wyprowadzenia. Hydrogeolodzy stoją więc przed koniecznością dokonania wyboru schematu najbardziej zbliżonego, traktując wszelkie odchylenia od niego jako informacje dodatkowe o badanej warstwie wodonośnej. Wybór metody jest zawsze związany z analizą wykresów próbnych pompowań na tle dotychczasowej znajomości badanej struktury hydrogeologicznej i warunków krążenia wód podziemnych.

Analizując procesy filtracji podczas próbnego pompowania, można stwierdzić, że jeżeli prawidłowo jest wykonany układ badawczy (studnia, piezometry), to w większości przypadków w pierwszych godzinach pompowania otrzymujemy wyniki, które dają się zinterpretować według metody Theisa, a więc umożliwiają obliczenie parametrów warstwy wodonośnej w strefie ujęcia. Dalszy przebieg zjawisk, jeżeli są one uwarunkowane różnymi czynnikami (zmiana facji lub miąższości, granice w planie, okna hydrogeologiczne itp.), może być interpretowany tylko w sposób przybliżony według metody, która najdokładniej odzwierciedla stwierdzony stan hydrodynamiczny, a próbne pompowanie hydrowęzłowe może być traktowane wówczas jako „test systemu wodonośnego”.

W tym rozdziale podano przykłady interpretacji wyników próbnego pompowania, wykonanych w strukturach hydrogeologicznych o różnym stopniu komplikacji hydrodynamicznej. Są one często dyskusyjne, ale zorientują Czytelnika w sposobie podejścia autorów do przedstawionych zagadnień. Ponadto na końcu rozdziału podano przykład pompowania zespołowego pokazujący reakcje systemu wodonośnego szczelinowo-porowego podczas długotrwałego opadania i wzniosu zwierciadła wody i wykorzystania tych informacji do ustalenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia.

### 8.1. Warstwy wodonośne o zmienności facjalnej osadów

Przykładem warstwy wodonośnej zmiennej facjalnie jest struktura mioceńska w rejonie Zagórowa nad Wartą we wschodniej peryferycznej strefie trzeciorzęd-



Rys. 8.1. Szkic sytuacyjny (a) i przekrój geologiczny (b) w rejonie Zagórowa  
1, 2 – studnie w poziomie górnokredowym, 3,4 – studnie w poziomie miocenijskim

wej subniecki poznańskiej. Warstwa ta zbudowana jest z piasków drobnoziarnistych i pylastych i ma zmienną miąższość. W jej obrębie występują osady mułkowo-ilaste (rys. 8.1). W podłożu warstwy miocenijskiej występują osady górnej kredy w postaci margli. Spękane margle kredowe są wodonośne, ale cechują się słabą przepuszczalnością. Od poziomu miocenijskiego odizolowane są zwietrzeliną, która zalega w ich stropie. Nadkład warstwy miocenijskiej stanowią ropy poznańskie trzeciorzędu oraz gliny zlodowacenia środkowopolskiego. Badania przeprowadziło Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania w 1971 r. Prowadząca badania: Emilia Jelińska.

Ujęcie składa się z czterech studni (rys. 8.1). Studnie 1 i 2 ujmują poziom górnokredowy, przy czym mają niską wydajność. Np. studnia 1, która ujmuje wodę z głębokości 73–120 m, miała w czasie próbnego pompowania wydajność 20 m<sup>3</sup>/h przy depresji 56 m. Studnie 3 i 4 ujmują warstwę miocenijską i są bardziej wydajne ze względu na dużą miąższość i lepszą granulację osadów w rejonie wykonania

studni 1 i 2. W otworach 3 i 4 ujęto warstwę miocенską filtrami o długości 20 m. W czasie ich pompowań uzyskano następujące wyniki:

**Otwór 3**

$Q_1 = 43,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s_1 = 23,37 \text{ m}$ ,  $t_1 = 93 \text{ h}$ ,  $q_1 = 1,90 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  
przerwa na pomiar wzniosu do metody Theisa

$Q_2 = 16,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s_2 = 8,67 \text{ m}$ ,  $t_2 = 19 \text{ h}$ ,  $q_2 = 1,93 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

$Q_3 = 31,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s_3 = 16,45 \text{ m}$ ,  $t_3 = 20 \text{ h}$ ,  $q_3 = 1,88 \text{ m}^3/\text{h}$ .

**Otwór 4**

$Q_1 = 46,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s_1 = 20,70 \text{ m}$ ,  $t_1 = 76 \text{ m}$ ,  $q_1 = 2,22 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  
przerwa na pomiar wzniosu do metody Theisa

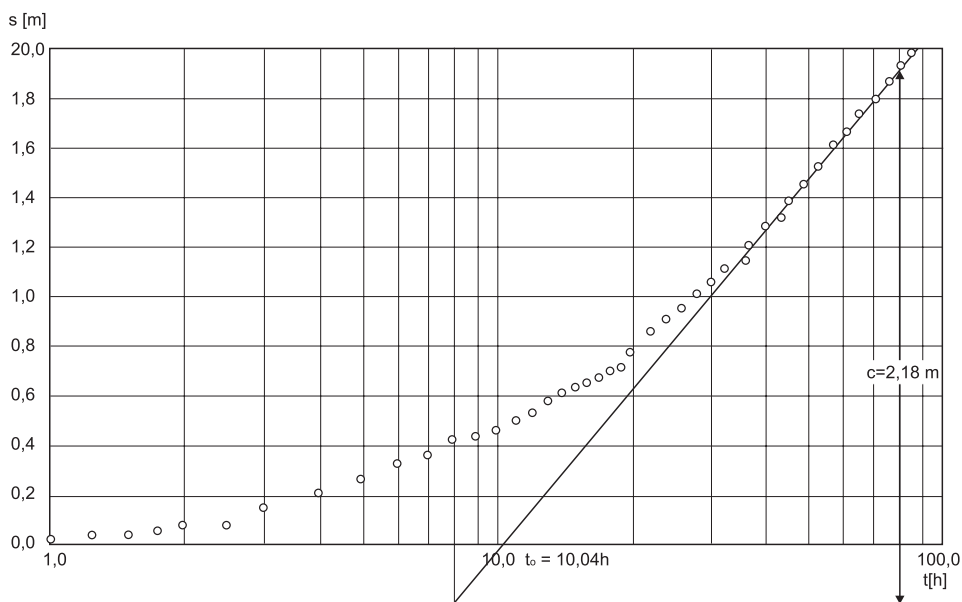
$Q_2 = 14,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s_2 = 5,56 \text{ m}$ ,  $t_2 = 12 \text{ m}$ ,  $q_2 = 2,65 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

$Q_3 = 33,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s_3 = 12,70 \text{ m}$ ,  $t_3 = 21 \text{ m}$ ,  $q_3 = 2,63 \text{ m}^3/\text{h}$ .

W czasie trwania pierwszego stopnia tych pompowań prowadzono obserwacje opadania zwierciadła wody w otworze nieczynnym, czyli przy pompowaniu otworu 3 obserwowano otwór 4 i odwrotnie. Ze względu na prawie identyczną postać wykresów z obserwacji filtracji nieustalonej w obu pompowaniach podaje się te wykresy tylko dla pompowania otworu 3.

Są to wykresy  $s = f(\lg t)$ ,  $\lg s = f(\lg t)$  i  $s = f(\lg \frac{t_p + t}{t})$ .

Wykres opadania zwierciadła wody w otworze 4 w postaci  $s = f(\lg t)$  oraz jego interpretację według metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba przedstawia rysunek 8.2. Zmierzone wartości depresji układają się na prostej dopiero po upływie 35 h pompowania, pozostając na niej aż do końca pompowania.



Rys. 8.2. Wykres  $s = f(\lg t)$  dla otworu 4 (warstwa piasków miocенskich w rejonie Zagórowa)

Obliczenia parametryczne:

Dane:

$Q = 43,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $t_p = 93 \text{ h}$ ,  $c = 2,18 \text{ m}$ ,  $t_0 = 10,04 \text{ h}$ ,  $r = 232 \text{ m}$ ,  $m = 32 \text{ m}$ .

Wyniki obliczeń:

- przewodność według wzoru [5.5]:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 43,8}{2,18} = 3,67 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik odsączalności sprężystej według wzoru [5.6]:

$$\mu_s \frac{2,25Tt_0}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 3,67 \cdot 10,04}{232^2} = 0,0015,$$

- współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{m} = \frac{3,67}{32} = 0,115 \text{ m/h},$$

- współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{3,67}{0,0015} = 2447 \text{ m}^2/\text{h},$$

- zasięg lejki depresji przy końcu pompowania wg wzoru [2.27]:

$$R_t = 1,5 \sqrt{at} = 1,5 \sqrt{2447 \cdot 93} = 715 \text{ m}.$$

Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  i jego interpretację według wzoru ogólnego Theisa przedstawia rys. 8.3.

Zmierzone wartości depresji już od samego początku układają się zgodnie z przebiegiem krzywej Theisa, jednak po około 17 godzinach od rozpoczęcia pompowania obserwuje się ich odchylenie w górę od przyłożonej krzywej wzorcowej. Nowa rodzina punktów układa się ponownie wzdłuż krzywej, którą zidentyfikowano jako krzywą Theisa. Zaobserwowane zjawisko dowodzi zmiany cech warstwy w pewnej odległości od ujęcia. Strefa ujęcia ma przewodność wyższą, strefa sąsiadująca – niższą.

Obliczenia:

Krzywa początkowa – współrzędne punktu arbitralnego A1:

$E(z) = 0,06$ ,  $z = 0,64$ ,  $s = 0,33 \text{ m}$ ,  $t = 5,7 \text{ h}$ ,

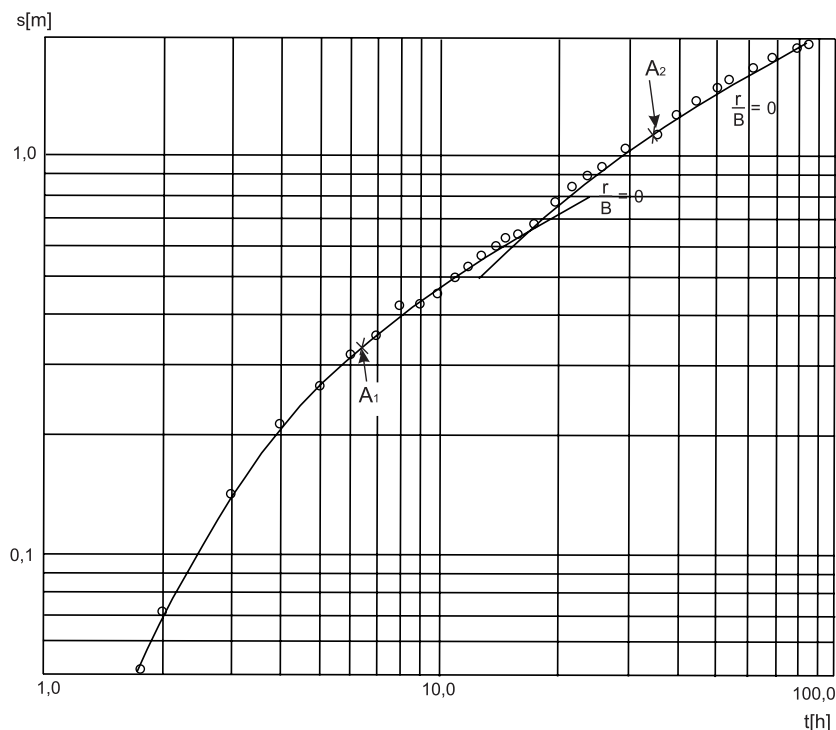
- przewodność według wzoru [5.2]:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{43,8}{0,33} \cdot 0,06 = 7,97 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik odsączalności sprężystej według wzoru [5.3]:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{7,97 \cdot 5,7}{232^2 \cdot 0,64} = 0,0013,$$





Rys. 8.3. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu 4 (warstwa piasków miocenijskich w rejonie Zagórowa)

- współczynnik piezoprzewodności według wzoru [5.4]:

$$a = \frac{r^2 z}{t} = \frac{232^2 \cdot 0,64}{5,7} = 6043 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{m} = \frac{7,97}{32} = 0,249 \text{ m/h},$$

- zasięg leja depresji w momencie zmiany wykresu, tj. dla  $t_1 = 17 \text{ h}$ :

$$R_1 = 1,5 \sqrt{6043 \cdot 17} = 1,5 \cdot 320 = 480 \text{ m}.$$

Krzywa po 17 godz. – współrzędne punktu arbitralnego A2:

$$E(z) = 0,1, z = 1,3, s = 1,18 \text{ m}, t = 35 \text{ h},$$

- przewodność:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{43,8}{1,18} \cdot 0,1 = 3,71 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{3,71 \cdot 35}{232^2 \cdot 1,3} = 0,00186,$$

- współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{r^2 z}{t} = \frac{232^2 \cdot 1,3}{35} = 2000 \text{ m}^2/\text{h},$$

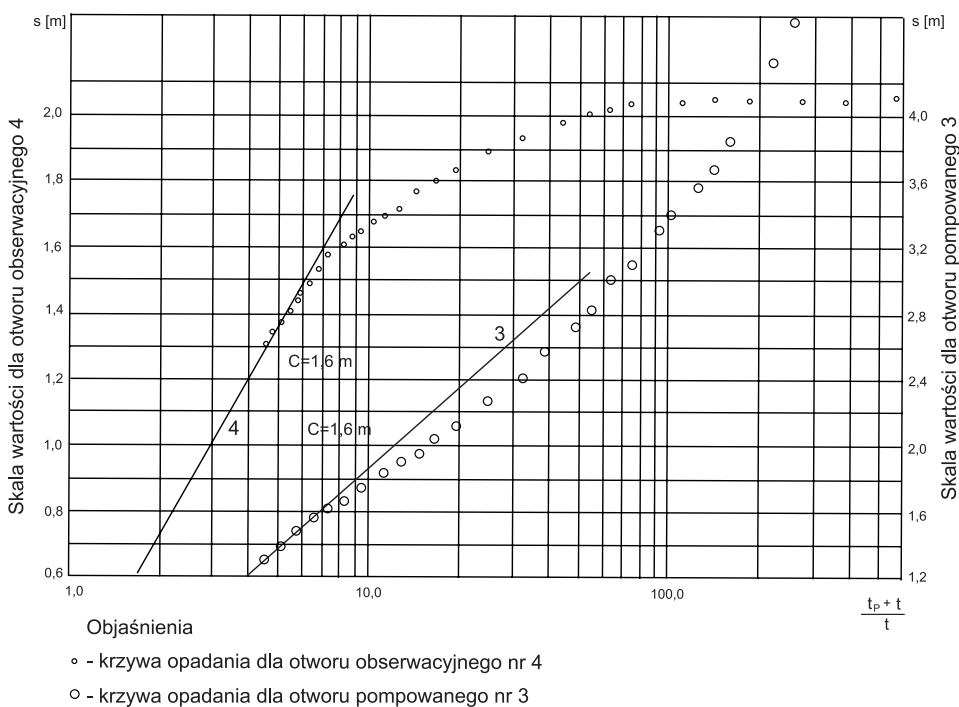
- zasięg leja depresji przy końcu pompowania:

$$R = R_1 + R_2 = R_1 + 1,5\sqrt{a(t_p - t_1)} = 480 + 1,5\sqrt{2000 \cdot 76} = 480 + 585 = 1065 \text{ m}.$$

Ponieważ do końca pompowania nie uzyskano stabilizacji dynamicznego zwierciadła wody wykresy wzniosu opracowano w postaci zależności:

$$s = f\left(\lg \frac{t_p + t}{t}\right).$$

Wykresy te przedstawiono na rysunku 8.4. Obejmują one tylko część obserwacji wzniosu, bo przez 27 godzin, ponieważ dalszych musiano zaniechać ze względu na konieczność kontynuacji innych badań. Końcowe odcinki wykresów, wykonanych dla otworu pompowanego i otworu obserwacyjnego, dały w przybliżeniu



Rys. 8.4. Wykresy wzniosu  $s = f\left(\lg \frac{t_p + t}{t}\right)$  dla otworów 3 i 4 po pompowaniu otworu 3 (warstwa piasków miocénskich w rejonie Zagórowa)

prostą o nachyleniu  $c = 1,60$  m. Średnia przewodność z fazy wzniosu wyniosła więc:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 43,8}{1,6} = 5,01 \text{ m}^2/\text{h},$$

a współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{m} = \frac{5}{32} = 0,156 \text{ m/h}.$$

Z przedstawionych materiałów wynika, że najpełniejszych informacji dostarcza interpretacja wykresu  $\lg s = f(\lg t)$ , ponieważ na wykresie półlogarytmicznym opadania w ogóle się nie ujawniło nachylenie, odzwierciedlające przewodność strefy ujęcia. Nie został bowiem spełniony do 17 godziny trwania pompowania warunek  $u < 0,1$ , umożliwiającą przybliżenie logarytmiczne wykresu  $s = f(\lg t)$ .

## 8.2. Warstwy wodonośne w pobliżu okien hydrogeologicznych

**Przykład 1. Naporowa warstwa wodonośna w rejonie Pradoliny Pomorskiej.** Badania wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania w latach 1968/69. Prowadzący badania: Tadeusz Kłyza, Jan Przybyłek. Badana warstwa plejstoceno-mioceńska jest przedstawiona na przekroju podłużnym Pradoliny Pomorskiej (rys. 5.25), który zamieszczono w rozdziale 5.2. Warstwa zbudowana jest z mioceńskich piasków średnio- i drobnoziarnistych oraz z plejstocenońskich piasków średnioziarnistych i żwirów. Ma miąższość 30 m. Pompowano otwór rozpoznawczy 1 z wydajnością  $Q = 234 \text{ m}^3/\text{h}$  przez 46 godzin. Obserwowano otwór rozpoznawczy 2, położony w odległości  $r = 300$  m od otworu pompowanego oraz piezometr H6;  $r = 540$  m. Wyniki obserwacji opadania zwierciadła wody przedstawiono na rysunku 8.5 w postaci wykresów  $\lg s = f(\lg t)$ . Badając charakter krzywej doświadczalnej, stwierdzono jej identyczność z wykresem funkcji Hantusha (Waltona)  $\frac{r}{B} = 0,6$  dla otworu 2 oraz  $\frac{r}{B} = 0,9$  dla piezometru H6. Dla wyznaczonych punktów arbitralnych odczytano współrzędne z wykresu doświadczalnego i wzorcowego, a następnie obliczono parametry.

### Obliczenia dla otworu 2

krzywa  $\frac{r}{B} = 0,6$ ,  $r = 300$  m,  $B = 500$  m.

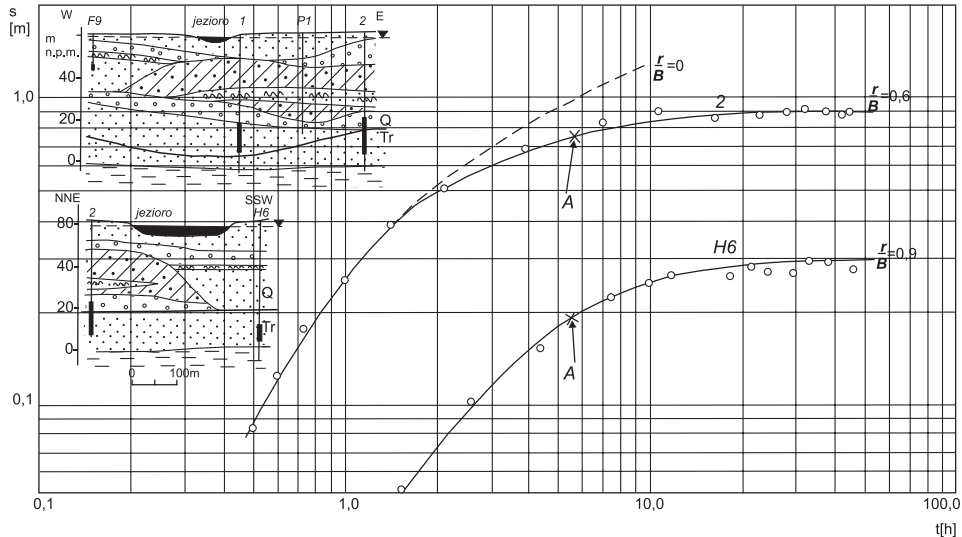
Dane:

$Q = 234 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s = 0,64$  m,  $t = 3,6$  h,  $E(z) = 0,88$ ,  $z = 1,5$ .

Obliczone parametry:

- według wzoru [5.2]:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{234}{0,64} \cdot 0,88 = 32,2 \text{ m}^2/\text{h},$$



Rys. 8.5. Pompowanie hydrowęzłowe otworu 1. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów 2 i H6 (Pradolina Pomorska)

$$k = \frac{T}{m} = \frac{32,2}{30} = 1,07 \text{ m/h,}$$

– według wzoru [5.3]:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{32,2 \cdot 3,6}{300^2 \cdot 1,5} = 0,00086,$$

– według wzoru [5.4]:

$$a = \frac{zr^2}{t} = \frac{1,5 \cdot 300^2}{3,6} = 37500 \text{ m}^2/\text{h,}$$

– według wzoru [2.20]:

$$R = 1,12 B = 1,12 \cdot 500 = 560 \text{ m.}$$

#### Obliczenia dla piezometru H6

krzywa  $\frac{r}{B} = 0,9$ ,  $r = 540 \text{ m}$ ,  $B = 600 \text{ m}$ .

Dane:

$Q = 234 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s = 0,28 \text{ m}$ ,  $t = 5,6 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,05$ ,  $z = 0,8$ .

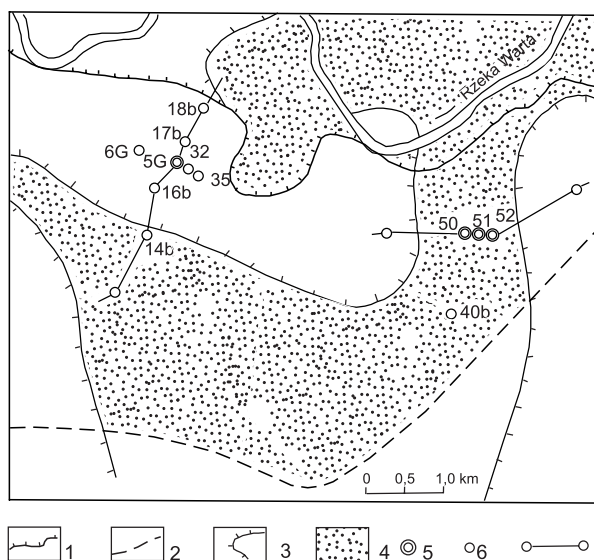
Obliczone parametry według wzorów jw. mają wartości:

$$T = 41,8 \text{ m}^2/\text{h}, \mu_s = 0,0010, a = 41800 \text{ m}^2/\text{h}, R = 672 \text{ m.}$$

**Przykład 2.** Naporowa warstwa wodonośna Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej. Badania wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania w 1974 r. Prowadzący badania: Jan Przybyłek, Jerzy Szenic. Plejstocenska warstwa

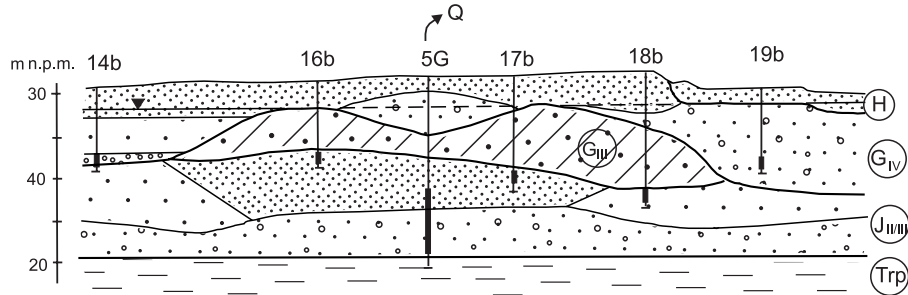
wodonośna zbudowana jest ze żwirów i różnoziarnistych piasków i leży na nieprzepuszczalnym podłożu, które stanowią ility serii poznańskiej (rys. 8.6 i 8.7). Nad warstwą wodonośną występuje płat glin zwałowych, który oddziela ją od warstwy pradolinnej. Poza zasięgiem glin warstwa naporowa przechodzi w warstwę swobodną, łącząc się w jeden kompleks wodonośny z warstwą pradolinną (8.7).

Przedmiotem prezentacji jest pompowanie hydrowęzłowe studni 5G, którą eksploatowano ze stałą wydajnością  $Q = 153 \text{ m}^3/\text{h}$  przez okres 25 h. W tym czasie obserwowano opadania zwierciadła wody w sąsiednich otworach rozpoznawczych: 6G –  $r = 97 \text{ m}$ , 32 –  $r = 141,6 \text{ m}$ , 35 –  $r = 340 \text{ m}$  i w piezometrze 17b –  $r = 191,6 \text{ m}$  (rys. 8.6). Wyniki obserwacji opadania zwierciadła wody we wszystkich otworach przedstawiono na rysunku 8.8 w postaci wykresów półlogarytmicznych  $s = f(\lg t)$ , a dla otworów najbardziej oddalonych, to jest dla otworów 17b i 35, w postaci wykresów  $\lg s = f(\lg t)$  na rysunku 8.9. Z wykresów  $s = f(\lg t)$  wynika, że po upływie 2–4 godzin pompowania następuje ich załamanie w kierunku osi czasu ( $t$ ) i ułożenie w odcinki prawie poziome lub o nieznacznym nachyleniu, odzwierciedlające ustalanie się warunków przepływu, wywołane osiągnięciem przez lej depresyjny strefy okna hydrogeologicznego (rys. 8.6 i 8.7). Obliczenia parametrów według wzoru przybliżenia logarytmicznego podano na rysunku 8.8. Przewodność obliczono według wzoru [5.5]:  $T = \frac{0,183Q}{c}$ , a współczynnik odsączalności sprężystej według wzoru [5.6]:  $\mu_s = 2,25T \frac{t_0}{r^2}$ . Badając z kolei charakter krzywych doświad-



Rys. 8.6. Szkic sytuacyjny hydrowęzłów: 5G i grupy otworów 50–52 w rejonie Mosiny (Pradolina Warszawsko-Berlińska)

1 – zasięg tarasu zalewowego, 2 – granica wielkopolskiej doliny kopalnej, 3 – zasięg występowania glin zwałowych w spągu pradolinnej, 4 – okna hydrogeologiczne, 5 – studnie, 6 – otwory obserwacyjne, 7 – linie przekrojów geologicznych



Rys. 8.7. Przekrój geologiczny przez hydrowęzeł w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej

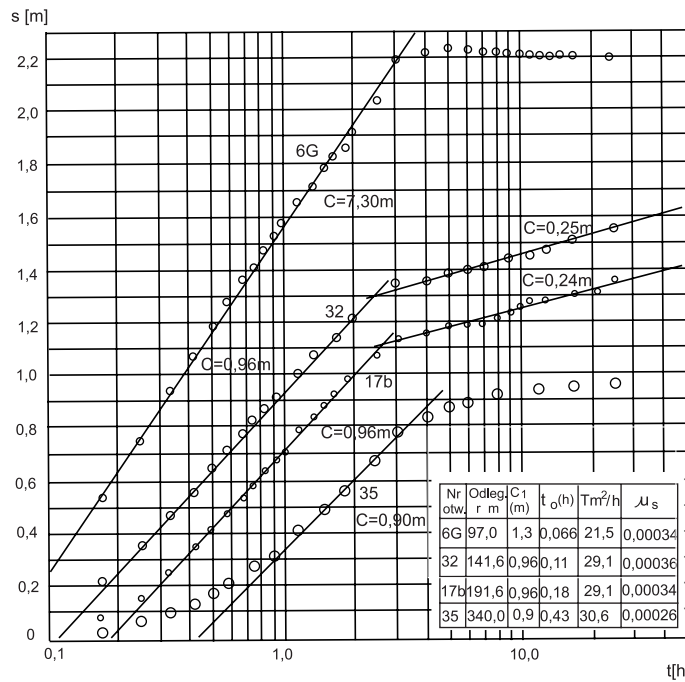
czalnych  $\lg s = f(\lg t)$  (rys. 8.9), stwierdzono ich identyczność z wykresem funkcji Hantusha (Waltona)  $\frac{r}{B} = 0,5$ . Dla wyznaczonych na wykresach punktów arbitralnych odczytano wartości współrzędnych i dokonano obliczeń parametrycznych, które przedstawiono poniżej.

**Obliczenia dla otworu 17b**

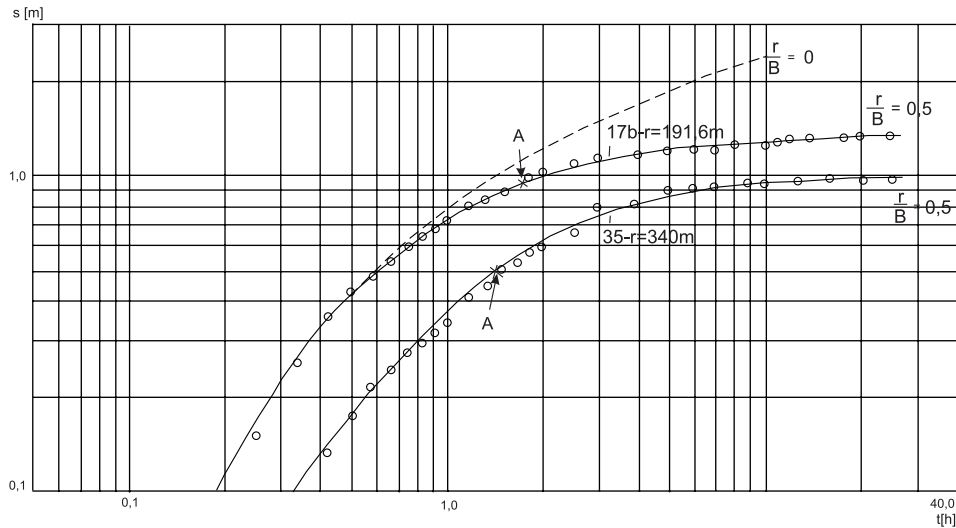
krzywa  $\frac{r}{B} = 0,5$ ,  $r = 191,6$  m,  $B = 383$  m.

Dane:

$Q = 153$  m<sup>3</sup>/h,  $s = 0,92$  m,  $t = 1,65$  h,  $E(z) = 0,1$ ,  $z = 1,7$ .



Rys. 8.8. Pompowanie hydrowęzłowe otworu 5G. Wykresy wskaźnikowe  $s = f(\lg t)$  (Pradolina Warszawsko-Berlińska)

Rys. 8.9. Pompowanie hydrowęzłowe otworu 5G. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$ 

Obliczone parametry:

- według wzoru [5.2]:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{153}{0,92} \cdot 0,1 = 16,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

- według wzoru [5.3]:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{16,6 \cdot 1,65}{191,6^2 \cdot 1,7} = 0,00044,$$

- według wzoru [5.4]:

$$a = \frac{r^2 z}{t} = \frac{191,6^2 \cdot 1,7}{1,65} = 37823 \text{ m}^2/\text{h},$$

- według wzoru [2.20]:

$$R = 1,12 \cdot B = 1,12 \cdot 383 \text{ m} = 429 \text{ m}.$$

**Obliczenia dla otworu 35**

krzywa  $\frac{r}{B} = 0,5$ ,  $r = 340 \text{ m}$ ,  $B = 680 \text{ m}$ .

Dane:

$Q = 153 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $s = 0,50 \text{ m}$ ,  $t = 1,5 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,07$ ,  $z = 0,8$ .

Obliczone parametry według powyższych wzorów mają wartości:

$$T = 21,4 \text{ m}^3/\text{h}, \mu_s = 0,00035, a = 61143 \text{ m}^2/\text{h}, R = 762 \text{ m}.$$

Z porównania obliczonych wartości przewodności, podanych na rysunku 8.7, z wartościami uzyskanymi z obliczeń według wykresu podwójnie logarytmicznego wynika, że wartości przewodności obliczone według wzoru przybliżenia logarytmicznego (rys. 8.7) są zawyżone dla otworów, które są oddalone od otworu pompowanego. Przewodność warstwy naporowej w tych warunkach mieści się w przedziale 16–22 m/h, a współczynnik filtracji osadów wynosi np. w rejonie otworów 5G i 6G  $k = \frac{T}{m_{sr}} 0,95$  m/h.

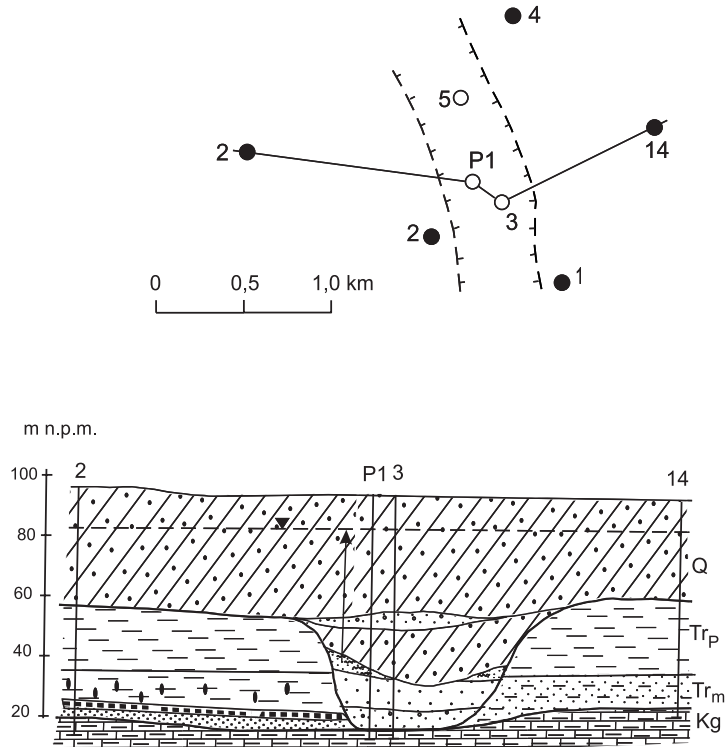
Podsumowując doświadczenia wynikające z obu podanych przykładów, można stwierdzić, że zasilanie przez okna hydrogeologiczne nie ma charakteru liniowego granicy  $H = \text{const}$ , lecz charakter obszarowy – przestrzenny. Bardziej poprawna jest więc wówczas interpretacja wykresów  $\lg s = f(\lg t)$  według nomogramu funkcji przesiąkania Waltona, a nie według nomogramu funkcji dla warstwy ograniczonej liniową granicą zasilania. Ponadto z porównania obu nomogramów wynika, że są one prawie identyczne (por. plansze II i V). Znając hydrodynamikę badanego układu, nie można oczywiście cech przesiąkania przypisywać nadkładowi warstwy w strefie ujęcia, lecz wiązać je należy ze stwierdzonym oknem hydrogeologicznym. Z dotychczasowych doświadczeń można przyjąć, że jeżeli interpretowany wykres  $\lg s = f(\lg t)$  identyfikuje się jako krzywą  $\frac{r}{B} > 0,3$  Waltona, to możemy uznać, że w zasięgu leja depresji mamy do czynienia z oknem hydrogeologicznym, mimo że może ono nie być jeszcze rozpoznane żadnym wierceniem.

### 8.3. Warstwy wodonośne w dolinach kopalnych

Małe doliny kopalne są strukturami wodonośnymi najtrudniejszymi w interpretacji parametryczno-strukturalnej, lecz najwdzięczniejszymi w zakresie wykazania przydatności metod badań filtracji nieustalonej w stosunku do innych metod. Oprócz niejednorodności, wynikającej ze zróżnicowania osadów, mamy tu do czynienia z wpływem dwu granic strukturalnych oraz zjawiskami przesiąkania strefowego przez okna hydrogeologiczne.

**Przykład 1. Dolina kopalna w rejonie Słupcy** – wpływ dwu granic strukturalnych oraz jej otoczenia na wyniki pompowania. Na rysunku 8.10 przedstawiono szkic rozmieszczenia otworów oraz przekrój geologiczny plejstocenijskiej doliny kopalnej w rejonie Słupcy. Dolina ta, o szerokości średnio 0,5 km, rozciąga się wzdłuż linii poznańskiej górnego miocenu i pliocenu oraz słabo wodonośne osady środkowego miocenu, sięgając stropu margli górnokredowych. Wypełniona jest żwirami oraz piaskami średnioziarnistymi. Pokrywę stanowią dwa pokłady glin zwałowych, rozdzielone cienką warstwą osadów fluwiogłacjalnych o ograniczonym zasięgu. Pokład starszych glin o miąższości 16 m towarzyszy obniżeniu erozyjnemu, a młodsze gliny pokrywają już równomiernie cały okoliczny obszar płaszczem o miąższości 36 m. Zwierciadło wody z warstwy dolinnej stabilizuje się na głębokości 11–12 m od powierzchni terenu. Badania przeprowadziło Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania. Prowadzący badania: Mikołaj Karpa, Jan Przybyłek.





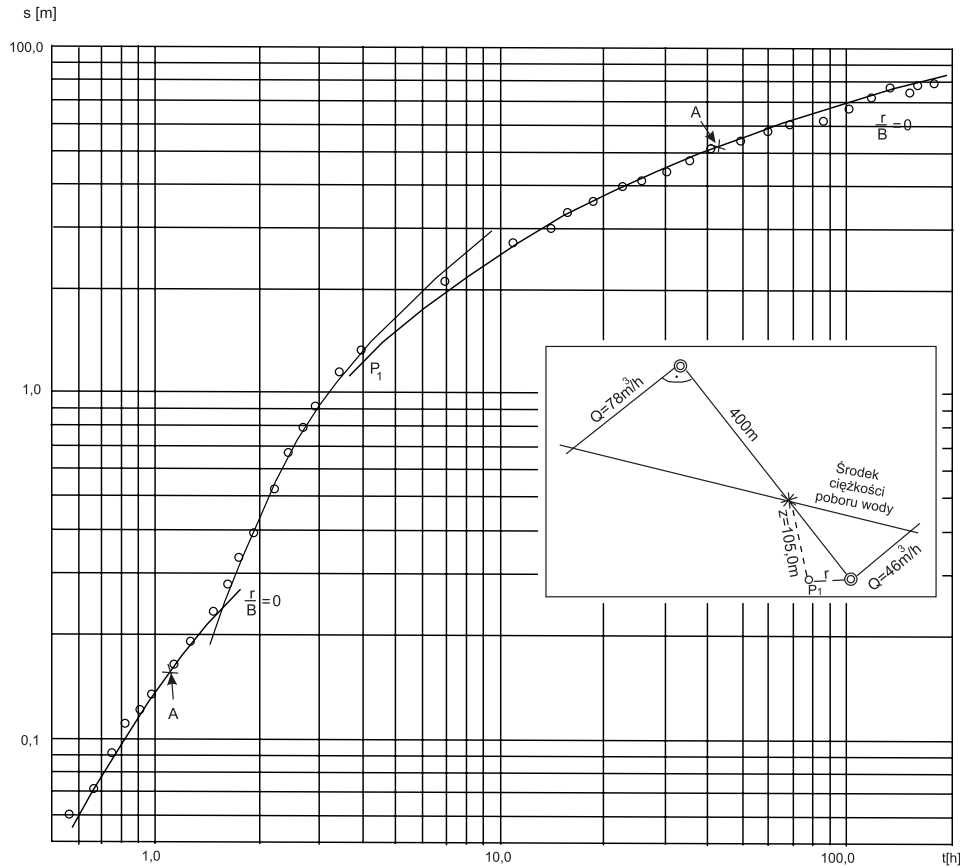
Rys. 8.10. Szkic sytuacyjny i przekrój geologiczny przez plejstocenijską dolinę kopalną w rejonie Słupcy

Rok wykonania: 1970. Na rysunku 8.11 przedstawiono wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla piezometru P1 z pompowania zespołowego otworów 3 i 5 łączną wydajnością  $124 \text{ m}^3/\text{h}$  przez okres 180 h. Wykres składa się z trzech wyraźnych odcinków:

- **pierwszy odcinek** – do 1,5 h pompowania – odzwierciedla opadanie zwierciadła wody w piezometrze P1 pod wpływem wydajności otworu rozpoznawczego 3 przy  $Q = 78 \text{ m}^3/\text{h}$ ; jeszcze bez wpływu współdziałania studni 5 oraz granic bocznych doliny, a więc dla schematu warstwy nieograniczonej i pompowania hydrowęzłowego,
- **drugi odcinek** – od 1,5 do 7 h pompowania – wpływ bocznych granic doliny kopalnej,
- **trzeci odcinek** – po 7 h pompowania i aż do końca jego trwania, tj. do 180 h – odzwierciedla uruchomienie dopływu wody z otaczającej dolinę kopalną warstwy osadów wodonośnych miocenu wskutek spadku ciśnienia piezometrycznego w obrębie doliny kopalnej – wywołanego pompowaniem zespołowym (małe gradienty w strukturze, stąd duże różnice ciśnień na granicach bocznych).

A oto obliczenia parametryczne z pierwszego i trzeciego odcinka krzywej.

**Pierwszy odcinek** został zidentyfikowany jako krzywa Theisa  $\frac{r}{B} = 0$  i odzwierciedla parametry warstwy wodonośnej w dolinie kopalnej bez wpływu granic.



Rys. 8.11. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu P1 w czasie pompowania zespołowego otworów 3 i 5 (plejstocieńska dolina kopalna w rejonie Słupcy)

Dane:  $Q = 78 \text{ m}^3/\text{h}$ , współrzędne punktu arbitralnego:  
 $s = 0,155 \text{ m}$ ,  $t = 1,1 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,03$ ,  $z = 0,34$ ,  $r = 63,5 \text{ m}$ .

Obliczone parametry:

- według wzoru [5.2]:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{78}{0,155} \cdot 0,03 = 15,1 \text{ m}^2/\text{h},$$

- według wzoru [5.3]:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{15,1 \cdot 1,1}{63,5^2 \cdot 0,34} = 0,0121,$$

- według wzoru [5.4]:

$$a = \frac{r^2 z}{t} = \frac{63,5^2 \cdot 0,34}{1,1} = 1246 \text{ m}^2/\text{h}.$$

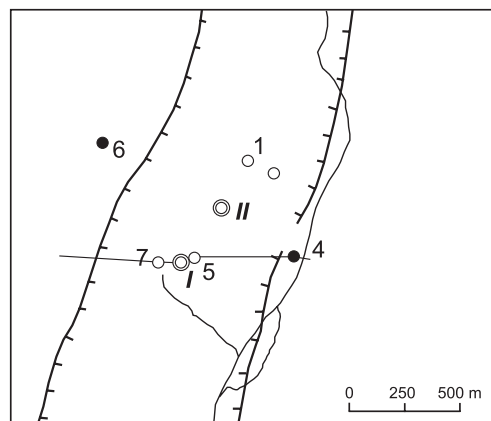
Zasięg leja depresji w momencie zmiany wykresu  $t_1 = 1,5$  h wyniósł  $R = 1,5\sqrt{at} = 1,5\sqrt{1246 \cdot 1,5} = 204$  m, a więc do tego momentu nie było wpływu pompowania studni 5 na zwierciadło wody w piezometrze P1.

**Trzeci odcinek** został zidentyfikowany także jako krzywa Theisa  $\frac{r}{B} = 0$ , ale od zwierciadła ona parametry filtracyjne uśrednione, tj. łącznie – warstwy pradolinnej i sąsiadującej z nią warstwy mioceńskiej, z której pochodzi zasilanie i która ma nieograniczone rozprzestrzenienie. Ponieważ piezometr P1 reaguje w rozważanym okresie na pompowanie zespołowe otworu rozpoznawczego 3 i studni 5, dlatego też dla potrzeb obliczeń wyznaczono na rysunku 8.11 środek ciężkości poboru wody przy eksploatacji zespołowej.

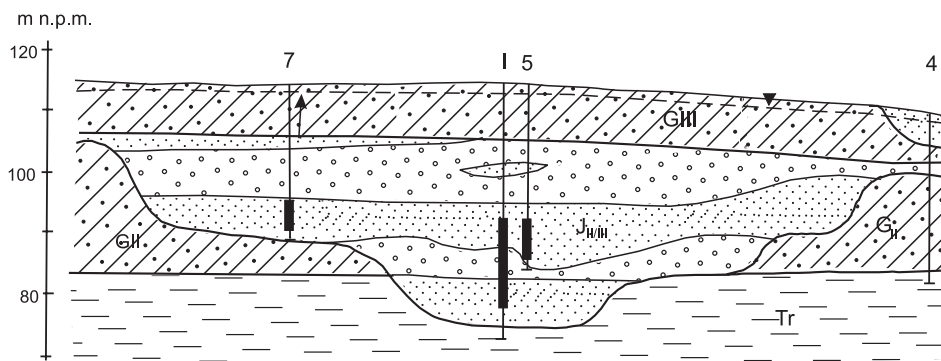
Dane:  $Q = 78 + 46 = 128$  m<sup>3</sup>/h, odległość piezometru P1 od środka ciężkości poboru wody  $r = 105$  m, współrzędne punktu arbitralnego:  $s = 5,20$  m,  $t = 43,5$  h,  $E(z) = 0,2$ ,  $z = 5,1$ ,  $t = 180$  h.

Obliczone parametry według wzorów jak dla krzywej pierwszej mają wartości:  $T = 4,76$  m<sup>2</sup>/h,  $\mu_s = 0,0037$ ,  $a = 1292$  m<sup>2</sup>/h,  $R = 720$  m. Na uwagę zasługuje wartość odsączalności sprężystej, różni się ona bowiem od obliczonej z pierwszej krzywej i nawiązuje rzędem wielkości do stwierdzonej w pompowaniach studni ujmujących bezpośrednio warstwę mioceńską. Dla orientacji można tę wartość porównać z wartością uzyskaną z pompowania w rejonie Zagórowa (rozd. 8.1 –  $\mu_s = 0,0015$ – $0,0018$ ).

**Przykład 2. Dolina kopalna w rejonie Łagiewnik koło Krotoszyna – problem zmiennej przewodności.** Badania wykonało Przedsiębiorstwo „Wodrol” z Jasina koło Poznania w 1975 r., prowadzący badania: Zbigniew Balcerkiewicz. Szkic sytuacyjny hydrowęzła przedstawia rysunek 8.12, a przekrój geologiczny doliny kopalnej rysunek 8.13. Badana struktura wodonośna została wykryta i okonturowana na podstawie badań geofizycznych i hydrogeologicznych. Jej szerokość wynosi 0,5–0,8 km, a miąższość osadów wodonośnych piaszczysto-żwirowych ją wypełniających 15–30



Rys. 8.12. Szkic sytuacyjny rejonu badań doliny kopalnej w Łagiewnikach (zaznaczono granice doliny kopalnej)



Rys. 8.13. Przekrój geologiczny przez plejstocenijską dolinę kopalną rejonu Łagiewnik

m. Dolina z interglacjału wielkiego została wycięta w glinach morenowych zlodowacenia południowopolskiego i w iłach trzeciorzędowych, które stanowią spąg osadów wodonośnych. Osady żwirowo-piaszczyste przykrywa od powierzchni jednolity 8–10-metrowy pokład gliny morenowej, stanowiący warstwę napinającą poziom wodonośny. Górne osady żwirowo-piaszczyste wypełniające dolinę kopalną przechodzą często poza nią w osady fluwioglacjalne, międzymorenowe o niewielkiej miąższości. Dla określenia zasobów eksploatacyjnych wycinka doliny kopalnej wykonano pompowanie hydrowęzłowe otworów I i II w celu obliczenia parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej i określenia charakteru jej granic. W trakcie pompowania obserwowano zachowanie się zwierciadła wody we wszystkich pozostałych otworach. Poniżej przedstawia się jedynie wyniki otrzymane z obserwacji opadania zwierciadła wody w otworze obserwowanym nr I podczas pompowania otworu II i pompowanym (opadanie, wznios). W pozostałych otworach obserwacyjnych otrzymane wyniki, analizowane na wykresach wskaźnikowych  $s = f(\lg t)$ , były podobne do wyników otworu nr I. Odległość między otworami I i II wynosi 288 m. Otwór nr II pompowano z wydajnością  $Q = 72 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  przez 75 h. Na koniec pompowania zwierciadło wody obniżyło się w otworze pompowanym o 3,27 m, a w otworze obserwacyjnym o 1,41 m.

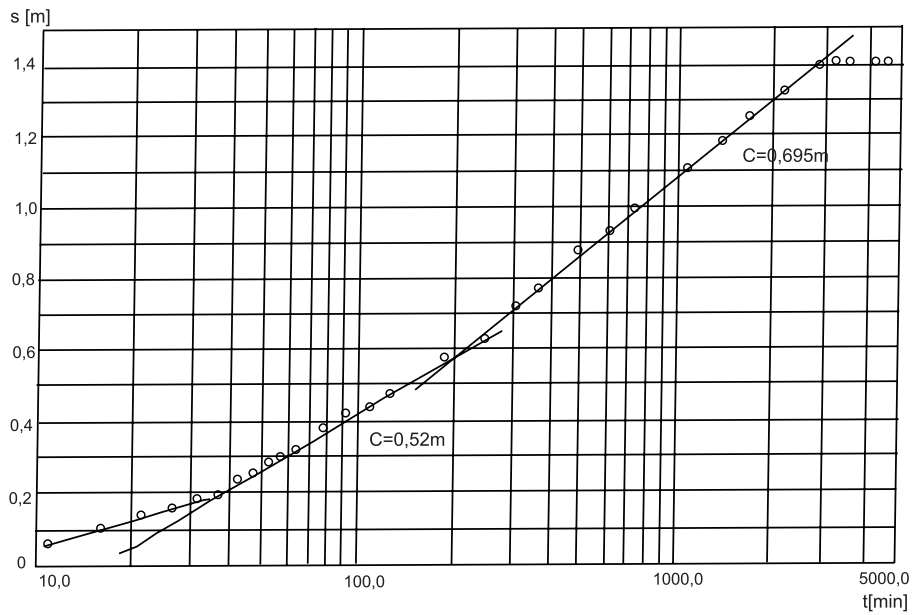
#### Interpretacja wyników pompowania wg otworu obserwacyjnego nr I

Wyniki pompowania zinterpretowano, wykonując dwa wykresy doświadczalne: wskaźnikowy  $s = f(\lg t)$  (rys. 8.14) i obliczeniowy  $\lg s = f(\lg t)$  (rys. 8.15) dla otworu obserwacyjnego. Wykresy te wykazują, że krzywa opadania zwierciadła wody w otworze I jest trzyczęściowa; wyraźnie dwukrotnie ulega załamaniu ku osi  $s$  po 33 min. i po 175 min. Po 2500 min, tj. około 42 h, krzywa staje się równoległa do osi czasów, następuje stabilizacja zwierciadła wody. Analiza tych wykresów wykazuje, że w wynikach opadania zwierciadła wody zawarty jest wpływ granic hydrogeologicznych, a mianowicie ujawniły się tu granice typu strukturalnego i zasilającego.

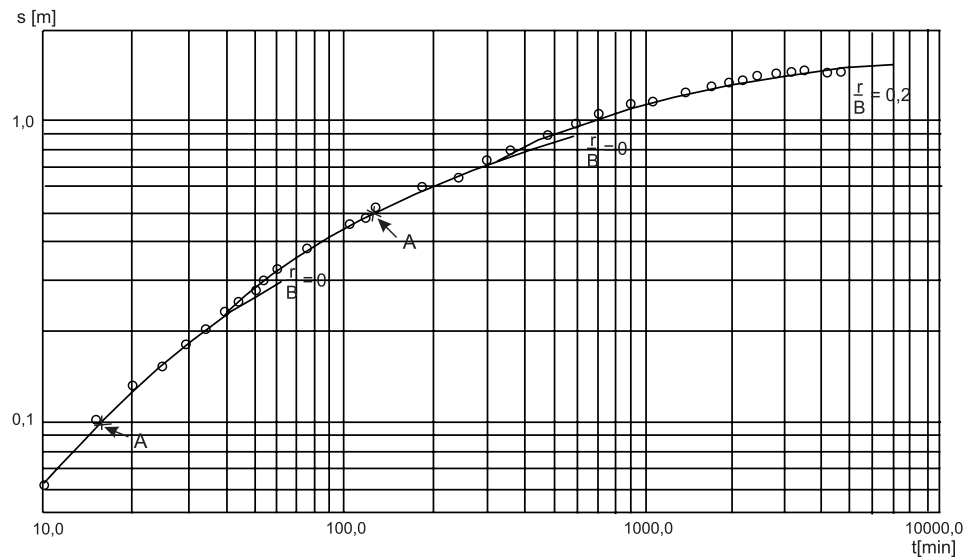
Wykresy (rys. 8.14 i 8.15) zinterpretowano w sposób następujący:

- pierwszy odcinek krzywej odzwierciedla rozwój leja w warstwie o największej miąższości, w której znajdują się otwory I i II; warstwa do czasu 33 min pompowania spełnia warunki schematu obliczeniowego Theisa;

- drugi odcinek krzywej odzwierciedla rozwój lej depresyjnego w warstwie o wydajnie zmniejszonej miąższości, warstwa jednak dalej spełnia warunki schematu Theisa;



Rys. 8.14. Wykres  $s = f(\lg t)$  dla otworu obserwacyjnego I (plejstocieńska dolina kopalna w rejonie Łągiewnik)



Rys. 8.15. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu obserwacyjnego I (plejstocieńska dolina kopalna w rejonie Łągiewnik)

- trzeci odcinek krzywej ujawnia równocześnie wpływ granic strukturalnych doliny kopalnej – odchylenie w górę od poprzedniego odcinka krzywej – i wpływ dopływu bocznego oraz przez przesiąkanie wzdłuż granicy doliny (krzywa 0,2).

To ostatnie zjawisko doprowadza do uzyskania stabilizacji zwierciadła wody po 42 h pompowania. Do interpretacji opisanego układu brak jest analitycznego schematu obliczeniowego. Można go jedynie uzyskać drogą sporządzenia modelu matematycznego badanego układu hydrogeologicznego. Obliczeń parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej dokonano więc tylko na podstawie analizy dwu pierwszych odcinków krzywej  $\lg s = f(\lg t)$  (rys. 8.15).

Obliczenia dla pierwszego odcinka krzywej według wzorów [5.2] i [5.3].

Dane:  $Q = 72 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 289 \text{ m}$ ,  $m = 32,0 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego:

$s = 0,1 \text{ m}$ ,  $t = 0,266 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,045$ ,  $z = 0,5$ .

Wyniki obliczeń:

$$T_1 = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{72,0 \cdot 0,045}{0,1} = 32,4 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{32,4 \cdot 0,266}{289^2 \cdot 0,5} = 0,00021,$$

$$k_1 = \frac{T_1}{m} = \frac{32,4}{32,0} = 1,0 \text{ m/h},$$

$$a = \frac{T_1}{\mu_s} = \frac{32,4}{0,0021} = 154285 \text{ m}^2/\text{h},$$

Obliczenia dla drugiego odcinka krzywej według wzorów [5.2] i [5.3].

Dane:  $Q = 72 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 289 \text{ m}$ ,  $m_2 = 15 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego:

$E(z) = 0,15$ ,  $z = 2,5$ ,  $s = 0,5 \text{ m}$ ,  $t = 2,16 \text{ h}$ .

Wyniki obliczeń:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{72,0 \cdot 0,15}{0,5} = 21,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{21,6 \cdot 2,16}{289^2 \cdot 2,5} = 0,00022.$$

Obliczona wartość przewodności według drugiego odcinka krzywej jest wartością średnią przewodności osadów wodonośnych całej doliny kopalnej. Natomiast otrzymany wynik obliczenia pierwszego odcinka krzywej dotyczy tylko partii środkowej osadów o największej miąższości, dlatego wartość przewodności na skrzydłach doliny kopalnej (rys. 8.13) można obliczyć z zależności:

$$T_2 = 2T - T_1 = 10,8 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Współczynnik filtracji wynosi więc:

$$k_2 = \frac{T_2}{m_2} = \frac{10,8}{15,0} = 0,72 \text{ m/h}.$$

**Interpretacja wyników dla otworu pompowanego nr II**

W studni nr II ujęto warstwę wodonośną na przelocie 15,3–30,5 m filtrem siatkowym o średnicy  $\phi$  299 mm z obsypką żwirową wykonaną w rurach  $\phi$  406 mm. Studnia jest studnią niezupełną, gdyż zafiltrowano 67% miąższości warstwy wodonośnej ( $m = 22,5$  m). W tabeli 8.1 podano wielkości depresji, pomierzonych w otworze pompowanym nr II w fazie opadania zwierciadła wody przez 75 h, w tabeli 8.2 zaś pomiary depresji resztkowej  $s'$  podczas powrotu zwierciadła wody po pompowaniu przez 18 h. Wykresy próbnego pompowania przedstawiono na rysunku 8.16.

Wykresy te zinterpretowano, podobnie jak dla otworu obserwacyjnego nr I, w sposób następujący:

- odcinek pierwszy krzywej do 3 minuty odzwierciedla wpływ pojemności studni i kształtowanie się zeskoku hydraulicznego na filtrze (brak tego odcinka w otworze obserwacyjnym);
- drugi odcinek odzwierciedla rozwój leja depresyjnego w warstwie o największej miąższości, w której założony został otwór nr I i II, a warstwa do 20–25 min pompowania spełnia warunki schematu obliczeniowego Theisa;

Tabela 8.1. Opadanie zwierciadła wody w otworze nr II w Łagiewnikach pompowanym z wydajnością 72 m<sup>3</sup>/h przez okres 75 h

$t$ [min]	$s$ [m]	$t$ [min]	$s$ [m]	$t$ [min]	$s$ [m]
0,17	1,45	13	1,98	180	2,51
0,33	1,75	15	2,00	240	2,57
0,50	1,75	16	2,01	300	2,65
0,67	1,77	18	2,02	360	2,71
1,00	1,79	20	2,03	480	2,77
1,50	1,81	25	2,08	600	2,83
2,00	1,82	30	2,1	720	2,88
2,50	1,83	35	2,13	1080	2,99
3,00	1,84	40	2,16	1380	3,05
3,50	1,86	45	2,18	1680	3,10
4,00	1,87	55	2,20	1920	3,14
4,50	1,88	60	2,24	2160	3,19
5,00	1,89	70	2,27	2400	3,20
6,00	1,91	80	2,30	2760	3,20
7,00	1,92	90	2,32	3120	3,20
8,00	1,93	100	2,36	3480	3,27
9,00	1,94	110	2,38	4500	3,27
10,00	1,95	120	2,41		
11,00	1,96	160	2,47		

Tabela 8.2. Wznios zwierciadła wody w otworze nr II w Łagiewnikach po pompowaniu tego otworu z wydajnością 72 m<sup>3</sup>/h przez okres 75 h

t [min]	s' [m]	t [min]	s' [m]	t [min]	s' [m]
0,17	0,77	11	1,88	70	2,18
0,33	1,32	12	1,89	80	2,21
0,50	1,56	13	1,90	90	2,23
1,00	1,72	14	1,91	100	2,25
1,50	1,74	15	1,92	117	2,30
2,00	1,75	20	1,95	120	2,32
3,00	1,77	25	1,98	180	2,43
4,00	1,78	30	2,02	240	2,52
5,00	1,80	35	2,04	300	2,59
6,00	1,82	40	2,07	360	2,64
7,00	1,83	45	2,09	480	2,74
8,00	1,84	50	2,11	600	2,81
9,00	1,85	55	2,13	720	2,85
10,00	1,87	60	2,15	1080	2,91

- trzeci odcinek krzywej do 90 min odzwierciedla dalszy rozwój lejka depresyjnego w warstwie o zmniejszonej miąższości, spełniający nadal warunki schematu Theisa;
- odcinek czwarty krzywej ujawnia w rozwoju lejka wpływ granic strukturalnych doliny kopalnej – wyraźne odchylenie wykresu w górę od poprzedniego odcinka.

Krzywe wzniosu w postaci  $s' = f(\lg t')$  potwierdzają wyżej opisany układ hydrodynamiczny pompowania. Do interpretacji całościowej opisanego układu brak jest analitycznego schematu obliczeniowego. Natomiast z uzyskanych krzywych można zinterpretować wielkość zeskoku zwierciadła wody przy znajomości parametru zasobności sprężystej z pompowania hydrowęzłowego  $\mu_s$ , z drugiego i trzeciego zaś odcinka krzywej parametrów przewodności oraz współczynnika filtracji.

Obliczenie parametrów filtracyjnych z 2 i 3 odcinków krzywych opadania i wzniosu metodą przybliżenia logarytmicznego.

Dane:  $Q = 72,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $c_1 = 0,29 \text{ m}$ ,  $c_2 = 0,45 \text{ m}$ ,  $m = 22,5 \text{ m}$

$$T_1 = \frac{0,183 \cdot 72,0}{0,29} = 45,4 \text{ m}^2/\text{h}, \quad k = \frac{45,4}{22,5} = 2,02 \text{ m}/\text{h},$$

$$T_2 = \frac{0,183 \cdot 72,0}{0,45} = 29,28 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Wynik obliczenia przewodności z drugiego odcinka krzywej dotyczy partii środkowej osadów o największej miąższości i korzystnej granulacji, z 3 odcinka zaś krzywej – średniej przewodności doliny kopalnej w rejonie otworu II.

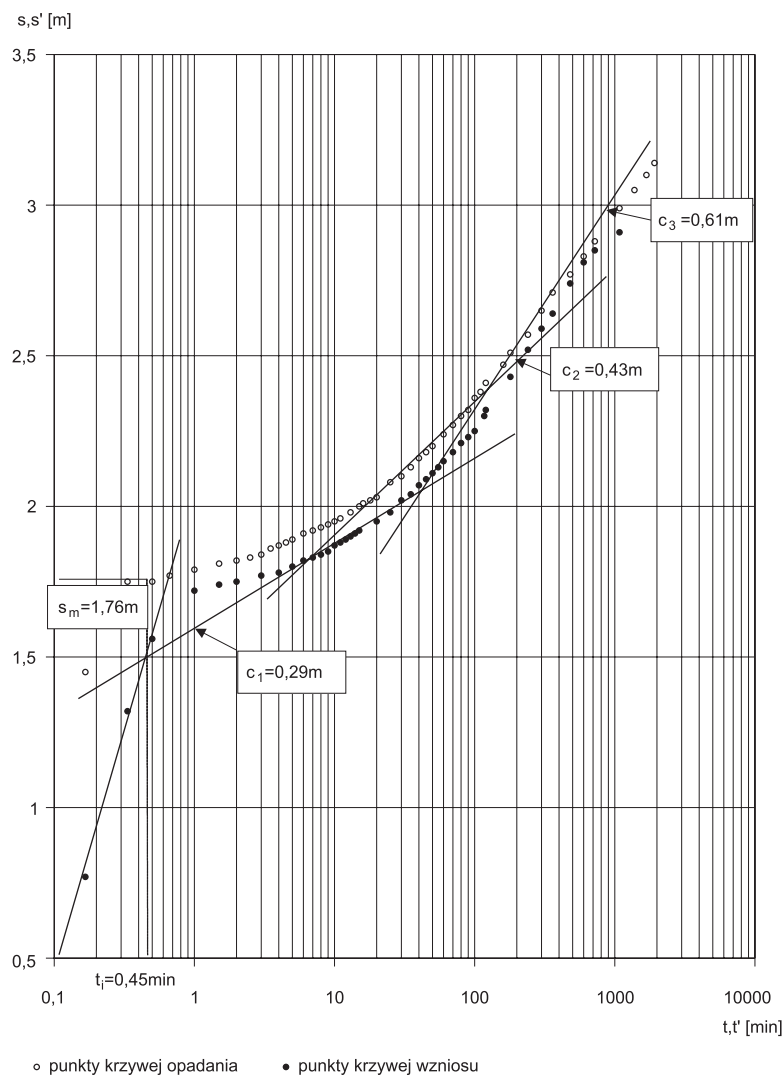


Wielkość przewodności poza partią środkową –  $T_x$  – można obliczyć z równania:

$$T_x = 2T_2 - T_1 = 2 \cdot 29,3 - 45,4 = 132 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Stąd współczynnik filtracji tych osadów wynosi dla  $m_x = 15,0\text{m}$ :

$$k_x = \frac{132}{15,0} = 0,88 \text{ m/h}.$$



Rys. 8.16. Wykresy  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$  dla otworu nr II pompowanego z wydajnością  $Q = 72 \text{ m}^3/\text{h}$  przez 75 h (plejstoczeńska dolina kopalna w rejonie Łagiewnik)

Uzyskane wyniki obliczeń parametrów filtracyjnych są generalnie zgodne z obliczeniami dla otworu obserwacyjnego, gdy uwzględni się zmienność miąższości i granulację osadów wodonośnych w tej strukturze.

**Obliczenie zeskoku zwierciadła wody.** Obliczenia tej wielkości dokonano z analizy krzywych opadania i wzniosu zwierciadła (rys. 8.16). Z krzywej wzniosu zwierciadła wody, z przecięcia się prostej przybliżenia logarytmicznego – odcinek 2, reprezentującego rozwój leja w warstwie zafiltrowanej, z odcinkiem pierwszym krzywej reprezentującym wypełnianie się pojemności studni z dopływu nieustalonego i likwidację zeskoku odczytano czas  $t_i = 0,45 \text{ min} = 0,0075 \text{ h}$ .

Ustalenie tego czasu z krzywej przy znajomości parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej przy długim pompowaniu pozwala ze wzoru [7.2] określić zeskok  $\Delta s$ :

$$\Delta s = s_m - s_t = s_m - \frac{0,183 \cdot Q}{T} \cdot \lg \frac{2,25Tt}{r_0^2 \cdot \mu_s}$$

gdzie:

$$Q = 72,0 \text{ m}^3/\text{h},$$

$$T = 45,4 \text{ m}^2/\text{h} \text{ – z obliczeń drugiego odcinka krzywych},$$

$$\mu_s = 0,00021 \text{ – z obliczeń pompowania hydrowęzłowego},$$

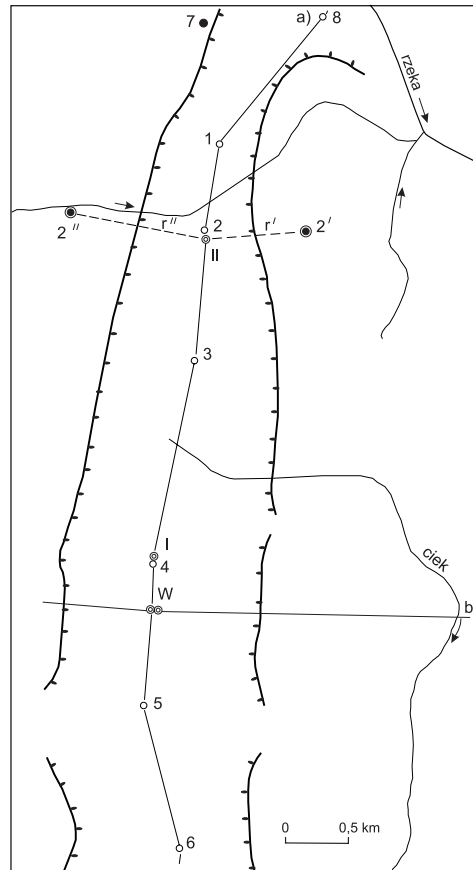
$$t_i = 0,0075 \text{ h},$$

$$s_m = 1,76 \text{ m}.$$

$$\Delta s = 1,76 - \frac{0,183 \cdot 72,0}{45,4} \cdot \lg \frac{2,25 \cdot 45,4 \cdot 0,0075}{0,203^2 \cdot 0,00021} = 1,76 - 1,43 = 0,33 \text{ m}.$$

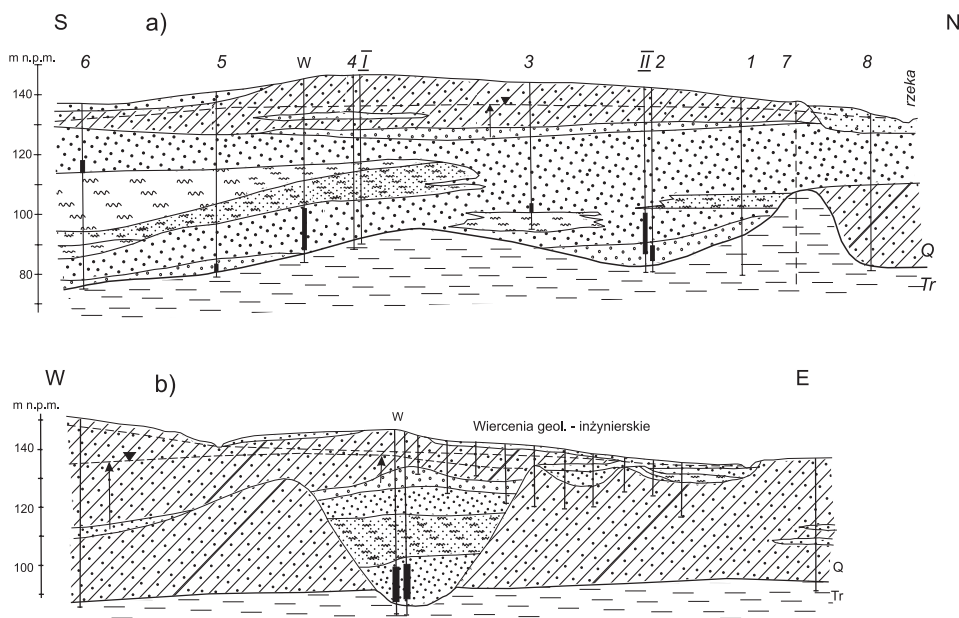
**Przykład 3. Dolina kopalna w rejonie Gorzyce–Lamki–Świeligów koło Ostrowa Wlkp.** – wpływ granic strukturalnych i okna hydrogeologicznego. Na międzyrzeczu Baryczy i Ołoboku (lewobrzeżny dopływ Proсны) rozpoznano w latach 1973–1975 dolinę kopalną o szerokości kilkuset metrów i długości ponad 10 km (rys. 8.17).

Badania przeprowadziło Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania. Przewodzący badania: Jan Przybyłek, Janusz Wojciechowski i Anna Zielińska. Badana dolina kopalna przebiega południkowo przez wysoczyznę. Najpierw wykonano zdjęcie elektrooporowe, na podstawie którego wyznaczono granice zasięgu struktury wodonośnej. Następnie odwiercono wzdłuż jej osi 8 wierceń poszukiwawczych (1–8), w których założono piezometry oraz 2 otwory rozpoznawcze I i II. Otwór rozpoznawczy I odwiercono w odległości  $r = 48 \text{ m}$  od piezometru 4 i w odległości  $r = 430 \text{ m}$  od istniejącego już ujęcia W (jedna studnia wraz z otworem awaryjnym). Otwór rozpoznawczy II odwiercono w rejonie Świeligowa w odległości  $r = 50 \text{ m}$  od piezometru 2 w miejscu, gdzie dolina kopalna ma mniejszą szerokość. Sytuację wykonanych otworów przedstawiono na rysunku 8.17, a budowę geologiczną obszaru na rysunku 8.18. Jak wynika z przekrojów geologicznych, dolina kopalna jest głęboko wcięta w podłoże. W jej dnie występują ility serii poznańskiej górnego miocenu i pliocenu, a w krawędziach starsze gliny zwałowe. Warstwą napinającą zwierciadło wody jest pokład młodszych glin zwałowych. W



Rys. 8.17. Plejstocenska dolina kopalna w rejonie Gorzyce-Lamki-Świeligów na międzyrzeczu Baryczy i Ołoboku

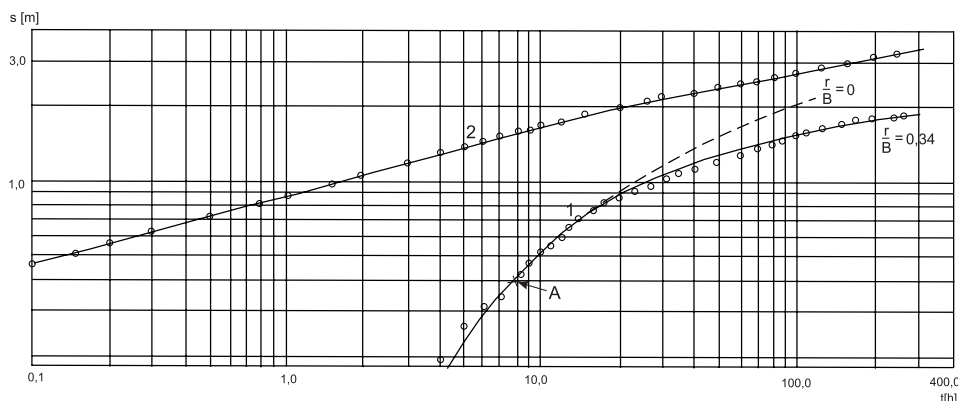
stronę doliny Ołoboku dolina kopalna ma otwarcie w postaci okna hydrogeologicznego. Ku dolinie rzeki Baryczy (w stronę otworu nr 6) osady wodonośne ulegają rozwarstwieniu na skutek pojawienia się w ich partii środkowej przewarstwień osadów mułkowych. Jako przykład doświadczalny przytacza się próbne pompowanie otworu rozpoznawczego II. Otwór ten pompowano przez okres 265 godzin ze stałą wydajnością  $Q = 145 \text{ m}^3/\text{h}$ . Wykresy doświadczalne  $\lg s = f(\lg t)$ , wykreślone na podstawie obserwacji opadania zwierciadła wody w piezometrach 1 i 2, przedstawiono na rysunku 8.19. Wykres doświadczalny sporządzony na siatce podwójnie logarytmicznej dla piezometru 2, położonego blisko otworu pompowanego, bo w odległości zaledwie  $r = 50 \text{ m}$ , jest linią zbliżoną do prostej, co oznacza wpływ więcej niż jednej granicy nieprzepuszczalnej na wartość mierzonej depresji i jest dowodem potwierdzającym wyniki badań geofizycznych co do istnienia granic struktury. Wykres doświadczalny dla piezometru 1, położonego w dużej odległości od otworu pompowanego  $r = 740 \text{ m}$ , ma zupełnie inną postać i został zinterpretowany



Rys. 8.18. Przekroje geologiczne doliny kopalnej w rejonie Gorzyce-Lamki-Świeligów

wany jako funkcja Hantusha (Waltona)  $\frac{r}{B} = 0,34$ , czyli funkcja przesiąkania. Ta różnorodność postaci wykresów wynika z odmiennego położenia piezometrów względem otworu pompowanego i granic (rys. 8.17). Piezometr 1 jest położony w odległości zbliżonej do szerokości doliny kopalnej w tej strefie i dlatego też z tak dużej odległości odbiera już od samego początku swojej reakcji wpływ granic nieprzepuszczalnych jako efekt współdziałania studni rzeczywistej 2 oraz dwóch studni fikcyjnych (2' i 2''), zastępujących te granice (rys. 8.17). Jest to zgodne z teorią odbić zwierciadłanych Ferrisa (p. rozdz. 2.5). Zgodnie z tą teorią obniżenie się zwierciadła wody w piezometrze 1 jest wywołane wydajnością trzykrotnie wyższą od rzeczywistości pompowanej i trzeba to uwzględnić w obliczeniach przy interpretacji wykresu doświadczalnego. Z dalszej analizy wykresu doświadczalnego na tle istniejącego stanu rozpoznania badanej struktury wodonośnej wynikało, że odchylenie wykresu doświadczalnego od postaci wykresu funkcji Theisa i przyjęcie postaci wykresu funkcji Hantusha (Waltona)  $\frac{r}{B} = 0,34$  po 15 h trwania pompowania jest wywołane osiągnięciem przez lej depresyjny rejonu doliny Ołoboku, gdzie istnieje okno hydrogeologiczne (patrz: rys. 8.18a – otwór nr 8 na przekroju geologicznym).

Po uwzględnieniu przytoczonej wyżej interpretacji obliczenia parametrów filtracyjnych są następujące:



Rys. 8.19. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów obserwacyjnych 1 i 2 w czasie pompowania hydrowęzła II (plejstocenska dolina kopalna w rejonie Gorzyce-Lamki-Swieligów)

Dane:  $Q = 145 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 740 \text{ m}$ ,  $\frac{r}{B} = 0,34$ , współrzędne punktu arbitralnego:

$s = 0,38 \text{ m}$ ,  $t = 7,6 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,04$ ,  $z = 0,45$ .

Obliczenia:

- przewodność według wzoru [5.2]:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{145 \cdot 3}{0,38} \cdot 0,04 = 45,9 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik odsączalności sprężystej według wzoru [5.3]:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{45,9 \cdot 7,6}{740^2 \cdot 0,45} = 0,0014,$$

- współczynnik piezoprzewodności według wzoru [5.4]:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{r^2 z}{t} = \frac{740^2 \cdot 0,45}{7,6} = 32324 \text{ m}^2/\text{h},$$

- zasięg ustalonego leja depresji według wzoru [2.20]:

$$R = 1,12 B = 1,12 \cdot 2180 \text{ m} = 2440 \text{ m}.$$

Wykonany po próbnym pompowaniu wykres wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym miał dwa załamania, co również było dowodem na oddziaływanie dwu granic nieprzepuszczalnych badanej struktury.

## 8.4. Warstwy wodonośne w dolinach rzek

Przy próbnym pompowaniu z warstw wodonośnych w pobliżu koryt rzecznych uzyskuje się prawie natychmiastową stabilizację dynamicznego zwierciadła wody albo stabilizację tę osiąga się po kilkunastu godzinach trwania filtracji nieustalanej. W skrajnych przypadkach, gdy dno rzeki jest częściowo skolmatowane,

stabilizację dynamicznego zwierciadła wody uzyskuje się po kilkudziesięciu godzinach trwania pompowania. Ogólnie można przyjąć, że szybkość uzyskania stabilizacji zależy:

- od stosunku szerokości rzeki do miąższości warstwy wodonośnej,
- od stopnia więzi hydraulicznej danej warstwy z rzeką,
- od stopnia skolmatowania osadów w dnie rzeki.

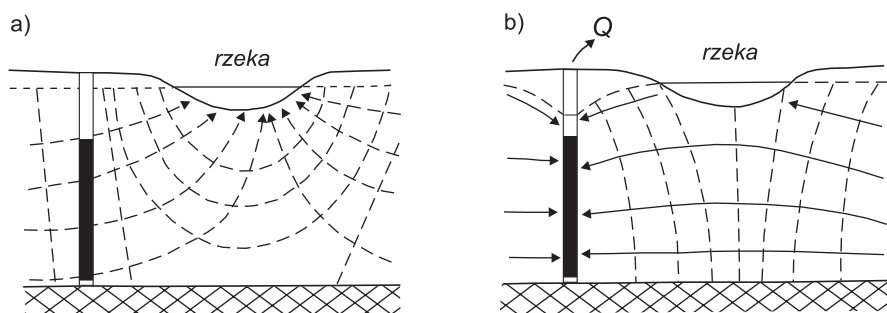
Wydajność studni eksploatowanej w warstwie wodonośnej połączonej hydraulicznie z rzeką pochodzi z zasobów warstwy wodonośnej oraz z infiltracji wody rzeki. Właśnie ten dodatkowy bliski dopływ wywołuje efekt stabilizacji dynamicznej zwierciadła wody w pompowaniu.

Poczynione obserwacje wskazują jednak, że w wielu przypadkach pompowań w pobliżu rzek drenujących szybka stabilizacja dynamicznego zwierciadła wody jest wywołana przede wszystkim kaptazem wód podziemnych, dopływających od strony przeciwnego brzegu, a nie filtracją wód rzecznych. Zjawisko to obserwuje się wtedy, gdy wywołana przy rzece depresja w warstwie wodonośnej nie przekracza pierwotnej różnicy ciśnień strefy drenażu (rys. 8.20). Istnienie przewarstwień słabo przepuszczalnych w stropowych partiach aluwiów, przy niezupełnym wcięciu koryta rzecznego w warstwę wodonośną lub częściowym jego zaileniu, jest przyczyną występowania podwyższonych oporów hydraulicznych w infiltracji brzegowej. Znajomość wartości tych oporów jest konieczna przy obliczaniu zasobów ujęć brzegowych. Wielkość oporu hydraulicznego koryta rzeki i stropowych partii aluwiów jest wyrażona zależnością (Szestakow, 1965):

$$\Delta L = \sqrt{\frac{km \cdot m_o}{k_o}} \operatorname{cth} \left( b \sqrt{\frac{k_o}{km \cdot m_o}} \right) \quad [8.1]$$

gdzie:

$k_o, m_o$  – współczynnik filtracji i miąższość osadów w dnie rzeki lub odpowiednio w stropowej partii aluwiów,  
 $b$  – szerokość rzeki.



Rys. 8.20. Kaptaz strumienia wód podziemnych przy pompowaniu otworów w pobliżu rzek drenujących (Przybyłek, 1977)

a – naturalny stan hydrodynamiczny, b – stan hydrodynamiczny wymuszony pompowaniem

Wartość pod znakiem pierwiastka we wzorze [8.1] po porównaniu ze wzorem [2.29] okazuje się współczynnikiem ustalonego przesiąkania  $B$  w funkcji Hantusha. Dlatego też wartość  $\Delta L$  można wyznaczyć z próbnych pompowań hydrowęzłów brzegowych pod warunkiem, że wykres  $s = f(\lg t)$  dla piezometru od strony rzeki wykazuje postać funkcji Hantusha (Waltona)  $\frac{r}{B} > 0$ , z której można obliczyć wartość  $B$ . Dlatego też wzór [8.1] można zapisać w postaci:

$$\Delta L = B \operatorname{cth} \left( \frac{b}{B} \right). \quad [8.2]$$

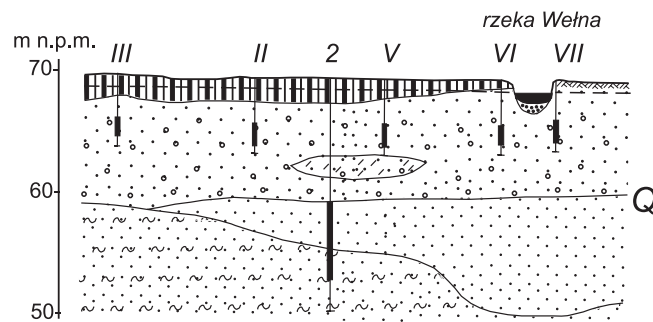
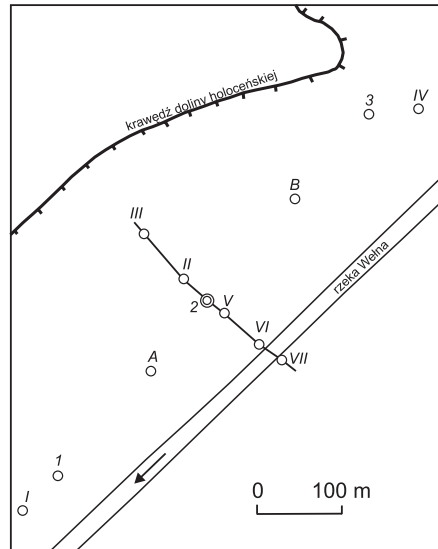
Poniżej przedstawia się przykłady próbnych pompowań przeprowadzonych: w pobliżu małej rzeki, w pobliżu dużej rzeki oraz w warunkach całkowicie zakolmatowanego koryta rzeczno-

**Przykład 1. Pompowanie hydrowęzłowe w pobliżu małej rzeki.** Jako przykład wybrano pompowanie hydrowęzłowe holocenińskiej warstwy wodonośnej doliny Wełny w rejonie Rogoźna. Badanie wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania w 1972 r. Prowadzący badanie: Stanisław Dąbrowski, Eugenia Zboralska. Szkic sytuacyjny oraz przekrój geologiczny hydrowęzła przedstawia rysunek 8.21. Pompowanie hydrowęzłowe miało na celu określenie parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej oraz jej związków z Wełną.

Warstwę wodonośną stanowią piaski, piaski ze żwirem oraz żwiry o miąższości 8–17 m, przykryte lokalnie warstwą torfów o grubości do 2 m. Osady te leżą na piaskach mułkowatych i mułkach plejstocenijskich, które wypełniają rynnę lodowcową. W badanym rejonie przez środek tarasu holocenijskiego o szerokości około 0,5 km przepływa skanalizowana rzeka Wełna. Jej szerokość wynosi 12 m, głębokość 0,5–1,0 m.

W stanie naturalnym rzeka drenuje opisywaną warstwę wodonośną, która ma w obrębie tarasu charakter lekko naporowy ze względu na występujące od powierzchni torfy. Rzeka na skutek skanalizowania nie eroduje, lecz składa na dnie materiał piaszczysto-mułasty. Miąższość osadów dennych wynosi 0,5–1,0 m. Pompowany otwór 2 odległy był o 75 m od rzeki. Odległość otworów obserwacyjnych od otworu 2 podano w tabeli 8.3. Otwór 2 pompowano z wydajnością  $74,5 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  przez okres 24 h, wykonując pomiary zalegania zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych i w rzece. Wyniki obserwacji na trzech promieniach hydrowęzłowych zestawiono w tabeli 8.1. Po około 20 h pompowania nastąpiła stabilizacja dynamicznego zwierciadła wody w obrębie leja depresyjnego, który uzyskał kształt wydłużonej elipsy o osi dłuższej – 1 km i krótszej – 300 m. Wyniki pompowania zinterpretowano, wykonując wykresy  $s = f(\lg r)$ ,  $s = f(\lg t)$  i  $\lg s = f(\lg t)$ . Poniżej przedstawia się wyniki obliczeń według interpretacji metodą Dupuita-Thiema dla linii piezometrów V–A–1–I (rys. 8.22) i wyniki interpretacji wykresów  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów V, VI, VII na promieniu prostopadłym do rzeki (rys. 8.21).

Interpretacja wykresu  $s = f(\lg r)$  według metody Dupuita-Thiema – obliczenie średniej przewodności na promieniu hydrowęzła (rys. 8.22).



Rys. 8.21. Szkic sytuacyjny hydrowęzła i przekrój geologiczny doliny Wełny w rejonie Rogoźna Wlkp.

Dane:  $Q = 74,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $c = 0,93 \text{ m}$ .

Przewodność według wzoru [5.5]:

$$T = \frac{0,366Q}{s} = \frac{0,366 \cdot 74,5}{0,93} = 29,3 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Interpretacja wykresów  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów V, VI i VII podano na rysunku 8.23. Wykresy te wykazują, że w polu filtracji objętym obserwacją do 5–10 h trwała filtracja nieustalona. Najszybciej zwierciadło wody zaczęło się stabilizować w otworze VII, położonym za rzeką, najpóźniej zaś w otworze V, położonym najbliższej otworu pompowanego. Przejście z fazy nieustalonej w fazę ustaloną ma tu charakter zróżnicowany, zbliżony do krzywej przesiąkania Hantusha (Waltona)  $\frac{r}{B} = 0,1$



Tabela 8.3. Opadanie zwierciadła wody w czasie pompowania otworu 2 z  $Q = 74,5 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$  w dolinie Wełny

Numery otworów	I	1	A	2	B	3	IV	V	VI	rzeka	VII
Odległość od otworu pompowanego [m]	325,0	275,0	137,0	0,0	89,0	232,0	280,0	20,1	71,7	75,0	89,2
Rzędna zwierciadła wody przed pompowaniem [m]	68,57	68,60	68,66	68,68	68,75	68,81	68,71	68,65	68,64	68,61	68,64
Czas	Depresja [m]										
1 min	0,00	0,00	0,00	0,72	0,01	0,00	0,00	0,07	0,00	0,0	0,00
2 min	0,00	0,00	0,10	1,37	0,025	0,00	0,00	0,19	0,01	0,0	0,00
5 min	0,00	0,00	0,07	1,55	0,05	0,00	0,00	0,35	0,03	0,0	0,00
10 min	0,00	0,00	0,12	1,70	0,07	0,01	0,00	0,48	0,08	0,0	0,01
30 min	0,02	0,04	0,25	1,86	0,17	0,03	0,00	0,66	0,18	0,0	0,03
1 h	0,02	0,05	0,31	1,96	0,24	0,06	0,00	0,79	0,24	0,0	0,07
5 h	0,06	0,10	0,43	2,13	0,36	0,13	0,01	1,07	0,38	0,0	0,21
10 h	0,09	0,12	0,48	2,17	0,40	0,16	0,02	1,15	0,42	0,0	0,23
20 h	0,09	0,16	0,52	2,19	0,43	0,20	0,02	1,21	0,44	0,0	0,24
24 h	0,09	0,16	0,53	2,19	0,43	0,20	0,01	1,22	0,47	0,0	0,23

dla piezometrów V i VI, oraz nagły, charakterystyczny dla przechwycenia strumienia drenażu wód z drugiej strony rzeki dla piezometru VIII, położonego po tamtej stronie. Analiza wykresów (rys. 8.23) wykazuje zgodność pierwszych odcinków wykresów z krzywą teoretyczną Theisa i według tej metody obliczono parametry.

Obliczenia parametrów filtracyjnych według wzorów [5.2] i [5.3]:

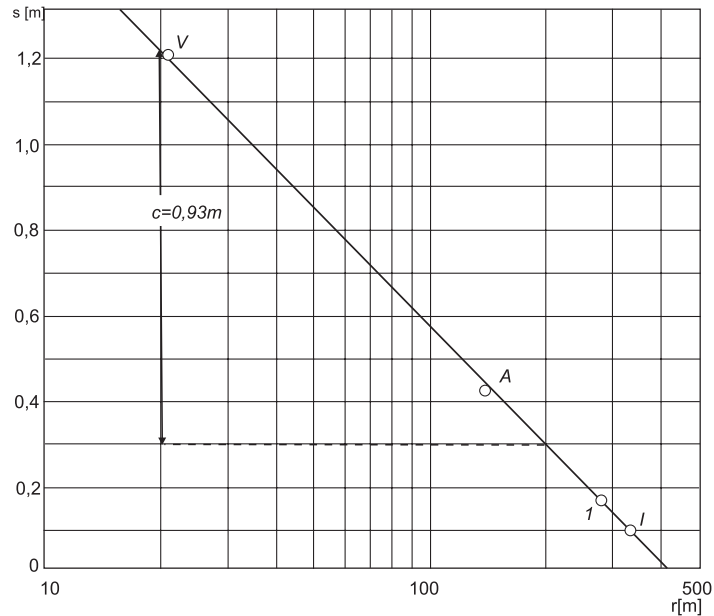
– obliczenia dla otworu V:

Dane:  $Q = 74,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 20,1 \text{ m}$ ,  $E(z) = 0,1$ ,  $z = 1,0$ ,  $s = 0,247 \text{ m}$ ,  $t = 0,047 \text{ h}$ .

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{74,5 \cdot 0,1}{0,247} = 30,2 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{30,2 \cdot 0,047}{20,1^2 \cdot 1,0} = 0,0035,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{30,2}{0,0035} = 8630 \text{ m}^2/\text{h},$$



Rys. 8.22. Wykres  $s = f(\lg r)$  dla promienia V-A-1-I: równoległego do rzeki (hydrowęzeł w dolinie Wełny)

- obliczenia dla otworu VI:

Dane:  $Q = 74,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 71,7 \text{ m}$ ,  $E(z) = 0,1$ ,  $z = 1,0$ ,  $s = 0,123 \text{ m}$ ,  $t = 0,275 \text{ h}$ .

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{74,5 \cdot 0,1}{0,123} = 60,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{60,6 \cdot 0,275}{71,7^2 \cdot 1,0} = 0,00324,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{60,6}{0,00324} = 18700 \text{ m}^2/\text{h}.$$

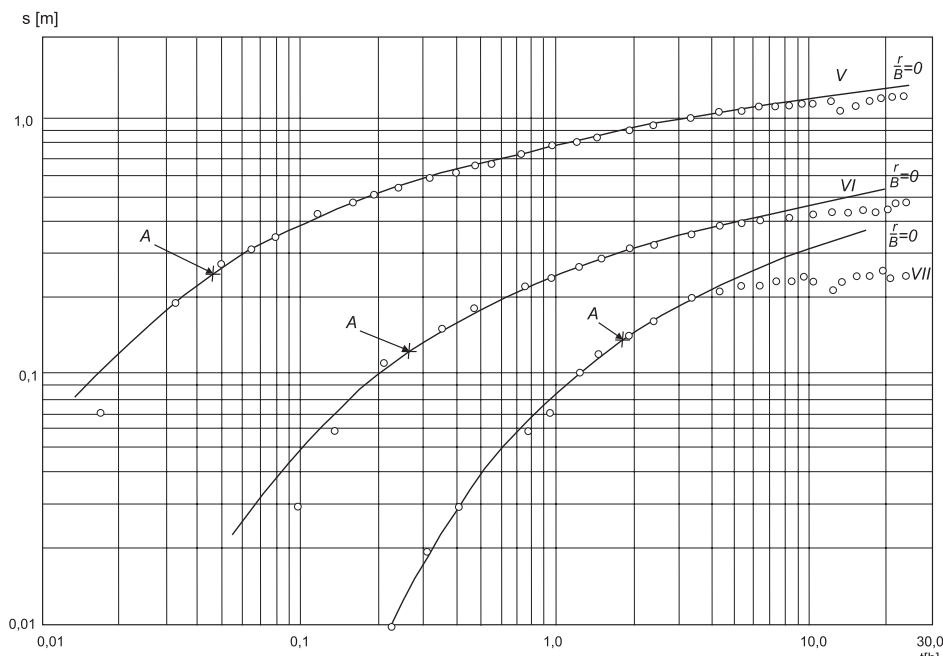
- obliczenia dla otworu VII:

Dane:  $Q = 74,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 89,2 \text{ m}$ ,  $E(z) = 0,1$ ,  $z = 1,0$ ,  $s = 0,147 \text{ m}$ ,  $t = 1,87 \text{ h}$ :

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{74,5 \cdot 0,1}{0,147} = 50,7 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{50,7 \cdot 1,87}{89,2^2 \cdot 1,0} = 0,012,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{50,7}{0,012} = 4225 \text{ m}^2/\text{h}.$$



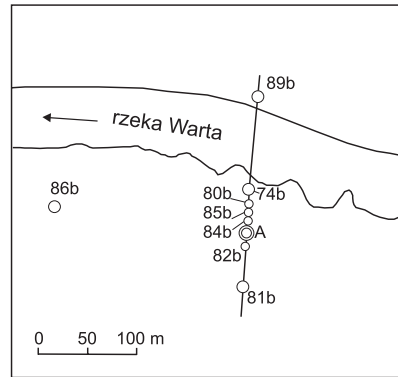
Rys. 8.23. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów V, VI i VII na promieniu prostopadłym do rzeki (hydrowęzeł w dolinie Wełny)

Wykazane zróżnicowanie wartości przewodności na linii otworów V–VII jest spowodowane przede wszystkim zmianą granulacji osadów, w mniejszym stopniu zmianą jej miąższości.

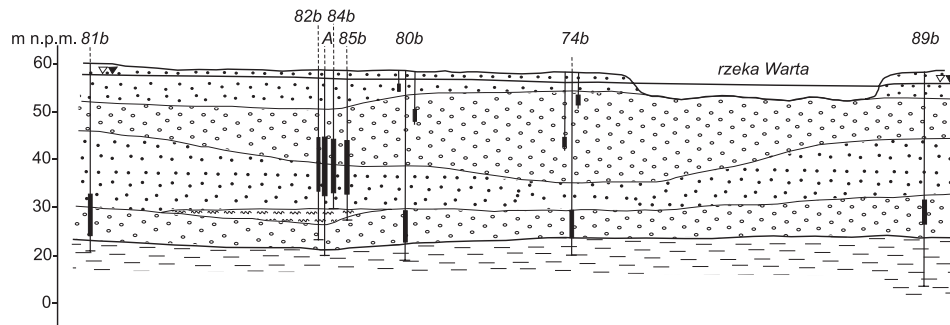
**Przykład 2. Pompowanie hydrowęzłowe w pobliżu dużej rzeki.** Jako przykład wybrano pompowanie hydrowęzła brzegowego „A”, wykonanego w obrębie tarasu zalewowego rzeki Warty w rejonie Krajkowa (rys. 8.24). Badania wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania w 1973 r. Prowadzący badania: Jan Przybyłek, Jerzy Szenic, Włodzimierz Matuszak. Czwartorzędowa warstwa wodonośna w obrębie tarasu zalewowego Warty w rejonie Krajkowa ma swobodne zwierciadło wody. W okresie trwania stanów niskich wód miąższość warstwy wynosi 30–35 m (rys. 8.25).

Opisywana warstwa wodonośna nie jest jednorodna w pionie i składają się na nią:

- przypowierzchniowe piaski drobnoziarniste i pylaste do głębokości 4–8 m; w obrębie tej warstwy wycięte jest współczesne koryto rzeki,
- stropowe żwiry i pospółki występujące w przedziale głębokości od 5–8 m do 20–26 m,
- środkowe piaski drobno- i średnioziarniste w przedziale od 15–22 m do 30–32 m, dobrze wysortowane i obtoczone,
- spągowe żwiry i pospółki, leżące na łałach trzeciorzędowych na głębokości 26–30 m, o miąższości od 3 do 8 m, w ich stropie stwierdzono lokalnie przewarstwienia mułków i piasków pylastych.



Rys. 8.24. Szkic sytuacyjny hydrowęzła A w dolinie Warty w rejonie Krajkowa



Rys. 8.25. Przekrój geologiczny hydrowęzła brzegowego A na tarasie zalewowym Warty w rejonie Krajkowa

W czasie pompowania hydrowęzła A, położonego w odległości 65 m od rzeki Warty, uzyskano bardzo szybko stabilizację dynamicznego zwierciadła wody, bo już po 1/2 h trwania pompowania z  $Q = 250 \text{ m}^3/\text{h}$ . Zestawienie pomiarów depresji w otworach obserwacyjnych podano w tabeli 8.4, a na rysunku 8.26 przedstawiono wykonany na podstawie tych pomiarów wykres  $s = f(\lg r)$ . Na podstawie tego wykresu przeprowadzono obliczenia parametrów filtracyjnych według metody Dupuita-Thiema.

Obliczenia:

Dane:  $Q = 250 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $c = 1,68 \text{ m}$ ,  $H = 32 \text{ m}$ .

- przewodność według wzoru [5.5]:

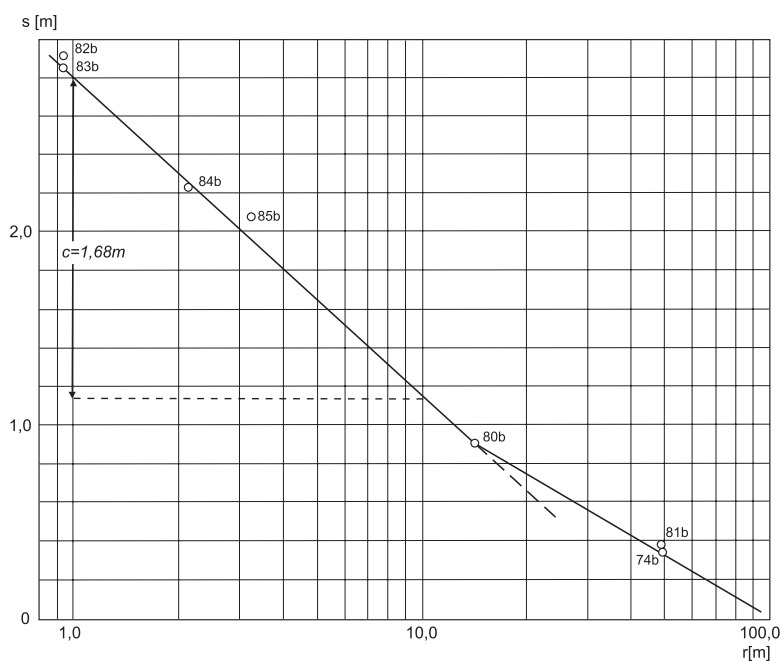
$$T = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 250}{1,68} = 54,5 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{H} = \frac{54,5}{32} = 1,7 \text{ m/h}.$$

Tabela 8.4. Pomiary depresji zwierciadła wody w studni i otworach obserwacyjnych na promieniach hydrowężła A w dolinie Warty

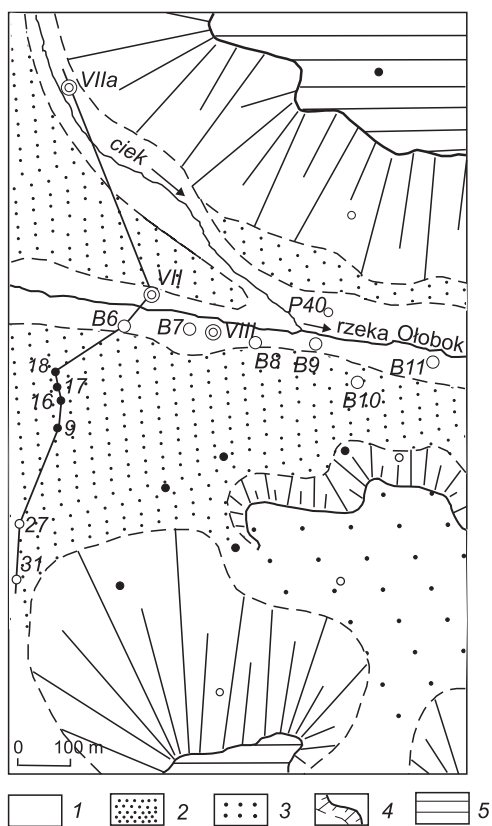
Odległości, zafiltrowanie i depresje zwierciadła wody [m]	Studnia A	Otwory obserwacyjne na promieniach						
		Od rzeki		Do rzeki				
		82b	81b	83b	84b	85b	80b	74b
Odległość w m	0	0,95	50,0	0,95	2,13	3,25	14,5	49,6
Filtr od – do [m]	14–26	14–26	27–37	14–26	14–26	14–26	8–12,5	29–34
Czas		Depresja zwierciadła wody [m]						
1 h	4,22	2,88	0,26	2,76	2,07	1,81	0,73	0,23
3 h	4,26	2,87	0,26	2,82	2,22	2,01	0,81	0,32
25 h	4,42	3,05	0,35	2,99	2,31	2,07	0,97	0,34
50 h	4,20	2,92	0,37	2,85	2,23	2,08	0,91	0,35

Rys. 8.26. Wykres  $s = f(\lg r)$  (hydrowężel w dolinie Warty)

Szybka stabilizacja przepływu w podanym pompowaniu nastąpiła głównie na skutek przechwycenia strumienia wód podziemnych z przeciwległego brzegu, ponieważ spowodowana tym pompowaniem różnica ciśnień w brzegu rzeki była za mała dla wywołania przepływu wody rzecznej do warstwy. Depresja ta była bowiem zbliżona do pierwotnej różnicy ciśnień między spągiem warstwy wodonośnej a rzeką.

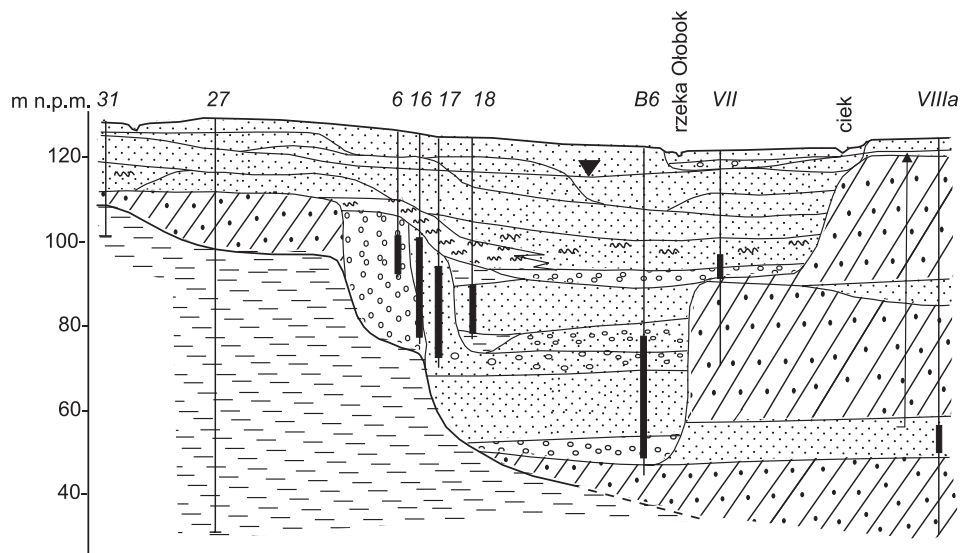
**Przykład 3. Pompowanie hydrowęzłowe w pobliżu rzeki o skolmatowanym korycie.** Jako przykład wybrano pompowanie hydrowęzłowe otworu VIII w dolinie Ołoboku w Ostrowie Wlkp. (rys. 8.27). Badania przeprowadziło Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania. Prowadzący badania: Jan Przybyłek, Janusz Wojciechowski i Anna Zielińska.

Na rysunku 8.28 przedstawiono przekrój geologiczny doliny w rejonie hydrowęzła. Dno doliny Ołoboku ma szerokość 1 km. Szerokość tarasu holocenijskiego nie przekracza 0,5 km. Ołobok jest małą rzeką o szerokości koryta 2,5–5 m, uregulowaną, ujętą w system jazów i przepustów. Podstawowym rysem budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych jest osiowa zgodność przebiegu współczesnej doliny Ołoboku z doliną kopalną z interglacjału wielkiego. Szerokość tej ostatniej wynosi 400–500 m. Zgodność obu struktur wodonośnych zadecydowała o istnieniu dwóch warstw wodonośnych piętra czwartorzędowego, przedzielonych osadami mułkowymi z interglacjału eemskiego (rys. 8.28). Starsza dolina jest głęboko wcięta w osady ilów trzeciorzędowych (seria poznańska) lub w starsze gliny zwałowe. Wypełniają ją żwiry i piaski średnio- i gruboziarniste o łącznej miąższości do 50 m i współczynniku filtracji 1–3,5 m/h. Przypowierzchniową war-



Rys. 8.27. Szkic sytuacji hydrowęzła VIII w dolinie Ołoboku

1 – taras zalewowy, 2 – taras środkowy, 3 – taras wysoki, 4 – krawędzie doliny, 5 – wysoczyzna



Rys. 8.28. Przekrój geologiczny doliny Ołoboku

stwę wodonośną stanowią piaski drobno- i średnioziarniste, a także pylaste o całkowitej miąższości 20–30 m. Miąższość osadów mułkowych rozdzielających obie warstwy wodonośne wynosi kilka metrów, a miejscami całkowicie ich brak. Koryto rzeki na odcinku objętym badaniem jest zakolmatowane.

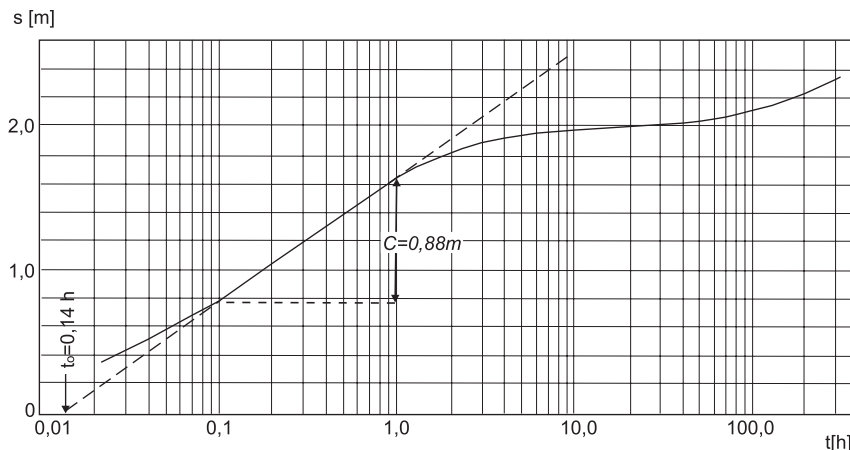
Na rysunku 8.29 przedstawiono wykres wskaźnikowy dłuższego pompowania hydrowęzłowego otworu VIII, a na rysunku 8.30 wykresy doświadczalne  $\lg s = f(\lg t)$ . Otwór VIII pompowano przez 386 godzin z  $Q = 201 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ . Wykres wskaźnikowy sporządzony dla piezometru B7, odległego od otworu pompowanego o 50 m składa się z 3 odcinków, które kolejno odzwierciedlają:

**pierwszy** – szybki rozwój lejki depresji w drugiej warstwie wodonośnej w warunkach reżimu sprężystego – po godzinie pompowania stwierdzono zasięg lejki ponad 600 m,

**drugi** – prześiąkanie ze strefy nadległej, dające okresowe spłaszczenie wykresu,

**trzeci** – reakcję całego kompleksu wodonośnego w warunkach odsączania grawitacyjnego, co przejawia się ponownym wzrostem nachylenia wykresu.

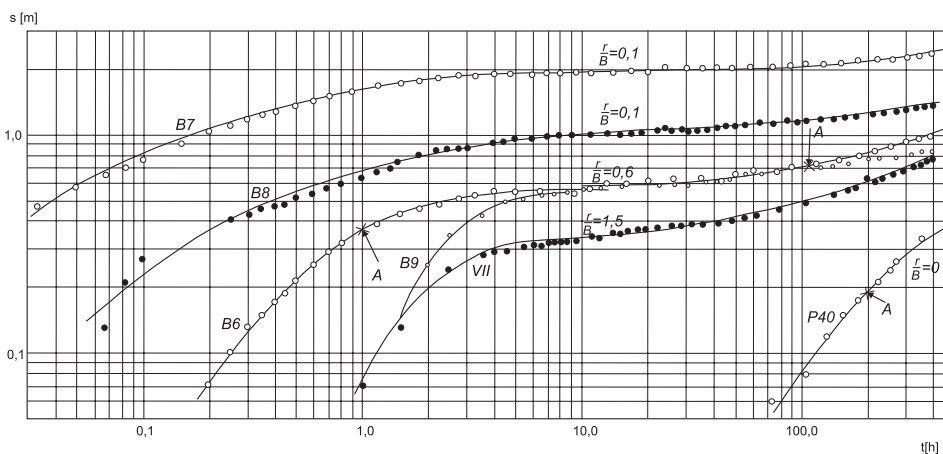
Tak więc uzyskany wykres wskaźnikowy jest charakterystyczny dla schematu obliczeniowego opisanego przez Boultona i dlatego wg nomogramu wykresów wzorcowych tego autora (plansza IV) przeprowadzono interpretację wykresów doświadczalnych (rys. 8.30). Analizą objęto wykresy sporządzone z obserwacji wykonanych w sześciu otworach obserwacyjnych, położonych w różnych odległościach od pompowanego otworu  $r$ : od 50 m do 700 m. Wykresy dla otworów B7 i B8, zlokalizowanych na wschód od otworu pompowanego, odpowiadają krzywym wzorcowym  $\frac{r}{B_1} = 0,1$ , co jest związane ze wzrostem miąższości serii osadów słabo przepuszczalnych, rozdzielającej warstwy wodonośne. Położony w kierunku za-



Rys. 8.29. Wykres  $s = f(\lg t)$  dla piezometru B7 (pompowanie hydrowęzłowe studni VIII w dolinie Ołoboku)

chodnim otwór B6, charakteryzuje krzywa  $\frac{r}{B_1} = 0,6$ , co wskazuje na istnienie okna hydrogeologicznego w jego rejonie.

Z kolei wykresy dla otworów: VII i B9, położonych w strefach krawędziowych doliny kopalnej, mają wyraźnie odmienne, bardziej strome pierwsze odcinki, co jest związane z wpływem granic strukturalnych. Następnie jednak zaczyna przeważać proces przesiąkania i wykresy te upodabniają się do już uprzednio opisanych. Dowodem na zasilenie warstwy w głębszej z warstwy przypowierzchniowej jest reakcja otworu P40, położonego po przeciwległej stronie rzeki, a którego filtr założony jest w pierwszej warstwie wodonośnej – na głębokości 12 m. Otwór ten zareagował dopiero po 70 h pompowania, a sporządzony dla niego wykres odpowiada



Rys. 8.30. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla obserwowanych piezometrów B6, B7, B8, B9, VII, P40 (pompowanie hydrowęzłowe studni VIII w dolinie Ołoboku)



wykresowi Theisa dla warstwy o swobodnym zwierciadle wody. Poniżej podaje się obliczenia parametryczne dla wybranych otworów.

Wykres dla otworu B6 typu  $\frac{r}{B_1} = 0,6$ ;  $r = 360$  m; nomogram funkcji Boultona

(plansza IV).

Dane dla pierwszego odcinka krzywej – typ A:

$Q = 201$  m<sup>3</sup>/h, współrzędne punktu arbitralnego:  $s = 0,36$  m,  $t = 1,0$  h,

$$W\left(u_A, \frac{r}{B_1}\right) = 1,0, \quad \frac{1}{u_A} = 5,0.$$

Obliczone parametry:

– przewodność:

$$T = 0,08 \frac{Q}{s} W\left(u_A, \frac{r}{B_1}\right) = 0,08 \frac{201}{0,36} \cdot 1 = 44,7 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u_A}\right)} = \frac{4 \cdot 44,7 \cdot 1}{360^2 \cdot 5} = 0,00028,$$

– współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{44,7}{0,00028} = 159643 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Dane dla ostatniego odcinka krzywej – typ B;

$Q = 201$  m<sup>3</sup>/h, współrzędne punktu arbitralnego:  $s = 0,74$  m,  $t = 105$  h,

$$W\left(u_y, \frac{r}{B_1}\right) = 2,0, \quad \frac{1}{u_y} = 7.$$

Obliczone parametry:

– przewodność:

$$T = 0,08 \frac{Q}{s} W\left(u_y, \frac{r}{B_1}\right) = 0,08 \frac{201}{0,74} \cdot 2 = 43,5 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik odsączalności grawitacyjnej:

$$\mu = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u_y}\right)} = \frac{4 \cdot 43,5 \cdot 105}{360^2 \cdot 7} = 0,020.$$

**Wykres dla otworu P40:** typ krzywej B;  $r = 580$  m.

Dane:  $Q = 201$  m<sup>3</sup>/h, współrzędne punktu arbitralnego:

$$s = 0,185 \text{ m}; t = 190 \text{ h}; W\left(u_y, \frac{r}{B_1}\right) = 0,6; \frac{1}{u_y} = 2,2.$$

Obliczone parametry:

- przewodność:

$$T = 0,08 \frac{Q}{s} W(u_y, \frac{r}{B_1}) = 0,08 \frac{201}{0,185} \cdot 0,6 = 52,2 \text{ m}^2/\text{h}.$$

- współczynnik odsączalności grawitacyjnej:

$$\mu = \frac{4Tt}{r^2 \left( \frac{1}{u_y} \right)} = \frac{4 \cdot 52,2 \cdot 190}{580^2 \cdot 2,2} = 0,054.$$

Podany przykład pokazuje, że w warunkach braku infiltracji wód z rzeki przebieg zjawiska filtracji nieustalanej odpowiada funkcji Boultona. Metoda ta może być więc stosowana nie tylko dla warstw o swobodnym zwierciadle wody i różnicowanej odsączalności, lecz również dla kompleksów wielowarstwowych, gdy próbnemu pompowaniu warstwy wglębnej towarzyszy obniżanie się zwierciadła wody w warstwie przypowierzchniowej. Jak wynika z podanego przykładu, opadanie zwierciadła wody w warstwie przypowierzchniowej jest wyraźnie opóźnione i przebiega w warunkach odsączania grawitacyjnego. Objawia się to wystąpieniem tylko ostatniej gałęzi wykresu – rodzina krzywych typu B w nomogramie funkcji Boultona (plansza IV).

## 8.5. Masywy skał szczelinowych

Masywem skalnym w geologii stosowanej nazywa się dostępną dla działalności ludzkiej część ośrodka skalnego (Liszkowski, Stochlak, 1976). Częściami składowymi ośrodka skalnego są skały i powierzchnie nieciągłości określające jego strukturę.

Specyfika spękanego ośrodka skalnego przejawia się w tym, że rozciągłość szczelin jest tysiące razy większa od ich rozwarcia, czym różnią się w sposób zasadniczy od porów międzyziarnowych. W wyniku tego szczeliny przy bardzo nieznacznej objętości, w stosunku do ogólnej wielkości wolnych przestrzeni w szkieletie skalnym, wywierają zasadniczy wpływ na charakter przepływu cieczy w całym masywie. Masywy skał szczelinowych, jako naturalne zbiorniki i przewodniki cieczy, występują powszechnie. Dopiero jednak w latach pięćdziesiątych dokonano prób ilościowego obliczenia przepływu cieczy z uwzględnieniem cech skały i interpretacji właściwości przepływu w szczelinach. Badając właściwości fizyczne skał szczelinowych Pirson (1953, za Streltsowa, 1976a), sklasyfikował i podzielił porowatość zbiorników na trzy wielkie grupy:

- międzyziarnową, obejmującą wolne przestrzenie między ziarnami skały,
- pęcherzykową, wynikającą z procesu wietrzenia,
- szczelinową, obejmującą szczeliny różnych typów i genezy.

Na przepuszczalność i pojemność masywów skalnych wpływają zarówno czynniki pierwotne, jak i wtórne. W zależności od rodzaju skał i czynników, które ukształtowały ich przepuszczalność, rozróżnia się zwykle (Barenblatt, 1972): ośrod-

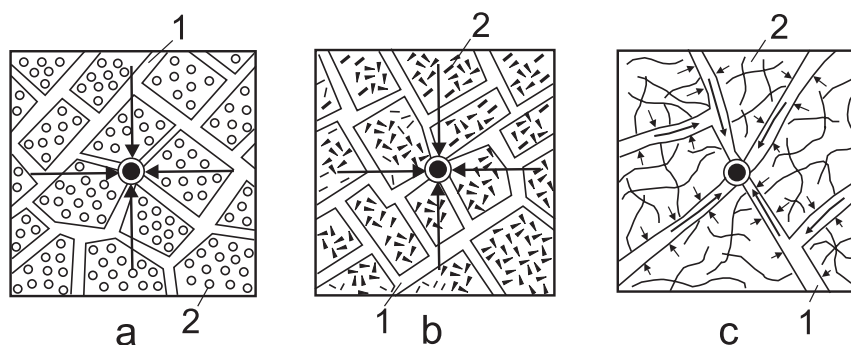
ki szczelinowe i ośrodki szczelinowo-porowe. Pierwsze z nich są blokami skał, między którymi występują szczeliny, przy czym same bloki są nieprzepuszczalne (np. spękany granit), drugie – blokami skał porowatych, np. piaskowców lub wapieni – rozdzielonych szczelinami. Z punktu widzenia warunków filtracji cieczy w skałach szczelinowych Borewski (1973) za Barenblattem i Żeltowem wydziela następujące główne typy (rys. 8.31):

**Skała szczelinowo-porowa**, w której cechy przewodnictwa wiążą się przede wszystkim z przepuszczalnością szczelin, podczas gdy cechy zasobowości odnoszą się do porowatości bloków,

**Skała szczelinowo-szczelinowata** – z dwoma lub więcej systemami spękań z odpowiednio zróżnicowanym ich rozwarciem. Takie masywy mogą być rozpatrywane jako analogi skał szczelinowo-porowych, przy czym mikroszczeliny pełnią rolę porowatości międzyziarnowej.

**Skała wyłącznie szczelinowa** – o rzadkiej sieci spękań jednego typu dzielących bloki litej skały o nikłej porowatości. Każda szczelina stanowi odrębny hydraulicznie system przepływu. Zasoby cieczy związane są prawie wyłącznie z pojemnością tych szczelin. W zakresie teorii przepływu cieczy w masywach skał szczelinowych zdecydowana większość autorów jest zdania, że w przewodze zachodzi w nich przepływ laminarny (Macioszyk, 1973a; Barenblatt, Żeltow, Koczina, 1960; Streltsova, 1976a). Istnieją dwa główne kierunki rozpatrywania procesów filtracji cieczy w skałach szczelinowych (Barenblatt, Entow, Ryżyk, 1972; Borewski, Samsonow, Jazwin, 1973; Liszkowski, Stochlak, 1976). Pierwszy kierunek dotyczy rozpatrywania filtracji na modelu ośrodka ciągłego, drugi – na modelu ośrodka nieciągłego.

**Model ośrodka ciągłego** zakłada quasi-jednorodny przepływ cieczy w masywie. Rozumie się pod tym, że skała jest rozbita dostatecznie wielką liczbą szczelin, a odległości między nimi są niewspółmiernie małe w stosunku do rozmiarów obszaru filtracji, w którym zachodzą rozpatrywane procesy. Pozwala to przyjmować hydrauliczną izotropowość gęsto spękanego masywu, a więc nie uwzględniać rozmiarów, rozmieszczenia i konfiguracji oddzielnych szczelin w przestrzeni. Ruch



Rys. 8.31. Struktura strumienia filtracyjnego w skałach szczelinowych wg Borewskiego i in. (1973)

a – skała szczelinowo-porowa, b – skała szczelinowata z rozwiniętą siecią dużych szczelin, c – skała szczelinowata z rzadką siecią dużych szczelin

cieczy i przepuszczalność rozpatruje się całościowo, tzn. zakłada się, że dana przepuszczalność istnieje w każdym punkcie masywu.

**Model ośrodka nieciągłego** zakłada, że masyw skalny jest rozbity systemami regularnych szczelin ze znaną geometrią (otwarcie szczelin, ich orientacja przestrzenna i intensywność występowania). Bez dalszych zasadniczych uproszczeń rozwiązuje się następnie zagadnienia przepływu cieczy w pojedynczych szczelinach i ich zespołach.

Przy określaniu zasobów ma zastosowanie głównie model pierwszy, natomiast w hydrotechnice, przy rozwiązywaniu zadań szczegółowych – model drugi.

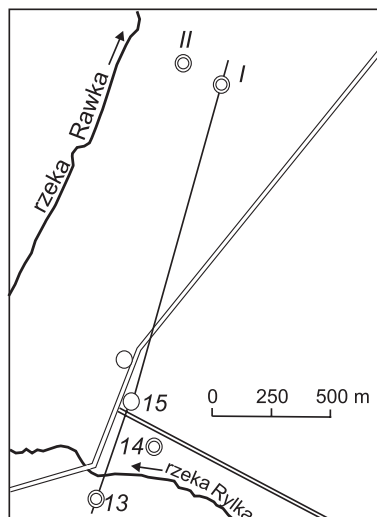
Nawiązując do modelu ośrodka ciągłego, przyjmuje się, że do analizy przebiegu próbnych pompowań w masywach skał szczelinowych można w wielu przypadkach posługiwać się uprzednio przedstawionymi równaniami filtracji nieustalanej dla zwykłego ośrodka porowatego, szczególnie wówczas, gdy przy dużej sztywności masywów skalnych, a więc wysokim współczynniku piezoprzewodności, duży obszar filtracji zostaje objęty wpływem próbnego pompowania. Wszechstronną charakterystykę horyzontalnej anizotropii warunków filtracji w utworach szczelinowych na podstawie analizy nieustalonego dopływu do studni przedstawili Herbich, Krajewski (1977). Ponadto w publikacji Herbicha (1980) Czytelnik znajdzie pogłębioną analizę wyników badań filtracji nieustalanej w sąsiedztwie pompowanych 19 studni wierconych, ujmujących zawodnione skały górnej kredy (masytrycht) w rejonie Chełma. Wyniki tych badań pozwoliły na określenie parametrów anizotropii poziomej przepuszczalności masywu skalnego.

**Przykład 1. Próbné pompowanie z jurajskiego masywu skał szczelinowych w rejonie Rawy Mazowieckiej.** Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Łodzi wykonało w 1973 r. dwa otwory rozpoznawcze I i II (rys. 8.32). Prowadzący badania: K. Czaplńska-Smalczyńska, G. Wójcik. W wykonanych otworach ujęto warstwę spękanych wapieni marglistych środkowego i górnego portlandu na głębokości 90–130 m. Przekrój geologiczny rejonu badań podano na rysunku 8.33. Zwierciadło wody nawiercone na głębokości około 70 m stabilizowało się 13,4 m p.p.t.

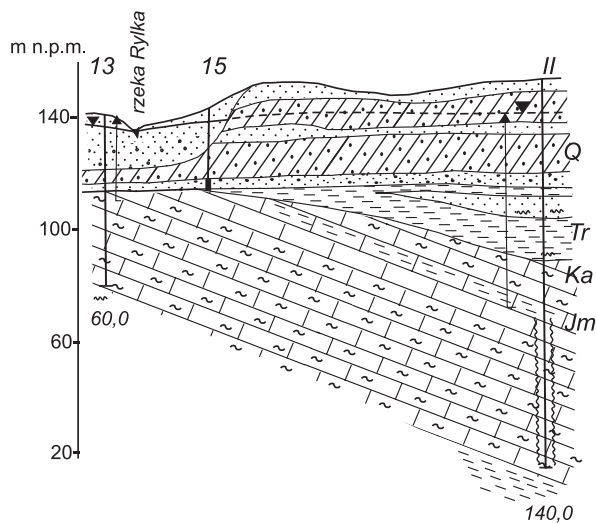
**Próbné pompowanie otworu I.** Otwór ten odpompowano jeszcze przed wykonaniem otworu II. Obserwacje ograniczały się więc tylko do otworu eksploatacyjnego. Pompowanie przeprowadzono na trzech stopniach dynamicznych, uzyskując wyniki:

$$\begin{array}{llll} Q_1 = 52,5 \text{ m}^3/\text{h}, & s_1 = 2,40 \text{ m}, & q_1 = 21,9 \text{ m}^3/\text{h}, & t_1 = 45 \text{ h}, \\ Q_2 = 101,0 \text{ m}^3/\text{h}, & s_2 = 5,74 \text{ m}, & q_2 = 17,4 \text{ m}^3/\text{h}, & t_2 = 96 \text{ h}, \\ Q_3 = 138,4 \text{ m}^3/\text{h}, & s_3 = 9,74 \text{ m}, & q_3 = 14,2 \text{ m}^3/\text{h}, & t_3 = 340 \text{ h}. \end{array}$$

Ogółem wydobyto w czasie pompowania 59114 m<sup>3</sup> wody w czasie 481 h, co daje  $Q_{gr.} = 123 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ponieważ nie uzyskiwano stabilizacji dynamicznego zwierciadła wody, trzeci stopień pompowania przedłużono aż do 340 h. Po tym czasie pompowanie przerwano i przeprowadzono dokładne obserwacje wzniosu zwierciadła wody w otworze pompowanym. Wykres tych obserwacji w postaci zależności półlogarytmicznej przedstawia rysunek 8.34. Na osi rzędnych zamiast wartości depresji wstawiono głębokości zwierciadła wody od kryzy rury cembrowej. Nanie-



Rys. 8.32. Szkic sytuacyjny otworów w rejonie Rawy Mazowieckiej



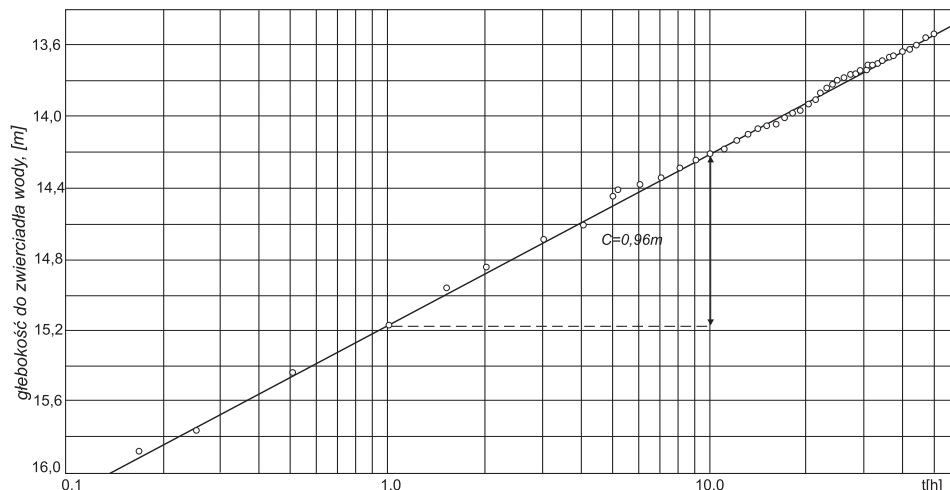
Rys. 8.33. Przekrój geologiczny w rejonie Rawy Mazowieckiej

sione wartości ułożyły się idealnie wzdłuż linii prostej o nachyleniu względem osi czasu  $c = 0,96$  m.

Tak więc według metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba można było obliczyć przewodność ujętej warstwy [5.5]:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 123}{0,96} = 23,4 \text{ m}^2/\text{h}.$$

**Próbné pompowanie otworu II.** Po odwierceniú otworu II przeprowadzono jego pompowanie już przy obserwacji zwierciadła wody w otworze sąsiednim I,



Rys. 8.34. Wykres wzniosu zwierciadła wody w pompowanym otworze rozpoznawczym I (jurajska warstwa wodonośna w rejonie Rawy Mazowieckiej)

położonym w odległości  $r = 200$  m. Ponieważ w poprzednim pompowaniu nie uzyskiwano przez długi okres stabilizacji zwierciadła wody, zdecydowano się włączyć do obserwacji również nieczynną studnię wierconą 15, położoną w odległości  $r = 1080$  m (rys. 8.32). Otwór II pompowano z wydajnością  $Q = 49$  m<sup>3</sup>/h przez 680 h. Wykresy z obserwacji w postaci  $s = f(\lg t)$  oraz w postaci  $\lg s = f(\lg t)$  przedstawiają rysunki 8.35 i 8.36. Oba wykresy: dla otworu I i dla studni 15 zidentyfikowano jako wykresy funkcji Theisa. Małe odchylenie punktów poniżej krzywej wzorcowej ma miejsce na wykresie otworu I, a towarzyszy temu początek reakcji studni czwartorzędowej. Ponieważ jednak zwierciadło wody w naporowej warstwie czwartorzędowej ulega obniżaniu, nie następuje stabilizacja zwierciadła wody w eksploatowanej warstwie jurajskiej. Wielkość zasobów wód podziemnych dla ujęcia w tego typu warstwie powinna być więc prognozowana przy uwzględnieniu parametrów filtracji niestabilnej.

Wykres dla otworu I – krzywa Theisa  $\frac{r}{B} = 0$ .

Dane:  $Q = 49$  m<sup>3</sup>/h, współrzędne punktu arbitralnego:  
 $s = 0,18$  m,  $t = 0,4$  h,  $E(z) = 0,07$ ,  $z = 0,8$ ,  $r = 200$  m.

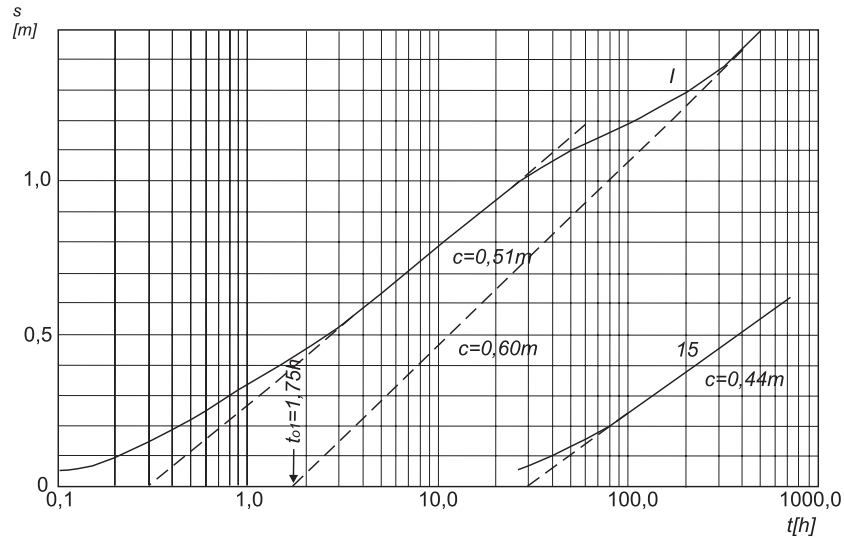
Obliczone parametry:

– przewodność:

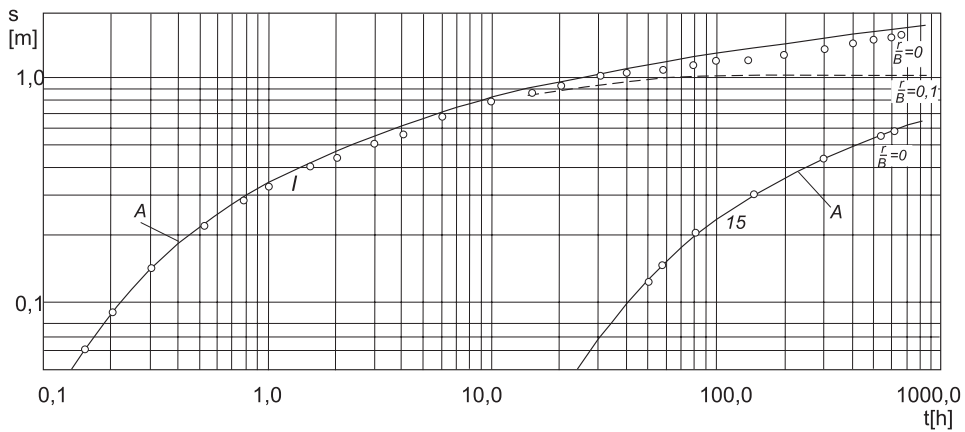
$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{49}{0,18} \cdot 0,07 = 19,05 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{1905 \cdot 0,4}{200^2 \cdot 0,8} = 0,00024,$$



Rys. 8.35. Wykresy wskaźnikowe  $s = f(\lg t)$  z próbnego pompowania hydrowęzłowego otworu II (jurajska warstwa wodonośna w rejonie Rawy Mazowieckiej)



Rys. 8.36. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  z próbnego pompowania hydrowęzłowego otworu II (jurajska warstwa wodonośna w rejonie Rawy Mazowieckiej)

– współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{19,05}{0,00024} = 79375 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Wykres dla studni 15 – krzywa Theisa  $\frac{r}{B} = 0$ .

Dane:  $Q = 49 \text{ m}^3/\text{h}$ , współrzędne punktu arbitralnego:  
 $s = 0,49 \text{ m}$ ,  $t = 230 \text{ h}$ ,  $E(z) = 0,15$ ,  $z = 2,5$ ,  $r = 1080 \text{ m}$ ,  $t_p = 680 \text{ h}$ .

Obliczone parametry:

- przewodność:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{49}{0,49} \cdot 0,15 = 15,0 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik odsączalności sprężystej:

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{15 \cdot 230}{1080^2 \cdot 2,5} = 0,00118,$$

- współczynnik piezoprzewodności:

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{15}{0,00118} = 12712 \text{ m}^2/\text{h},$$

- zasięg lejka depresji:

$$R = 1,5\sqrt{at} = 1,5\sqrt{12712 \cdot 680} = 4410 \text{ m}.$$

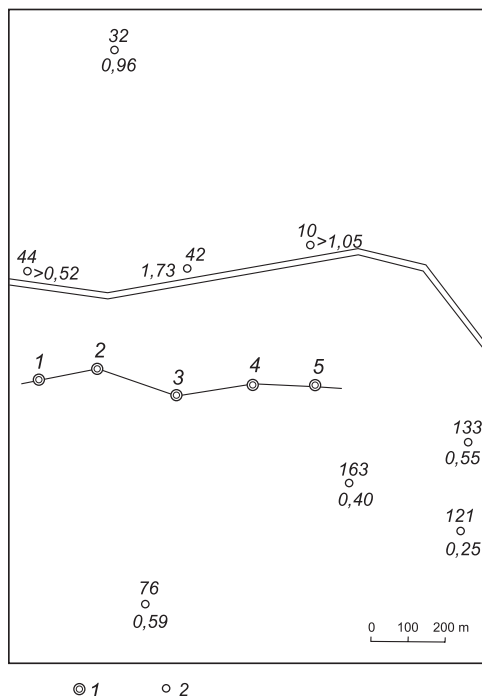
Z końcowych wartości depresji w otworze II i 15 można po ich naniesieniu w odległościach  $r_1 = 200$  i  $r_2 = 1080$  m na wykres  $s = f(\lg r)$ , obliczyć metodą graficzną według wzoru Dupuita-Thiema przewodność warstwy oraz zasięg lejka depresji. Według tego wykresu  $R$  jest nieco mniejsze od 3 km. Należy zauważyć, że zasięg lejka depresji liczony według wzoru [2.27] może być znacznie zawyżony, jeżeli się uwzględni dłuższy czas pompowania. Dzieje się tak dlatego, że wysokie wartości piezoprzewodności są krótkotrwałe w odniesieniu do całego kompleksu wodonośnego, gdyż w miarę rozwoju lejka depresji wartość tego współczynnika ulega zmniejszaniu wskutek odprężania układu i przyjmowania cech sprężystości warstwy współdziałającej – zasilającej.

**Przykład 2. Próbne pompowanie z jurajskiego masywu skał szczelinowych w rejonie Rokicin.** Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Łodzi wykonało w 1972 r. pięć otworów rozpoznawczych (rys. 8.37). W otworach tych ujęto warstwę wodonośną w postaci spękanych wapieni górnojurajskich. Studnie są bezfiltrowe. Przekrój geologiczny wzdłuż linii otworów przedstawiono na rysunku 8.38. W nadkładzie osadów jurajskich występują osady czwartorzędowe. Tylko lokalnie zachowały się w ich spągu niewielkie płyty osadów trzeciorzędowych w postaci mułków ilastych z wkładkami węgla brunatnego. Pod tymi płytami zachowały się również osady zwiertelinowe w stropie jury. Na kompleks czwartorzędowy składają się kolejno od powierzchni terenu:

- I warstwa glin zwałowych – do głębokości 14–28 m,
- I warstwa wodonośna zbudowana z piasków oraz pospółek o miąższości 2,5–15,5 m,
- II warstwa glin zwałowych o miąższości 2–38 m,
- II warstwa wodonośna, zbudowana w miejscach przegłębienia erozyjnych z piasków, przewarstwionych żwirami, a ponad płytami osadów trzeciorzędowych – z piasków drobnoziarnistych i pylistych.

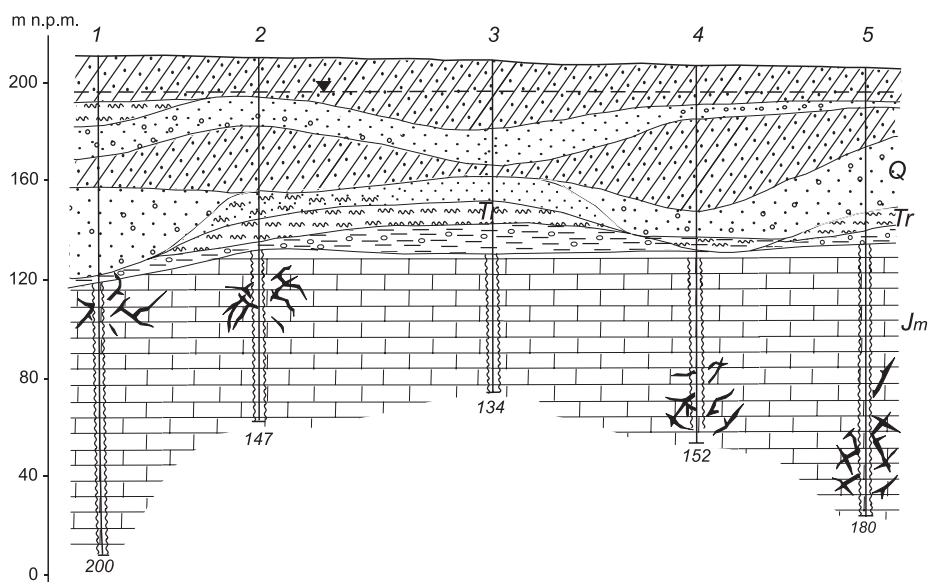
Zwierciadło wody piętra jurajskiego ma charakter subartezyjski i stabilizuje się w otworach na rzędnych nieco niższych lub zbliżonych do zwierciadła wody w studniach piętra czwartorzędowego (rys. 8.38).





Rys. 8.37. Szkic sytuacyjny otworów w rejonie Rokicin

1 – otwory rozpoznawcze ujmujące wody piętra jurajskiego, 2 – otwory – studnie kopane (podwiercane) ujmujące wody piętra czwartorzędowego (32 – numer, 0,96 – wielkości stwierdzonych depresji w pompowaniu zespolonym) [m]



Rys. 8.38. Przekrój geologiczny w rejonie Rokicin

Poniżej przedstawiono wyniki próbnego pompowania otworu 3. Prowadzący badania: Czesław Gaik, Marek Kurosz. W pompowaniu trójstopniowym tego otworu uzyskano na poszczególnych stopniach dynamicznych wyniki:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 91,8 \text{ m}^3/\text{h}, & s_1 &= 1,64 \text{ m}, & q_1 &= 56,0 \text{ m}^3/\text{h}, & t_1 &= 24 \text{ h}, \\ Q_2 &= 178,3 \text{ m}^3/\text{h}, & s_2 &= 4,55 \text{ m}, & q_2 &= 39,2 \text{ m}^3/\text{h}, & t_2 &= 36 \text{ h}, \\ Q_3 &= 306,0 \text{ m}^3/\text{h}, & s_3 &= 11,10 \text{ m}, & q_3 &= 27,6 \text{ m}^3/\text{h}, & t_3 &= 60 \text{ h}. \end{aligned}$$

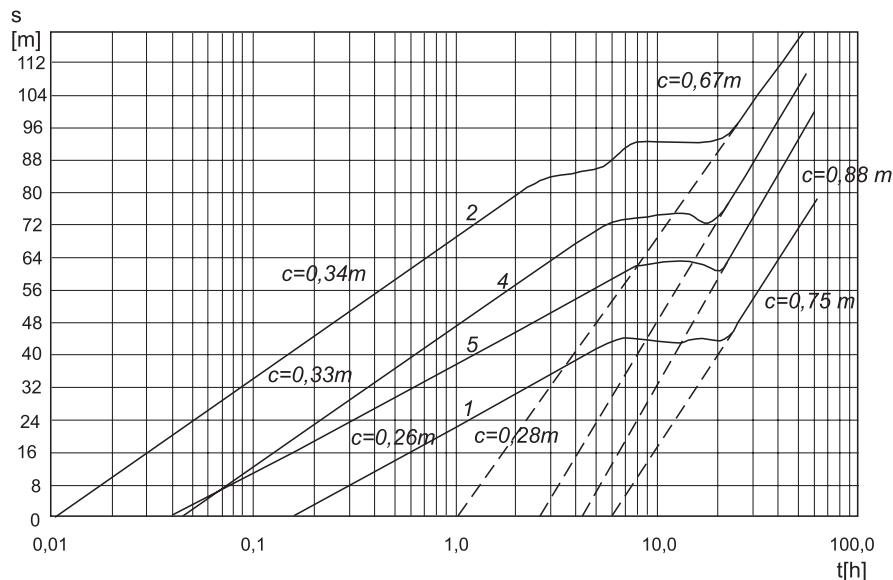
Na poszczególnych stopniach pompowania oddziaływanie na otwór 2, położony w odległości  $r = 231 \text{ m}$ , wynosiło:  $s_1 = 0,30 \text{ m}$ ,  $s_2 = 0,66 \text{ m}$ ,  $s_3 = 1,25 \text{ m}$ . Powrót zwierciadła wody do stanu pierwotnego nastąpił po 45 h od zakończenia pompowania.

Po wykonaniu wszystkich pięciu otworów przeprowadzono przed ich pompowaniem zespołowym jednostopniowe pompowanie otworu 3 z maksymalną wydajnością pompy, tj. przy  $Q = 322 \text{ m}^3/\text{h}$  przez okres 73,5 h dla potrzeb określenia parametrów w warunkach nieustalanej filtracji. W tym celu obserwowano opadanie zwierciadła wody we wszystkich pozostałych otworach położonych na dwóch promieniach:

- otwór 2;  $r = 231 \text{ m}$ , otwór 1;  $r = 383 \text{ m}$ ,
- otwór 4;  $r = 210 \text{ m}$ , otwór 5;  $r = 380 \text{ m}$ .

Wykresy wskaźnikowe z tych obserwacji przedstawiono na rysunku 8.39. Wykresy te składają się z trzech wyraźnie zróżnicowanych odcinków:

- 1) o nachyleniu  $c = 0,26\text{--}0,34 \text{ m}$ ,
- 2) równoległego do osi czasów  $c = 0$ ,
- 3) o nachyleniu  $c = 0,67\text{--}0,88 \text{ m}$ , a więc 2–3-krotnie wyższym niż dla odcinka pierwszego.



Rys. 8.39. Wykresy  $s = f(\lg t)$  dla otworów 1, 2, 4 i 5 w czasie pompowania otworu rozpoznawczego 3 (masyw skał szczelinowych rejonu Rokicin)

Przedstawione wykresy kształtem przypominają z pozoru postacie wykresu o zróżnicowanej odsączalności (funkcja Boultona). Okazało się jednak, że wykresy doświadczalne  $\lg s = f(\lg t)$  sporządzone dla tego pompowania nie dają się zidentyfikować z wykresami funkcji Boultona. Przypuszcza się więc, że to zróżnicowanie pomiędzy odcinkiem pierwszym i ostatnim na wykresach  $s = f(\lg t)$  nie jest wynikiem wewnętrznych cech masywu skalnego, ale uruchomieniem przepływu i procesu oddawania wody przez czwartorzędowe poziomy wodonośne w nadkładzie masywu skalnego. Ostatnie nachylenie wykresów ( $c = 0,67-0,88$  m) sygnalizuje rozpoczęcie współzależnego przepływu z udziałem obu kompleksów wodonośnych (Haładus, Motyka, Szczepański, 1979b). Wracając zatem do analizy parametrycznej wykresów przedstawionych na rysunku 8.39, można obliczyć parametry metodą przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba według wzorów [5.5] i [5.6]:

**Obliczenia z pierwszego odcinka wykresów:**

otwór 1  $c = 0,28$  m,  $T = 217,0$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 0,17$  h,  $\mu_s = 0,00058$ ,  $a = 374138$  m<sup>2</sup>/h  
 otwór 2  $c = 0,34$  m,  $T = 178,7$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 0,01$  h,  $\mu_s = 0,000075$ ,  $a = 2382667$  m<sup>2</sup>/h  
 otwór 4  $c = 0,33$  m,  $T = 184,1$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 0,046$  h,  $\mu_s = 0,00043$ ,  $a = 428140$  m<sup>2</sup>/h  
 otwór 5  $c = 0,26$  m,  $T = 233,7$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 0,038$  h,  $\mu_s = 0,00014$ ,  $a = 1669286$  m<sup>2</sup>/h

**Obliczenia z trzeciego odcinka wykresów:**

otwór 1  $c = 0,75$  m,  $T = 81,0$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 6,0$  h,  $\mu_s = 0,0076$ ,  $a = 10658$  m<sup>2</sup>/h  
 otwór 2  $c = 0,67$  m,  $T = 90,7$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 1,0$  h,  $\mu_s = 0,0035$ ,  $a = 25914$  m<sup>2</sup>/h  
 otwór 4  $c = 0,82$  m,  $T = 74,1$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 2,65$  h,  $\mu_s = 0,0100$ ,  $a = 7410$  m<sup>2</sup>/h  
 otwór 5  $c = 0,88$  m,  $T = 69,0$  m<sup>2</sup>/h,  $t_o = 4,4$  h,  $\mu_s = 0,0047$ ,  $a = 14681$  m<sup>2</sup>/h

Jeżeli natomiast dla depresji ze środkowego odcinka wykresów  $s = f(\lg t)$ , a więc odcinków o  $c = 0$ , sporządzi się wykresy  $s = f(\lg r)$  dla par otworów na obu promieniach badanego hydrozespołu, to będą to wykresy profili depresji o nachyleniu  $c_{(2-1)} = 2,00$  m dla promienia pierwszego i  $c_{(4-5)} = 0,40$  m dla promienia drugiego i odpowiednio przewodności według wzoru Dupuita-Thiema [5.7]:

– na promieniu 4–5

$$T_1 = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 322}{0,40} = 294,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

– na promieniu 2–1

$$T_2 = \frac{0,366Q}{c} = \frac{0,366 \cdot 322}{2,0} = 58,9 \text{ m}^2/\text{h}.$$

To zróżnicowanie przewodności korelowałoby ze stwierdzonymi w pompowaniach indywidualnych różnicami w wydajnościach jednostkowych otworów skrajnych (otwór 1 –  $q = 3,7$  m<sup>3</sup>/h na m, otwór 5 –  $q = 94$  m<sup>3</sup>/h na m) oraz stwierdzoną w czasie wierceń znacznie większą intensywnością spękań w rejonie otworu 5.

Na podkreślenie zasługuje bardzo wysoka wartość współczynnika piezoprzewodności na początku pompowania, która świadczy o dużej sztywności masywu. Lej depresyjny rozwija się wówczas szybko, lecz na krótko, ponieważ dochodzi do uruchomienia zasobów sprężystych całego masywu w przypadku skał o dużej porowatości czynnej (piaskowce, wapienie) lub do uruchomienia dopływów z nadległych poziomów wodonośnych, jeśli takowe występują i mają więź hydrauliczną z badanym masywem skalnym jak w opisywanym przypadku.

Potwierdzenie więzi hydraulicznej spękanego masywu skalnego z nadległymi warstwami piętra czwartorzędowego uzyskano po przeprowadzeniu próbnej eksploatacji trwającej ponad 500 godzin z trzech środkowych studni bariery (patrz: rys. 8.37 – studnia 2, 3 i 4) z łączną wydajnością około 1000 m<sup>3</sup>/h. W rejonie kontaktów hydraulicznych zaznaczyły się w trakcie pompowania zespołowego wyraźne obniżenia zwierciadła wody w pierwszym od powierzchni terenu poziomie wodonośnym, zaobserwowane w wielu studniach kopanych. Na rysunku 8.37 opisano wielkości stwierdzonych depresji w tych studniach przy końcu pompowania zespołowego.

## 9. INTERPRETACJA WYNIKÓW PRÓBNYCH POMPOWAŃ ZESPOŁOWYCH

Jak podano w rozdziale 1, pompowania zespołowe prowadzi się przy eksploatacji większej liczby otworów rozpoznawczych, rozmieszczonych jako studnie przyszłego ujęcia, w celu doświadczalnego sprawdzenia wydajności ujęcia i ustalenia wielkości depresji dla warunków eksploatacji użytkowej. W rozdziale 3 nie podano żadnych zasad wykonywania pompowań zespołowych, ponieważ są one bardzo zróżnicowane w zależności od stwierdzonych warunków hydrogeologicznych. Wykonuje się je zazwyczaj wówczas, gdy prognozy analityczne są wysoce niepewne. Nic nie stoi jednak na przeszkodzie, aby przy projektowaniu, wykonywaniu i interpretacji wyników posługiwać się metodami podanymi dla pompowań hydrowęzłowych. Przy interpretacji parametrycznej ich wyników różnica polega jedynie na konieczności wyznaczenia środka ciężkości poboru wody z zespołu otworów oraz przestrzegania warunku, aby w miarę możliwości otwór obserwacyjny, z którego bierze się dane do obliczeń, był położony poza obrysem zespołu eksploatawanych otworów w odległości przekraczającej najdłuższą przekątną tego obrysu. Poniżej podaje się przykłady próbných pompowań zespołowych wraz z interpretacją ich wyników dla różnych struktur hydrogeologicznych.

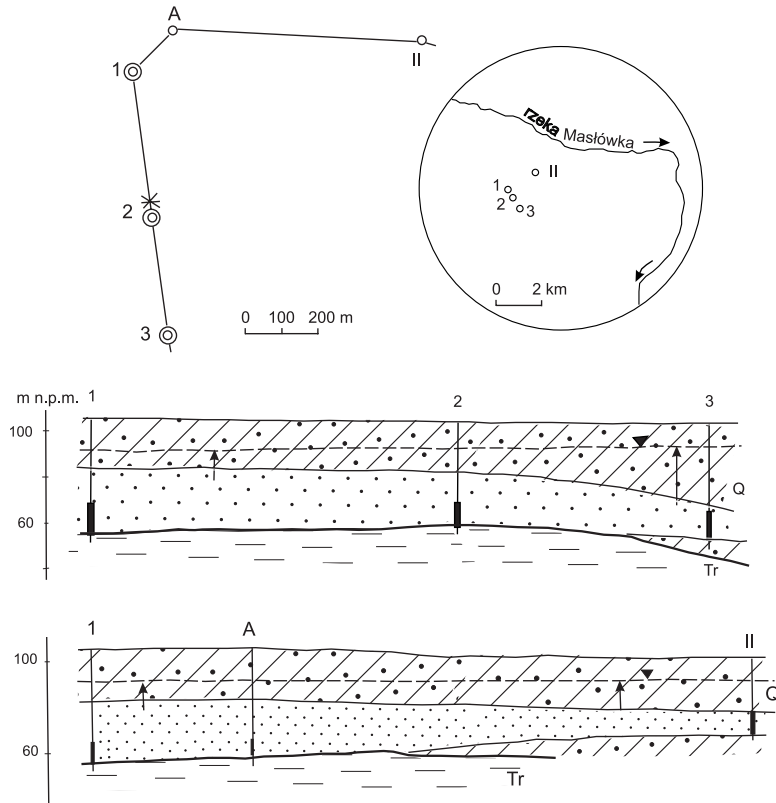
### 9.1. Kenozoiczne struktury hydrogeologiczne

#### 9.1.1. Warstwa wodonośna w strefie Wysoczyzny Leszczyńskiej

Podany przykład pompowania zespołowego studni ujmujących plejstocенską warstwę wodonośną w rejonie Bojanowa pochodzi z materiałów archiwalnych Przedsiębiorstwa Hydrogeologicznego z Poznania. Badania hydrogeologiczne prowadzili: Eugenia Zboralska i Jan Przybyłek.

Warstwa wodonośna występuje w obrębie płaskiej wysoczyzny morenowej, uformowanej w zlodowaceniu środkowopolskim. Tworzą ją osady żwirowo-piaszczyste o miąższości 15–28 m, leżące na iłach poznańskich lub częściowo na starszych glinach morenowych. Warstwę wodonośną przykrywa pokład zwartych glin morenowych o miąższości 22–36 m (rys. 9.1). Na NE od terenu badań, w odległości około 2 km, przepływa rzeka Masłówka, będąca prawobrzeżnym dopływem rzeki Baryczy.

W celu udokumentowania zasobów eksploatacyjnych dla ujęcia komunalnego wykonano trzy otwory rozpoznawcze (1–3) oraz otwór obserwacyjny A (rys. 9.1). Następnie przeprowadzono pompowania indywidualne każdego otworu na trzech stopniach dynamicznych. Pompowanie otworu 2 wykonano nieco odmiennie niż



Rys. 9.1. Szkic sytuacyjny otworów oraz przekroje geologiczne w rejonie Bojanowa

dwu pozostałych, a mianowicie pompowano go z najwyższą wydajnością na I stopniu  $Q_1 = 61,9 \text{ m}^3/\text{h}$  przez 71,5 h i obserwowano opadanie zwierciadła wody w pozostałych otworach. Kolejne stopnie pompowania były krótkotrwałe o zmniejszonej proporcjonalnie wydajności.

Przez cały okres trwania pompowania na I stopniu dynamicznym panowały warunki filtracji nieustalonej, co przedstawiono na rysunku 9.2 w postaci wykresu  $s = f(\lg t)$  dla otworu 1 i w postaci wykresu  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu A (rys. 9.3). Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  zinterpretowano jako funkcję Theisa (plansza I).

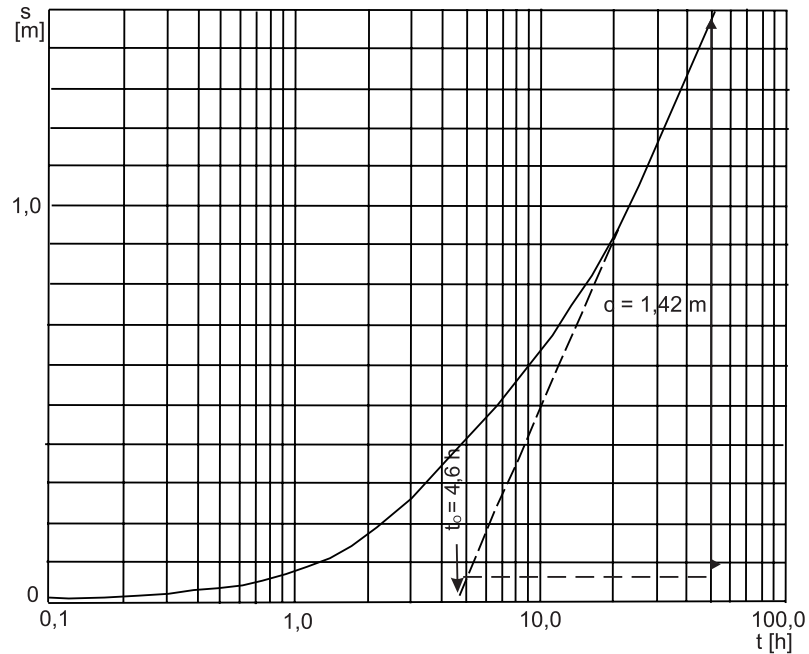
Obliczanie parametrów filtracyjnych dla otworu 1 metodą przybliżenia logarytmicznego (rys. 9.2):

Dane:  $Q = 62 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $c = 1,42 \text{ m}$ ,  $r = 401 \text{ m}$ ,  $t_0 = 4,6 \text{ h}$ .

Wyniki obliczeń:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 62,0}{1,42} = 8,0 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\mu_s = \frac{2,25Tt}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 8,0 \cdot 4,6}{401^2} = 0,0005,$$



Rys. 9.2. Wykresy  $s = f(\lg t)$  dla otworu 1 podczas pompowania otworu 2 (plejstocénska warstwa wodonośna w rejonie Bojanowa)

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{8,0}{0,0005} = 16000 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$R_1 = 1,5\sqrt{at} = 1,5\sqrt{16000 \cdot 70,5} = 1593 \text{ m}.$$

Obliczenia parametrów filtracyjnych dla otworu A metodą rozwiązania ogólnego Theisa (rys. 9.3):

Dane:  $Q = 62,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 480 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego:

$E(z) = 0,07$ ,  $z = 0,8$ ,  $s = 0,54 \text{ m}$ ,  $t = 10,8 \text{ m}$ .

Wyniki obliczeń:

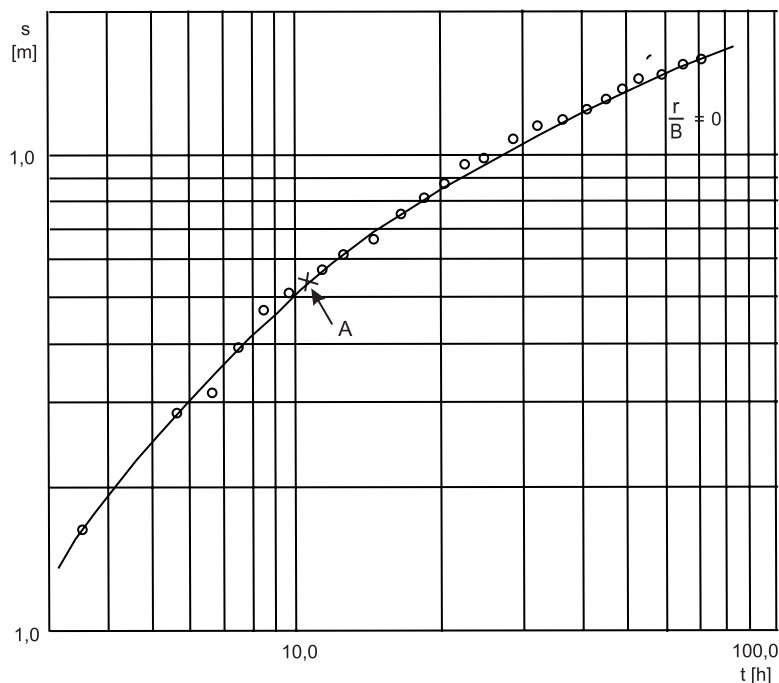
$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{62,0 \cdot 0,07}{0,54} = 8,0 = \text{m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{8,0 \cdot 10,8}{480^2 \cdot 0,8} = 0,00047,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{8,0}{0,00047} = 17070 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$R_1 = 1,5\sqrt{at} = 1,5\sqrt{17070 \cdot 70,5} = 1645 \text{ m}.$$

Następnie wykonano pompowanie zespołowe trzech otworów 1, 2, 3 na dwu stopniach dynamicznych. Przez pierwsze 72 h otwory pompowano z łączną wydaj-



Rys. 9.3. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu A podczas pompowania otworu 2 (plejstocieńska wodonośna w rejonie Bojanowa)

nością  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ , później zmniejszono ją do  $120 \text{ m}^3/\text{h}$  ze względów technicznych. Ze zmniejszoną wydajnością otwory pompowano przez 263 h. Pod koniec pompowania wydatki studni kształtowały się następująco: 1 –  $33,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , 2 –  $34,9 \text{ m}^3/\text{h}$ , 3 –  $54,3 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Po zakończeniu pompowania zespołowego wykonywano przez 560 h pomiary wzniosu zwierciadła wody. Otworami obserwacyjnymi były otwory A i II (nieczynna studnia). Opadanie zwierciadła wody na pierwszym stopniu pompowania przedstawiono w postaci wykresów  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów obserwacyjnych A i II (rys. 9.4), a dla całego pompowania podano wykres dla otworu II w postaci zależności  $\lg \frac{s}{Q} = f(\lg t)$  (rys. 9.5).

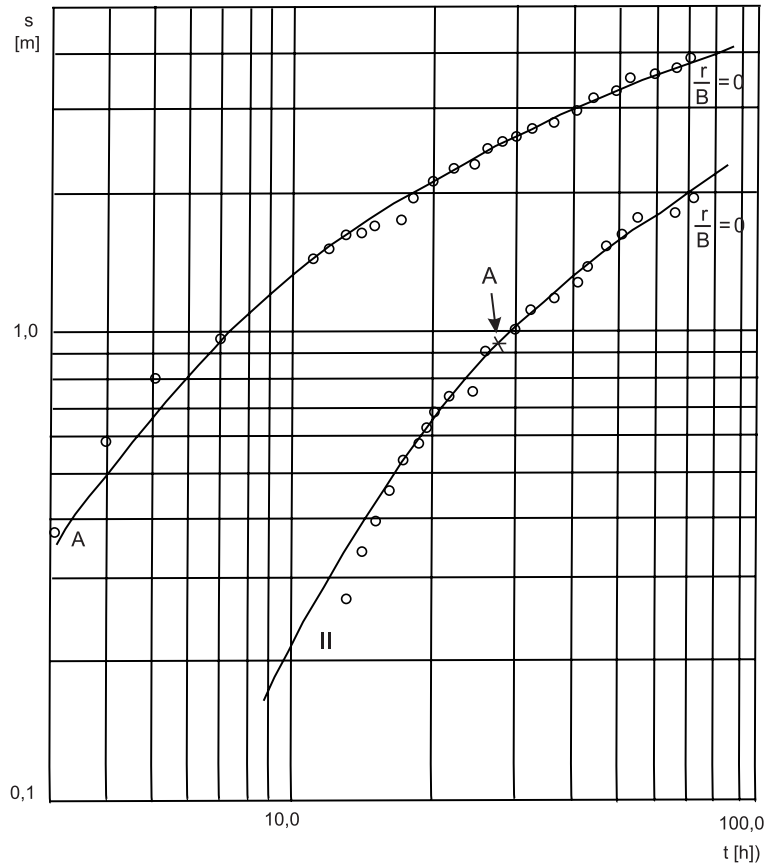
Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów A i II z pierwszego stopnia pompowania zidentyfikowano jako funkcję  $\frac{r}{B} = 0$  (krzywa Theisa). Ze względu na naporowy charakter warstwy wodonośnej i odległość otworu obserwacyjnego od środka ciężkości poboru wody, przekraczającą długość bariery studziennej (rys. 9.1), uznano, że w tym przypadku można na podstawie krzywej doświadczalnej obliczyć również parametry filtracyjne.

Dane:  $Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r_z = 675 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego:

$E(z) = 0,045$ ,  $z = 0,5$ ,  $s = 0,93 \text{ m}$ ,  $t = 27,5 \text{ h}$ .





Rys. 9.4. Wykresy  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworów A i II z pompowania zespolonego (plejstocénska warstwa wodonosna w rejonie Bojanowa)

Wyniki obliczeń:

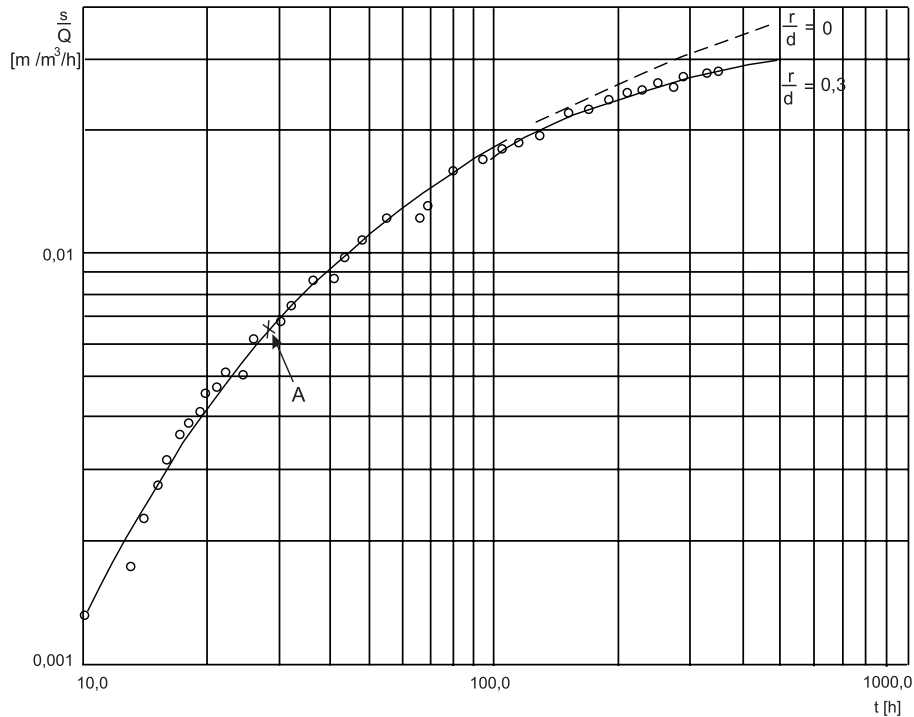
$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{150,0 \cdot 0,045}{0,93} = 7,3 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{Tt}{r^2 z} = \frac{7,3 \cdot 27,5}{675^2 \cdot 0,5} = 0,00088,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{7,3}{0,00088} = 8280 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$R_1 = 1,5\sqrt{at} = 1,5\sqrt{8280 \cdot 72} = 1158 \text{ m}.$$

Analiza wykresu  $\lg \frac{s}{Q} = f(\lg t)$  dla otworu II z przebiegu całego pompowania wykazała, że do 100 h pompowania trwała filtracja nieustalona, spełniająca warunki schematu Theisa, a potem nastąpiło odchylenie wykresu w kierunku stabilizacji



Rys. 9.5. Wykres  $\lg \frac{s}{Q} = f(\lg t)$  dla otworu A z pompowania zespołowego w rejonie Bojanowa

(p. rys. 9.5). Krzywą doświadczalną zinterpretowano według funkcji dla warstwy wodonośnej z boczną granicą zasilania, identyfikując ją z krzywą wzorcową  $\frac{r}{d} = 0,3$  (plansza V).

Obliczenia parametrów filtracyjnych:

Współrzędne punktu arbitralnego:

$$\Phi(u) = 0,54, \quad \frac{1}{u} = 1,65, \quad \frac{s}{Q} = 0,0065 \frac{\text{h}}{\text{m}^2}, \quad t = 28 \text{ h.}$$

Wyniki obliczeń:

$$T = \frac{0,08Q}{s} \Phi(u, \frac{r}{d}) = \frac{0,08}{s} \Phi(u, \frac{r}{d}) = \frac{0,08}{0,0065} \cdot 0,54 = 6,65 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u}\right)} = \frac{4 \cdot 6,65 \cdot 28,0}{675^2 \cdot 1,65} = 0,00099,$$

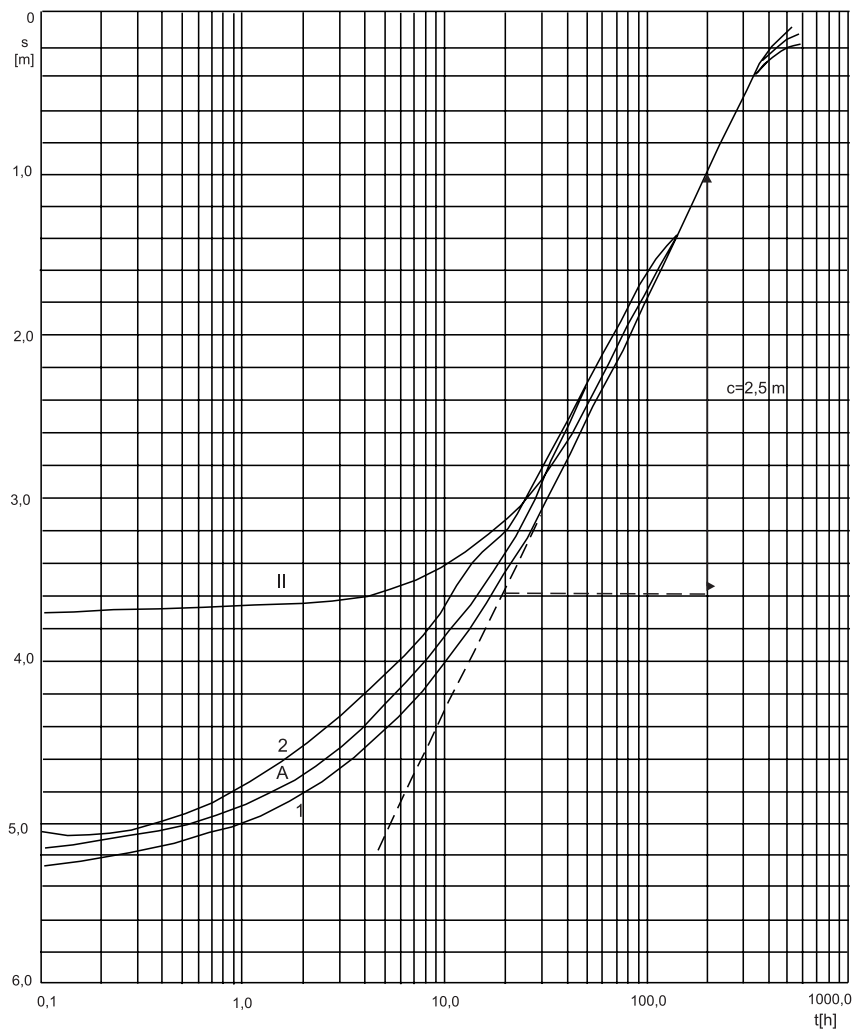
$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{6,65}{0,00099} = 6712 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Odległość do granicy zasilającej obliczono z zależności funkcyjnej  $\frac{r}{d} = 0,3$ :

$$d = \frac{r}{0,3} = \frac{675}{0,3} = 2250 \text{ m}$$

Z analizy struktury hydrogeologicznej i warunków krążenia wód wynika, że granicę tę stanowi dolina Masłówek znajdująca się w odległości 2 km od terenu badań (rys. 9.1).

Wykresy wzniosu zwierciadła wody po pompowaniu zespołowym (rys. 9.6) potwierdziły wyniki interpretacji wykresów opadania uprzednio już przedstawio-



Rys. 9.6. Wykresy  $s = f(\lg t)$  wzniosu zwierciadła wody w otworach pompowanych i obserwacyjnych po pompowaniu zespołowym w rejonie Bojanowa

nych. Wykresy wzniosu dla otworów pompowanych i obserwacyjnych po około 20 h trwania procesu dają się przybliżyć prostą o nachyleniu  $c = 2,5$  m.

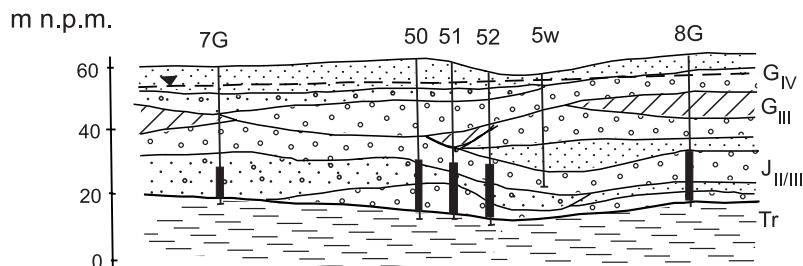
Ze względu na uzyskanie stabilizacji dynamicznej przy końcu pompowania, można wznios zinterpretować według wzoru [2.34], a więc obliczyć przewodność metodą przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba [5.5]:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 120,0}{2,50} = 8,8 \text{ m}^2/\text{h}$$

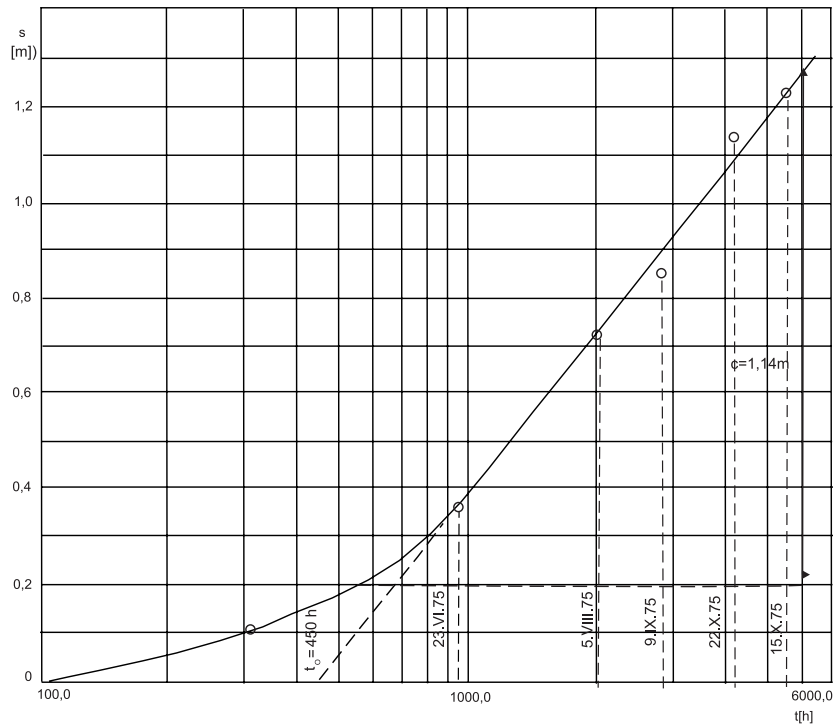
Podany przykład pozwala na stwierdzenie poprawności obliczeń parametrów filtracyjnych z pompowania zespołowego, jeżeli interpretowane piezometry są położone w odległości od środka ciężkości poboru wody większej niż wynosi promień konturu ujęcia. Ponadto pompowanie zespołowe wykazało, że w wielu przypadkach tam, gdzie nie ma ustalonych źródeł i wielkości zasilania ujęcia, trzeba czas trwania pompowania przedłużyć do momentu ustalenia się warunków przepływu w obszarze lub do czasu ujawnienia się granic zasilających, których wpływ można prognozować.

### 9.1.2. Warstwa wodonośna w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej

Przy omawianiu interpretacji próbnych pompowań w naporowych warstwach wodonośnych w pobliżu okien hydrogeologicznych (rozd. 8.2) podano na szkicu (rys. 8.6) również i sytuację grupy studni 50–52, wykonanych w rejonie okna hydrogeologicznego i poddanych następnie eksploatacji zespołowej. Przekrój geologiczny przez wspomniany zespół studni pokazano na rysunku 9.7. Studnie są rozmieszczone wzdłuż linii w odległościach 120 m od siebie i położone w odległości 800 m od koryta rzeki Warty. Zespół otworów 50–52 został włączony do eksploatacji użytkowej w kwietniu 1975 r. z łączną wydajnością  $Q = 580 \text{ m}^3/\text{h}$ . Matuszak i Przybyłek z Przedsiębiorstwa Hydrogeologicznego w Poznaniu podjęli wówczas obserwacje w otworach położonych wokół pompowanego zespołu. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów zwierciadła wody sporządzono wykres  $s = f(\lg t)$  (rys. 9.8) dla jednego z otworów obserwacyjnych – 40b, położonego w odległości  $r = 680$  m od środkowej studni. Obserwowany otwór 40b zareagował dopiero po dwóch tygodniach od rozpoczęcia eksploatacji ( $s = 0,10$  m). Opadanie zwierciadła wody obserwowano w nim do końca 1975 r., tj. przez 8 miesięcy. W tym okresie naturalne zmiany zwierciadła wody na tarasie pradolinowym były niewielkie.



Rys. 9.7. Przekrój geologiczny przez zespół studni w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej



Rys. 9.8. Pompowanie zespołowe studni w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej. Wykres  $s = f(\lg t)$  dla piezometru 40b

Przedstawiony wykres  $s = f(\lg t)$  można przybliżyć prostą o nachyleniu  $c = 1,14$  m, która odcina na osi  $t$  wartość  $t_0 = 450$  h. Wykorzystując wielkości odczytane z wykresu, obliczono według wzoru przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba parametry filtracyjne:

- przewodność [5.5] :

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 580}{1,14} = 93,1 \text{ m}^2/\text{h}$$

- współczynnik odsączalności grawitacyjnej [5.6]

$$\mu = \frac{2,25Tt_0}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 93,1 \cdot 450}{680^2} = 0,204,$$

- współczynnik filtracji:

$$k = \frac{T}{H} = \frac{93,1}{44} = 2,12 \text{ m/h.}$$

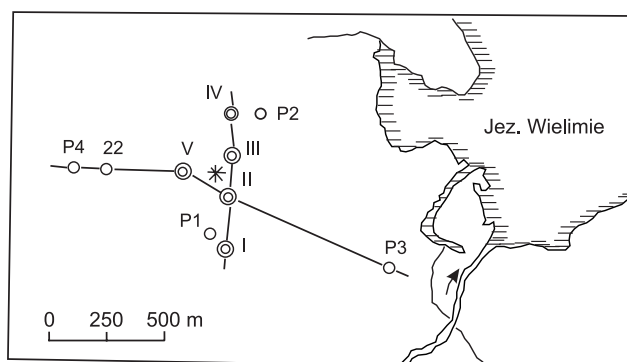
Wyniki przeprowadzonych obserwacji dowodzą długotrwałości ustalania się warunków przepływu wody do ujęć założonych w warstwach o swobodnym zwierciadle wody w oddaleniu od rzek. Obliczenia współdziałania studni ujęcia wielo-otworowego w podanych warunkach, na podstawie krótkotrwałych pompowań z

pojedynczych otworów, prowadzi do znacznego zawyżenia zasobów eksploatacyjnych. Wyniki doświadczenia uwidoczniają również niecelowość wykonywania krótkotrwałych pompowań zespołowych. Celowe jest natomiast wykonywanie dłuższych pompowań hydrowęzłowych z właściwie rozmieszczonymi otworami obserwacyjnymi oraz takie zaprojektowanie prac rozpoznawczych, aby można było wykonać badania modelowe rejonu projektowanego ujęcia. Zaprezentowane doświadczenie wskazuje również na celowość uczestnictwa hydrogeologów we wstępnym rozruchu dużych ujęć wód podziemnych, ponieważ okres ten można wykorzystać do weryfikacji prognoz i obliczeń parametrycznych. Weryfikacji bardzo przydatnej na etapach dalszej rozbudowy tych ujęć lub projektowania ujęć w warunkach zbliżonych.

### 9.1.3. Warstwy wodonośne na Pojezierzu Zachodniopomorskim

Pompowanie hydrowęzłowe i zespołowe objęło otwory ujmujące mioceńsko-plejstocenijskie warstwy wodonośne w rejonie Szczecinka. Opisywane badania wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania w 1969 r. Prowadzący badania: J. Przybyłek, A. Żarowski. Rejon badań znajduje się na południowym zboczach moren czołowych fazy pomorskiej zlodowacenia bałtyckiego. Na rysunku 9.9 przedstawiono szkic sytuacyjny otworów, a na rysunku 9.10 przekroje geologiczne. Badana warstwa wodonośna składa się z ławic piasków drobnoziarnistych i średnioziarnistych z wkładkami piasków pylastych. Łączna jej miąższość wynosi około 50 m. W nadkładzie warstwy, której strop występuje na głębokości 80 m, występują trzy poziomy glin zwałowych, przedzielone osadami fluwioglacjalnymi. W spągu warstwy wodonośnej występują ropy trzeciorzędowe. Badana warstwa wodonośna jest warstwą o regionalnym rozprzestrzenieniu, o ciśnieniu rzędu 7–8 atmosfer. W celu oceny jej parametrów filtracyjnych oraz ustalenia zasobów eksploatacyjnych rejonu dużego ujęcia wody wykonano pompowanie hydrowęzłowe otworu rozpoznawczego V oraz pompowanie zespołowe otworów I–V.

Pompowanie hydrowęzłowe otworu V trwało przez 74 h z wydajnością  $Q = 173 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const.}$  Wyniki obserwacji zachowania się zwierciadła wody w otworach



Rys. 9.9. Szkic sytuacyjny otworów hydrogeologicznych w rejonie Szczecinka (I–IV, studnie, P1–P4, otwory obserwacyjne)

I-IV przedstawiono w postaci wykresów  $\lg s = f\left(\frac{t}{r^2}\right)$  (rys. 9.11). Wykresy doświadczalne zinterpretowano jako wykresy funkcji Theisa. W związku z tym parametry obliczono według wzorów [5.2] i [5.3].

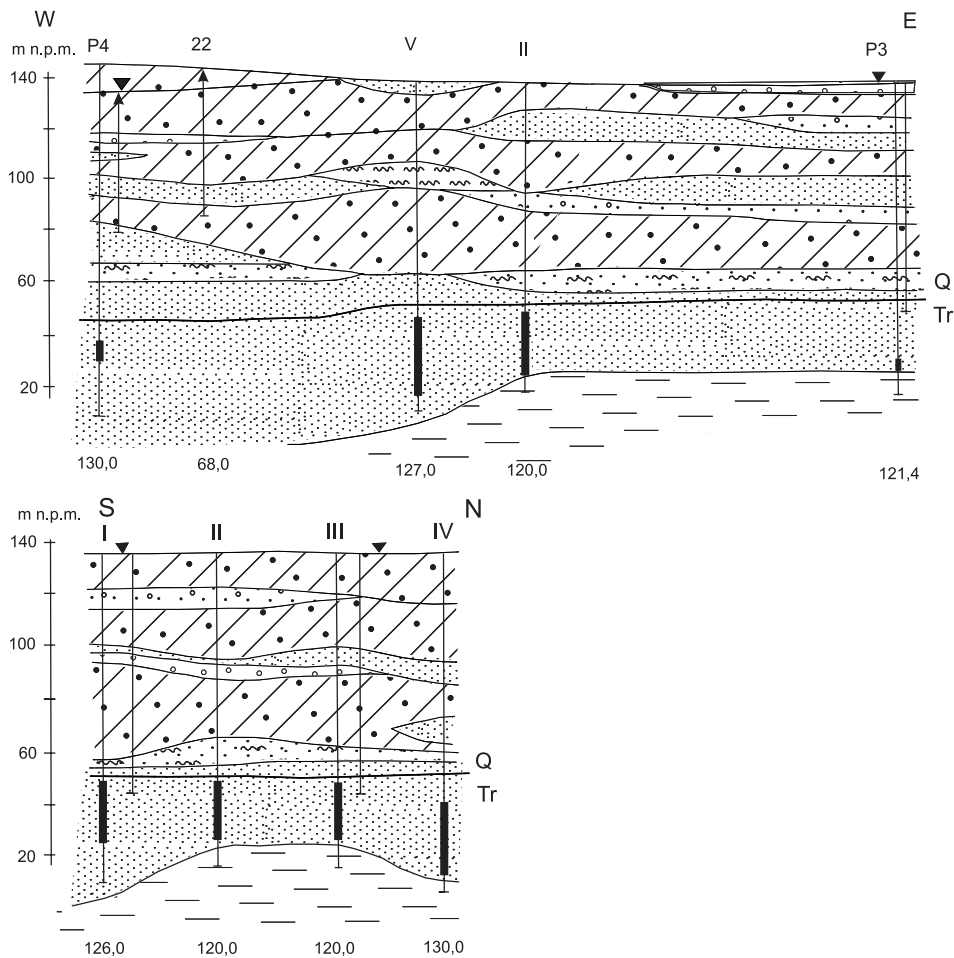
Wykresy doświadczalne  $\lg s = f\left(\frac{t}{r^2}\right)$  dla poszczególnych otworów nie nałożyły się na siebie pomimo identycznej ich postaci. Oznacza to, że w obrębie warstwy przewodność jest zróżnicowana, a zbliżona tylko w otworach I oraz IV.

Obliczenia dla otworów I i IV:

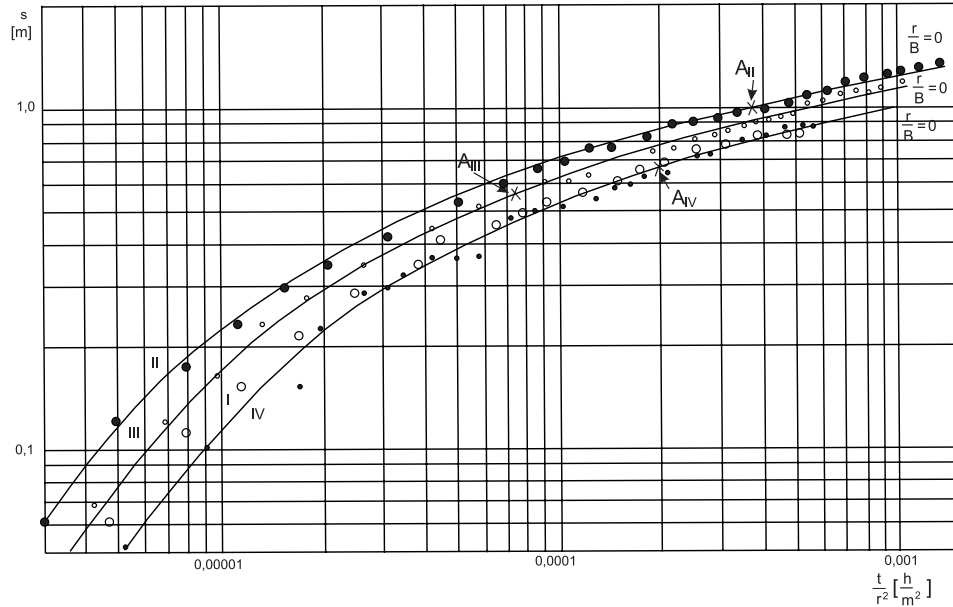
Dane  $Q = 173 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r_I = 384 \text{ m}$ ,  $r_{IV} = 364 \text{ m}$ ,  $m_{sr} = 52,0 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego  $A_{IV}$ :

$E(z) = 2,25$ ,  $z = 10,0$ ,  $s = 0,64 \text{ m}$ ,  $\frac{t}{r^2} = 0,0002$ .



Rys. 9.10. Przekroje geologiczne w rejonie Szczecinka



Rys. 9.11. Mioceno-plejstocenska warstwa wodonośna w rejonie Szczecinka. Wykresy  $\lg s = f\left(\frac{t}{r^2}\right)$  dla otworów I, II, III, IV z pompowania otworu V

Wyniki obliczeń:

$$T = \frac{Q}{s} E(z) = \frac{173 \cdot 0,25}{0,64} = 67,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{m} = \frac{67,6}{52} = 1,3 \text{ m/h}$$

$$\mu_s = \frac{T \cdot t}{z \cdot r^2} = \frac{T}{z} \left( \frac{t}{r^2} \right) = \frac{67,6 \cdot 0,0002}{10} = 0,00135,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{67,6}{0,00135} = 50000 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Obliczenia dla otworu II:

Dane:  $Q = 173 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r_{II} = 226,0 \text{ m}$ ,  $m = 42,0$ .

Współrzędne punktu arbitralnego  $A_{II}$ :

$$E(z) = 0,35, z = 35, s = 1,0 \text{ m}, \frac{t}{r^2} = 0,00037 \text{ h}.$$

Wyniki obliczeń:  $T = 60,5 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $\mu_s = 0,00064$ ,  $a = 94600 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $k = 1,44 \text{ m/h}$ .

Obliczenia dla otworu III:

Dane:  $Q = 173 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r_{III} = 246 \text{ m}$ ,  $m = 45,0 \text{ m}$ .



Współrzędne punktu arbitralnego  $A_{III}$ :  $E(z) = 0,2$ ,  $z = 5,0$ ,  $s = 0,55$  m,  
 $\frac{t}{r^2} = 0,000074$ .

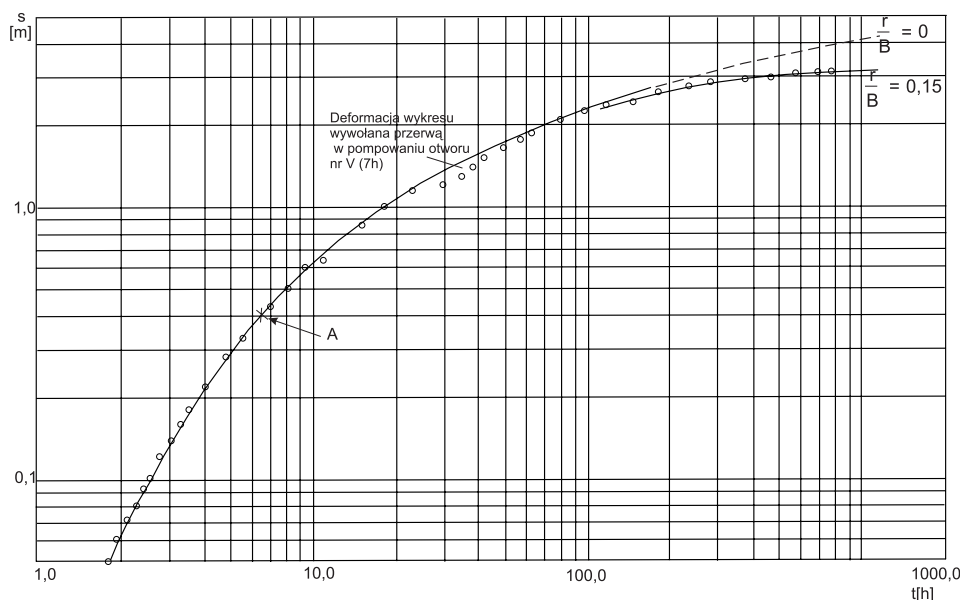
Wyniki obliczeń:  $T = 62,9$  m<sup>2</sup>/h,  $\mu_s = 0,00093$ ,  $a = 67568$  m<sup>2</sup>/h,  $k = 1,4$  m/h.

**Pompowanie zespołowe.** Wykonano je na jednym stopniu dynamicznym przy maksymalnej wydajności wszystkich pięciu otworów (I-V). Pompowanie prowadzono ze stałym wydatkiem  $Q_s = 853$  m<sup>3</sup>/h przez 32 dni. Obserwowano zachowanie się zwierciadła wody zarówno w otworach pompowanych, jak i obserwacyjnych. Dla zobrazowania możliwości obliczeń parametrów filtracyjnych sporządzono wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla piezometru P3, odległego od centrum eksploatowanego zespołu o  $r_z = 775$  m (rys. 9.12). Wykres ten zidentyfikowano jako równoważny funkcji przesiąkania Hantusha  $\frac{r}{B} = 0,15$ . Odchylenie wykresu doświadczalnego od wykresu Theisa nastąpiło po upływie 150 h; stąd przy pompowaniu hydrowęzłowym otworu V, trwającym 73 h, proces przesiąkania nie mógł się zaznaczyć. Uważa się, że dopływ wód z przesiąkania do pompowanej warstwy nastąpił z warstw wodonośnych nadległych (rys. 9.10). Proces ten mógł wystąpić dopiero, gdy w badanej warstwie wodonośnej wystąpił spadek ciśnienia o 1–2 m, tj. w wielkości przekraczającej naturalną różnicę ciśnień na korzyść dolnej warstwy.

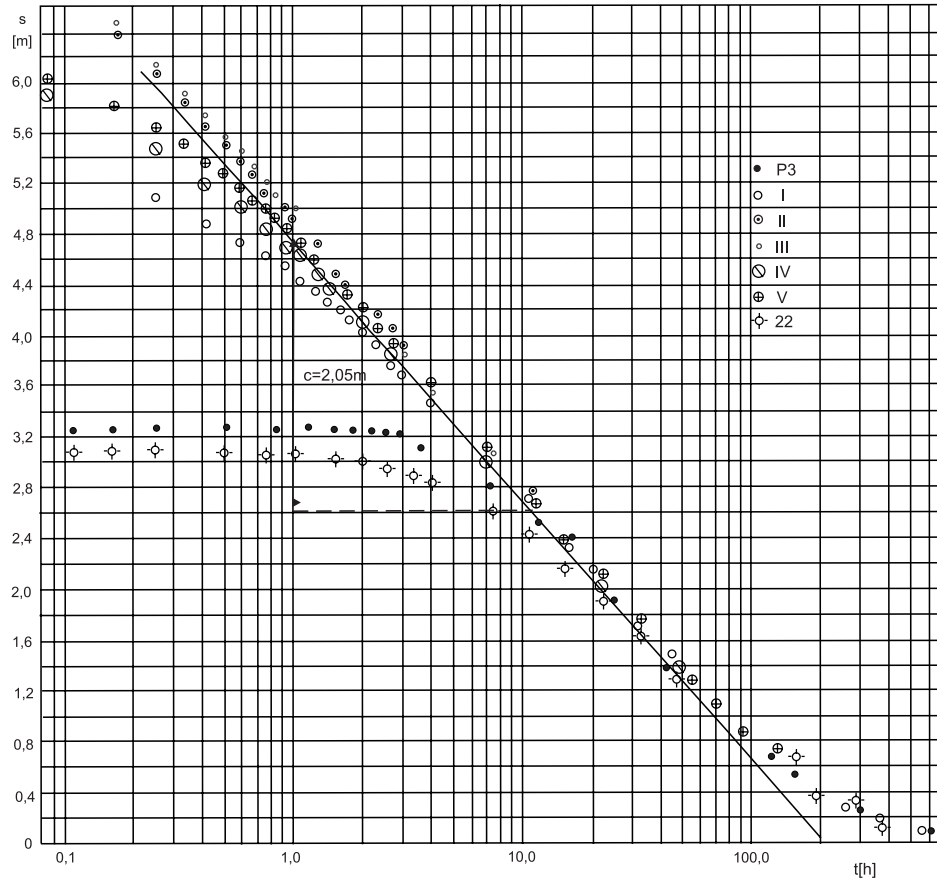
Obliczenia parametrów filtracyjnych dla piezometru P3 (rys. 9.12), według wzorów [5.7] i [5.8]:

Obliczenia parametrów filtracyjnych dla piezometru P3 (rys. 9.12), według wzorów [5.7] i [5.8]:

Dane:  $Q_s = 853$  m<sup>3</sup>/h,  $r_z = 775$  m,  $m_{sr} = 51$  m.



Rys. 9.12. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu obserwacyjnego P3 z pompowania zespołowego w rejonie Szczecinka



Rys. 9.13. Wykresy  $s = f(\lg t)$  wzniosu zwierciadła wody w otworach badawczych po pompowaniu zespołowym w rejonie Szczecinka

Współrzędne punktu arbitralnego na krzywej  $\frac{r}{B} = 0,15$ :

$E(z) = 0,04$ ,  $z = 0,47$ ,  $s = 0,405$  m,  $t = 6,5$  h.

Wyniki obliczeń:

$$T = \frac{Q}{s} E(z, \frac{r}{B}) = \frac{853 \cdot 0,04}{0,405} = 84,2 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$k = \frac{T}{m} = \frac{84,2}{51} = 1,65 \text{ m/h},$$

$$\mu_s = \frac{T \cdot t}{z \cdot r^2} = \frac{84,2 \cdot 6,5}{775^2 \cdot 0,47} = 0,0019,$$

$$a = \frac{T}{\mu_s} = \frac{84,2}{0,0019} = 43000 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\frac{r}{B} = 0,15, \text{ więc } B = \frac{775}{0,15} = 5167 \text{ m,}$$

$$R = 1,12 B = 1,12 \cdot 5167 = 5800 \text{ m.}$$

Po pompowaniu zespołowym przez 650 h wykonano pomiary wzniosu zwierciadła wody w otworach pompowanych i obserwacyjnych. Wyniki obserwacji zestawiono i zinterpretowano na wykresach  $s = f(\lg t)$  (rys. 9.13). Wykres ten odzwierciedla nieograniczony dość jednorodny charakter badanego zbiornika wód podziemnych, gdyż poszczególne wykresy wzniosu po około 10 h układają się na jednej krzywej. Tę wspólną krzywą przybliżono linią prostą dla obliczenia średniej wartości przewodności według wzoru [5.5];

Dane:  $Q = 853 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $m_{sr.} = 51 \text{ m}$ ,  $c = 2,05 \text{ m}$ .

Wyniki obliczeń:

$$T_{sr} = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 853}{2,05} = 76,1 \text{ m}^2/\text{h,}$$

$$k = \frac{T}{m} = \frac{76,1}{51} = 1,5 \text{ m/h.}$$

Podany przykład obrazuje typowe warunki hydrodynamiczne poziomu mioceńskiego z nadkładem wodonośnych utworów czwartorzędowych na Pojezierzu Zachodniopomorskim.

## 9.2. Mezozoiczne masywy skał szczelinowych

### 9.2.1. Masyw górnojurajski w rejonie Rawy Mazowieckiej

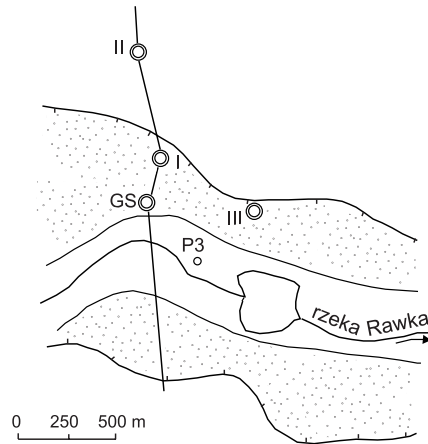
Pompowanie zespołowe studni ujmujących poziom górnojurajski w rejonie Boguszyc koło Rawy Mazowieckiej wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Łodzi w latach 1974–1975. Trzy otwory rozpoznawcze, ujmujące otwory wodonośne w postaci spękanych wapieni oksfordu odwiercono na obszarze wyższego tarasu rzeki Rawki (rys. 9.14).

Schematyczny przekrój geologiczny przez masyw skał szczelinowych i dolinę Rawki przedstawia rysunek 9.15.

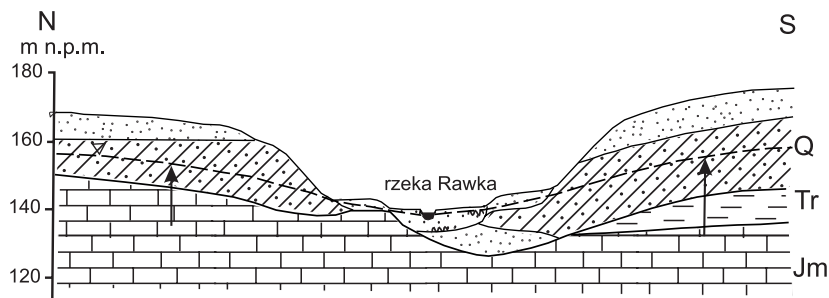
Poniżej podano opis oraz interpretację wyników pompowania zespołowego dwóch otworów rozpoznawczych, oznaczonych na szkicu jako I i III (rys. 9.14). Badania przeprowadziły: K. Czeplińska-Smalczyńska i G. Wójcik. Otwory I i III pompowano na jednym stopniu dynamicznym z wydajnością łączną:

$$Q = Q_I + Q_{III} = 211 + 234 = 445 \text{ m}^3/\text{h.}$$

Obserwowano dwie studnie piętra jurajskiego: II – na wysoczyźnie i GS – na tarasie doliny Rawki, na którym znajdują się również pompowane otwory. Ponadto obserwowano również piezometr P3, założony w aluwiach Rawki. Wykresy wskaźnikowe  $s = f(\lg t)$  przedstawia rysunek 9.16.



Rys. 9.14. Szkic sytuacyjny otworów hydrogeologicznych w dolinie Rawki w rejonie Boguszyc



Rys. 9.15. Schematyczny przekrój geologiczny przez masyw skał szczelinowych w dolinie Rawki w rejonie Boguszyc

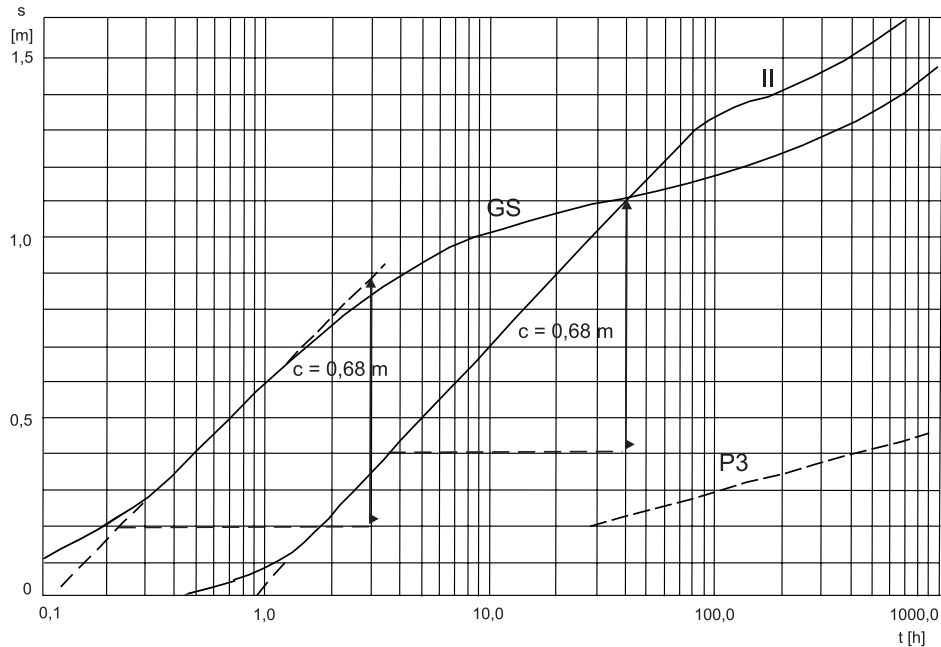
Uwidacznia się na tym rysunku zróżnicowana w czasie reakcja otworów GS i II na zjawisko przesiąkania wód z doliny Rawki do poziomu jurajskiego, które jest udokumentowane obniżaniem się zwierciadła wody w piezometrze P3 w aluwiach Rawki. Mamy więc do czynienia w przypadku interpretacji tego pompowania ze zjawiskiem opisanym równaniem Boultona. Na rysunku 9.17 przedstawia się wykres doświadczalny z opadania zwierciadła wody w otworze II w postaci funkcji  $\lg s = f(\lg t)$ , który zidentyfikowano jako wykres funkcji  $\frac{r}{B} = 0,2$  na nomogramie Boultona (plansza IV).

Obliczenia parametryczne:

Dane:  $Q = 445 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $r = 760 \text{ m}$ .

Współrzędne punktu arbitralnego:

- dla krzywej typu A:  $s = 0,40$ ,  $t = 4,5 \text{ h}$ ,  $W(u_A, \frac{r}{B_1}) = 1$ ,  $\frac{1}{u_A} = 3,8$ ,
- dla krzywej typu B:  $s = 1,50$ ,  $t = 465 \text{ h}$ ,  $W(u_y, \frac{r}{B_1}) = 4$ ,  $\frac{1}{u_y} = 70$ ,



Rys. 9.16. Wykresy wskaźnikowe  $s = f(\lg t)$  dla otworów II, GS, P3 z pompowania zespołowego (poziom wód górnourajskich w rejonie Boguszyc)

Wyniki obliczeń:

– krzywa A:

$$T = 0,08 \frac{Q}{s} W(u_A, \frac{r}{B_1}) = 0,08 \frac{445}{0,4} \cdot 1 = 89,0 \text{ m}^2/\text{h},$$

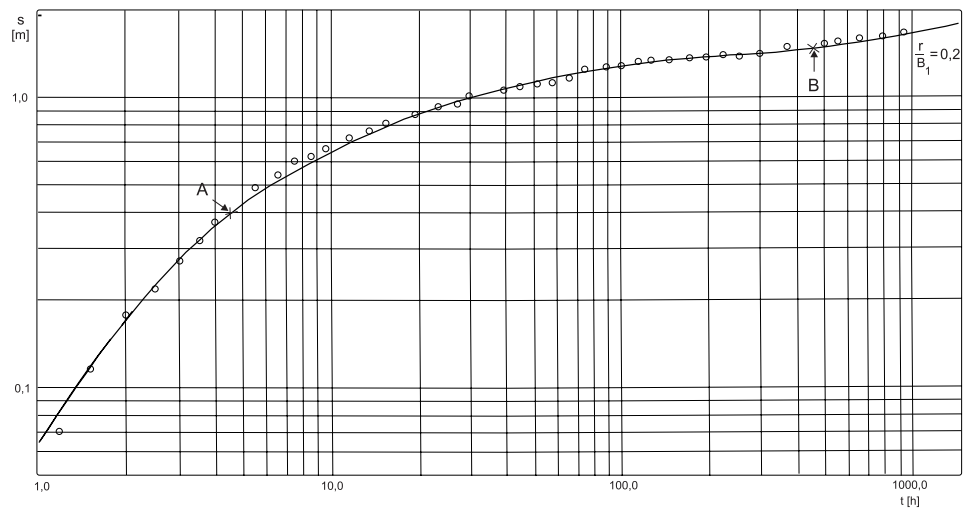
$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u_A}\right)} = \frac{4 \cdot 89 \cdot 4,5}{760^2 \cdot 3,8} = 0,00073,$$

– krzywa B:

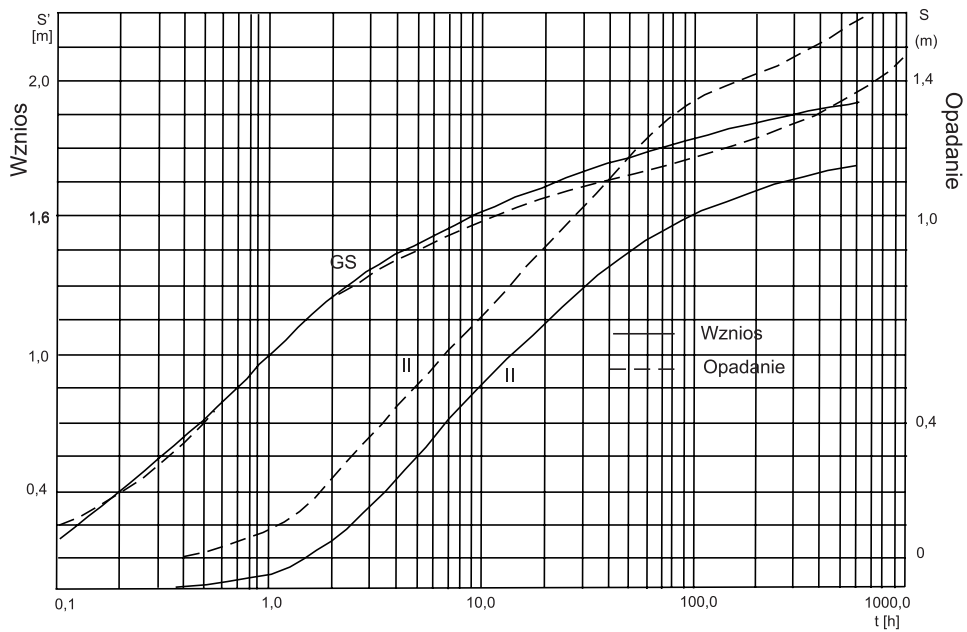
$$T = 0,08 \frac{Q}{s} W(u_y, \frac{r}{B_1}) = 0,08 \frac{445}{1,5} \cdot 4 = 94,9 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_s = \frac{4Tt}{r^2 \left(\frac{1}{u_y}\right)} = \frac{4 \cdot 94,9 \cdot 465}{760^2 \cdot 70,0} = 0,0044.$$

Na rysunku 9.18 przedstawiono porównanie wykresów wzniosu po pompowaniu zespołowym z wykresami opadania podanymi na rysunku 9.16. Z porównania wynika brak znaczącego dopływu wody od strony wysoczyzny. Ujęcie wód podziemnych z utworów górnourajskich będzie więc bazować prawie wyłącznie na zasileniu zasobów z doliny Rawki.



Rys. 9.17. Wykres  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu II z pompowania zespołowego otworów I i III w rejonie Boguszyc



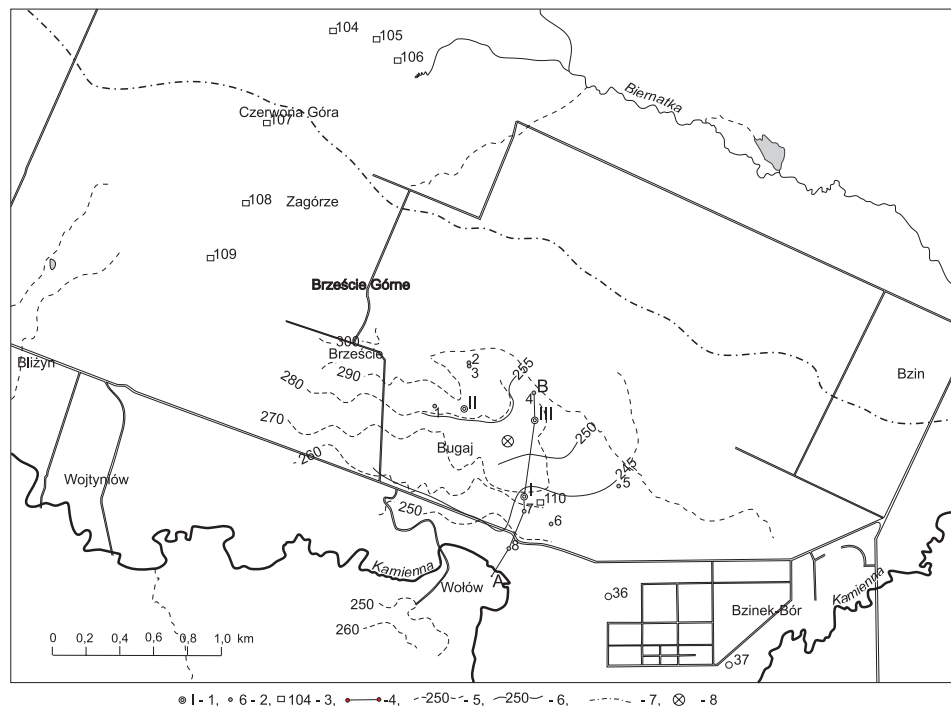
Rys. 9.18. Porównanie wykresów  $s = f(\lg t)$  opadania i wzniosu zwierciadła wody z pompowania zespołowego w rejonie Boguszyc

### 9.2.2. Masyw triasowy w rejonie Skarżyska-Kamiennej

Badanie filtracji nieustalonej w pompowaniu zespołowym przeprowadzono dla potrzeb ustalenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia wody Bugaj dla Skarżyska-Kamiennej.

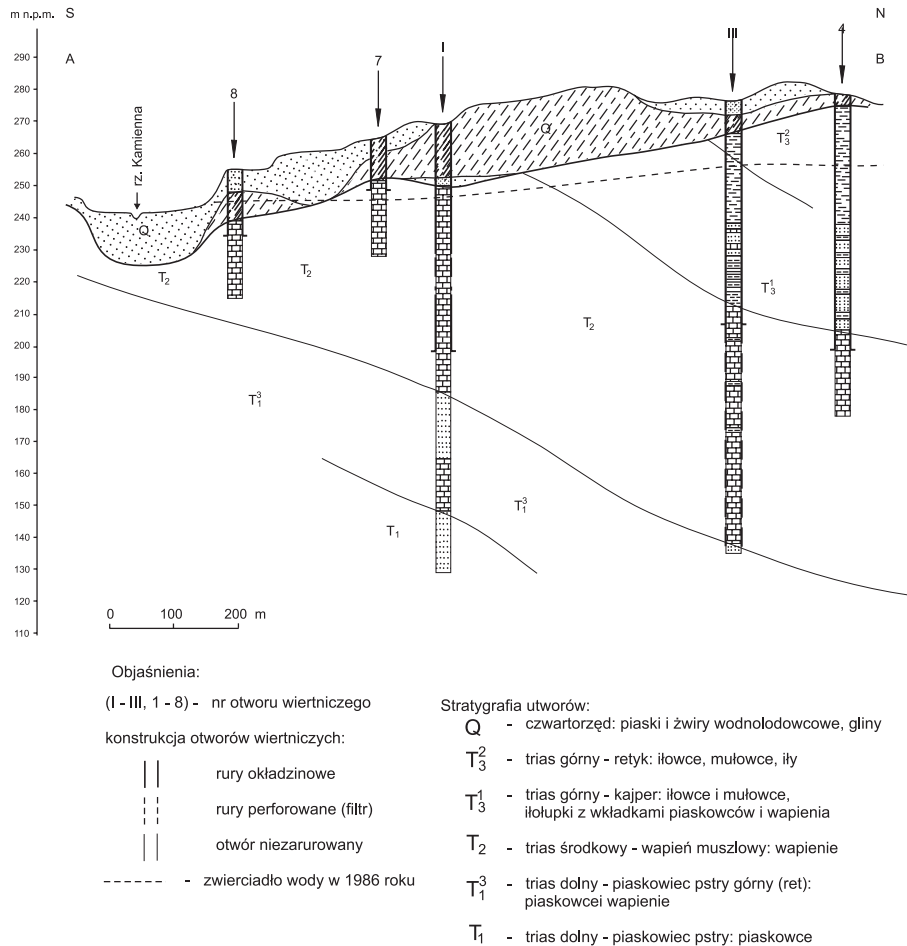
Opisano przykład reakcji hydrodynamicznej systemu wodonośnego w masywie skał szczelinowo-porowych triasu w strefie wododziałowej rzeki Kamiennej i Biernatki. Lokalizację ujęcia wody Bugaj ilustruje rysunek 9.19.

Podany przykład pochodzi z materiałów archiwalnych Zakładu Prac i Dokumentacji Geologicznych w Kielcach. Badania hydrogeologiczne ujęcia prowadzili: Dobrochna Maszońska i Jan Prażak. Prowadzono je w dwóch etapach; w roku 1977 wykonano otwory studzienne nr I, II, III i próbne pompowania trójstopniowe otworów dla określenia ich wydatku i współczynnika filtracji, w latach 1986–1987 zaś wykonano otwory obserwacyjne, przeprowadzono powtórne pompowania otworów studziennych na 1. stopniu wydajności w czasie 24–43 h, prowadząc obserwacje opadania i wzniosu zwierciadła wody w otworach pompowanych i obserwacyjnych dla obliczeń parametrów z filtracji nieustalonej, po czym wykonano miesięczne pompowania zespołowe z obserwacjami opadania i wzniosu zwierciadła przez okres jednego roku dla określenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia.



Rys. 9.19. Mapa sytuacyjna ujęcia komunalnego Bugaj koło Skarżyska-Kamiennej

- 1 – studnie, 2 – piezometry, 3 – otwory badawcze, 4 – linia przekroju hydrogeologicznego, 5 – hydroizohipsy pierwszego poziomu (gruntowy), 6 – hydroizohipsy poziomu wodonośnego triasu, 7 – dział wodny, 8 – środek ciężkości poboru wody podczas pompowania zespołowego



Rys. 9.20. Przekrój hydrogeologiczny A-B

Ujęcie Bugaj położone jest na międzyrzeczu rzeki Kamiennej i jej dopływu Biernatki, przy czym studnie nr II i III znajdują się w strefie wododziałowej rzek, studnia nr I zaś już na strumieniu wód podziemnych skierowanym ku Kamiennej (rys. 9.19). Budowę geologiczną oraz sytuację hydrogeologiczną rejonu pokazują rysunki 9.19 i 9.20. Główną strukturę wodonośną stanowi tu masyw skał szczelino-wo-porowych triasu środkowego i dolnego, wykształconych w postaci wapieni i piaskowców, izolowany w części północnej, wododziałowej ilowcami i mułowcami z wkładkami piaskowców i wapieni triasu górnego. Utwory triasowe przykrywa ciągła pokrywa utworów czwartorzędowych o miąższości od kilku do 20 m, wykształcona w postaci glin morenowych, pokryw piaszczystych fluwioglacjalnych oraz osadów rzecznych dolin.

Główny poziom wodonośny rejonu stanowią wapienie triasu środkowego, ujęte wykonanymi otworami studziennymi, w tym w otworze nr I łącznie z piaskowcami i wapieniami triasu dolnego. W obrębie pokrywowych czwartorzędowych utwo-



rów piaszczystych występuje nieciągły poziom wodonośny o charakterze zawieszonym w stosunku do poziomów triasu, który wraz ze słabo przepuszczalnymi glinami zwałowymi przejmuje infiltrujące wody opadowe, skąd następuje ich przesiąkanie do niżej zalegających warstw triasu.

Poziom triasowy posiada charakter swobodno-naporowy; swobodny przeważnie w strefie pokrywy czwartorzędu, naporowy zaś w strefie występowania utworów słabo i bardzo słabo przepuszczalnych triasu górnego (rys. 9.20). Bazę drenażu wód podziemnych tego rejonu stanowią doliny rzeki Kamiennej i Biernatki. W obszarze objętym badaniami zasilanie poziomu w warunkach naturalnych pochodzi wyłącznie z zasilania infiltracyjnego z opadów i przesiąkania z nadległego poziomu w utworach czwartorzędu.

**Pompowanie zespołowe otworów nr I, II, III.** Pompowanie to prowadzono w dniach 26.06 godz. 11.00 do 28.07.1987 godz. 11.00, tj. przez 786 h, przy czym po 457 h pompownia wyłączono studnię nr II, ze względu na przekroczenia obniżenia dopuszczalnego dynamicznego zwierciadła wody. Wynik badań zestawiono na wykresach  $s = f(\lg t)$  oraz  $s' = f(\lg t')$  z których przedstawiono w niniejszym przykładzie tylko dla otworu nr III, 4 (rys. 9.22).

Wznios zwierciadła wody prowadzono do 20.06.1987 r., tj. przez 11 miesięcy. Pomiar zwierciadła wody w trakcie pompowania prowadzono w otworach pompowanych, obserwacyjnych oraz studni kopanej. Obraz rozwoju lejki depresyjnego w obrębie systemu wodonośnego przedstawiono na przekroju (rys. 9.21). Zdepresjonowanie zwierciadła wody objęło cały system wodonośny triasu na międzyrzeczu oraz poziom zawieszony w utworach czwartorzędu obserwowany w studni kopanej nr 63 i było największe w strefie wododziałowej (rejon studni II i III), zmniejszając się ku dolinie rzeki Kamiennej.

Średni wydatek pompowania zespołowego 3 otworów I, II, III przez 457 h, do czasu wyłączenia otworu nr II, wynosił 467,1 m<sup>3</sup>/h, od 457 h zaś do końca pompowania – 768 h –  $Q = 287,7$  m<sup>3</sup>/h. Wydatki średnie poszczególnych studni w pompowaniu wynosiły:

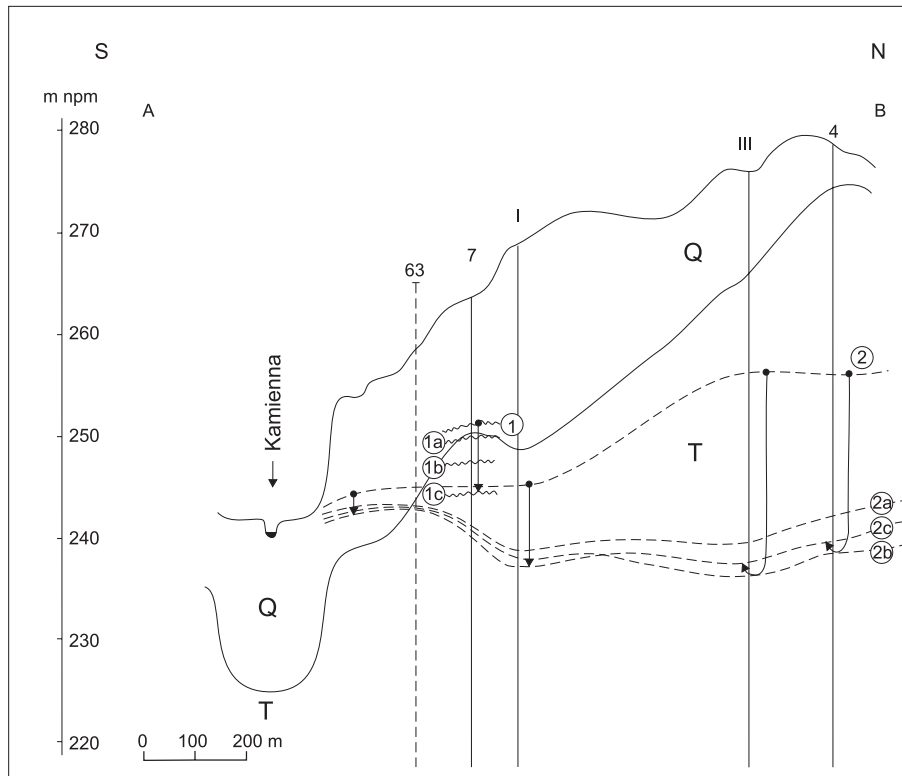
- nr I – 167,3 m<sup>3</sup>/h;
- nr II – 179,45 m<sup>3</sup>/h;
- nr III – 120,0 m<sup>3</sup>/h.

Depresje w otworach pompowanych i położonych w ich pobliżu otworach obserwacyjnych po 457 h wyniosły:

- nr I – 6,49 m; nr 5 – 0,65 m; nr 8 – 1,19 m;
- nr II – 17,31 m; nr 1 – 14,68 m; nr 2 – 14,60 m;
- nr III – 18,53 m; nr 4 – 16,10 m.

Ogólna ilość wypompowanej wody w trakcie pompowania zespołowego osiągnęła wielkość w poszczególnych w otworach: I – 128 495 m<sup>3</sup>, II – 82 010 m<sup>3</sup>, III – 92 506 m<sup>3</sup>, łącznie 303 012 m<sup>3</sup>.

Prowadzone obserwacje wzniosu zwierciadła wody przez 11 miesięcy wykazały w studni nr I i otworze obserwacyjnym nr 8 powrót do stanu sprzed pompowania po 5 miesiącach, a po 11 miesiącach istnienie nadal w strefie wododziałowej depresji w otworach: studni nr II – 2,06 m; nr 1 – 2,19 m; nr 2 – 2,18 m; studni nr III – 1,83 m, nr 4 – 2,94 m.




Objaśnienia:

8

 - studnie i piezometry

63

 - głębokość studni kopanej nr 63 rztowana na linię przekroju

Q

- czwartorzęd

T

- trias

Poziomy zwierciadła wody:

①

- studnia kopana  
- zw. wody statyczne poziomu zawieszonoego w studni kopanej - stan na dzień 3-4.06.86 r.

②

- studnia wiercona  
- zw. wody statyczne poziomu eksploatowanego - stan na dzień 3-4.06.86 r.

a

- stan po 144 godzinach pompowania zespołowego

b

- stan po 457 godzinach pompowania zespołowego - przed wyłączeniem st. nr II

c

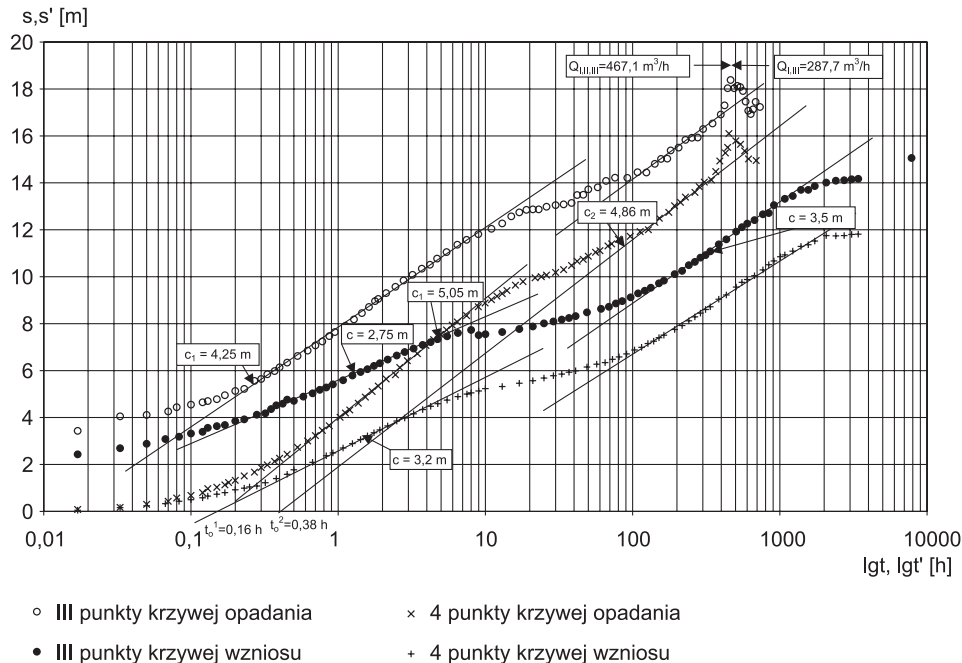
- stan po 768 godzinach pompowania zespołowego - przed zakończeniem pompowania



- maksymalne obniżenie zw. wody w otworach w czasie pompowania

Rys. 9.21. Schematyczny obraz rozwoju leja depresji w czasie pompowania zespołowego (nie uwzględniono wielkości zeskoku w strefie przyotworowej)

Powyższe obserwacje wykazały zróżnicowaną odnawialność wód systemu wodonośnego, najszybszą w strefie przyległej do doliny Kamiennej (odnowienie zasobów zmagazynowanych po 5 miesiącach), dużo niższą zaś, ponad 2-krotnie, w strefie wododziałowej – brak odnowienia zasobów zmagazynowanych jeszcze po 11 miesiącach.



Rys. 9.22. Wykresy opadania i wzniosu zwierciadła wody w studni III i piezometrze 4 w funkcji  $s = f(\lg t)$  i  $s' = f(\lg t')$  podczas pompowania zespołowego studni I, II i III na ujęciu Bugaj koło Skarżyska-Kamiennej w dniach 26.06–28.07.1986. Wydatki  $Q_{I, II, III} = 467,1 \text{ m}^3/\text{h}$  dla  $t_p = 457 \text{ h}$ ,  $Q_{I, II, III} = 287,7 \text{ m}^3/\text{h}$  dla  $t_p$  od 457 h do 768 h

### Obliczenie uśrednionych parametrów filtracyjnych z obserwacji opadania i wzniosu zwierciadła wody wg metody Theisa-Jacoba

Prowadzone obserwacje podczas pompowania zespołowego wykazały, że istniejący stan hydrodynamiczny o charakterze swobodno-naporowym przeszedł w stan swobodny, o czym świadczą wykresy  $s, s' = f(\lg t, t')$  przedstawione na rysunku 9.22. Dla interpretacji parametrów filtracyjnych traktowanych jako uśrednione obszarowo zastosowano metodę przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba. Na rysunku 9.22 krzywe doświadczalne  $s, s' = f(\lg t, t')$  z otworów III pompowanego i nr 4 obserwacyjnego, znajdującego się 330 m od środka ciężkości pompowania zespołowego, przybliżono prostymi dla dwu odcinków z faz opadania i wzniosu zwierciadła wody i odczytano ich nachylenia  $c$  oraz dla krzywej otworu nr 4 –  $t_0$ .

#### Obliczenie dla krzywych opadania przy $Q = 467,1 \text{ m}^3/\text{h}$

Otwór nr III:  $c_1 = 4,25 \text{ m}$ ,  $c_2 = 4,86 \text{ m}$ .

$$\text{Stąd: } T_1 = \frac{0,183 \cdot Q}{c_1} = \frac{0,183 \cdot 467,1}{4,25} = 20,1 \text{ m}^3/\text{h},$$

$$T_2 = \frac{0,183 \cdot Q}{c_2} = \frac{0,183 \cdot 467,1}{4,86} = 17,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

Otwór nr 4:  $c_1 = 5,05$  m,  $t_0^1 = 0,16$  h,  $c_2 = 4,86$  m,  $t_0^2 = 0,38$  h.

$$\text{Stąd: } T_1 = \frac{0,183 \cdot Q}{c_1} = \frac{0,183 \cdot 467,1}{5,05} = 16,9 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_1 = \frac{2,25 \cdot T_1 \cdot t_0^1}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 16,9 \cdot 0,16}{330^2} = 0,000056,$$

$$T_2 = \frac{0,183 \cdot Q}{c_2} = \frac{0,183 \cdot 467,1}{4,86} = 17,6 \text{ m}^2/\text{h},$$

$$\mu_2 = \frac{2,25 \cdot T_2 \cdot t_0^2}{r^2} = \frac{2,25 \cdot 17,6 \cdot 0,38}{330^2} = 0,00014 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Podany przykład ilustruje potrzebę wykonywania w określonych przypadkach pompowań zespołowych o długim okresie pompowania, dopiero bowiem w ich wyniku uzyskano sprawdzenie reakcji złożonego systemu wodonośnego na szczypanie zasobów statycznych i sprężystych. Dotyczy to w szczególności stref wododziałowych, które z natury rzeczy cechują się strumieniami rozbieżnymi, a wytworzony pompowaniem zespołowym lej depresji wprowadza odmienną organizację tych strumieni. Warunki ustalonego dopływu wody do projektowanego ujęcia mogłyby nastąpić dopiero po ukształtowaniu się w pełni profilu zdepresjonowanego zwierciadła wody (leja depresji) w masywie triasowym na głębokości poniżej położenia zwierciadła wody gruntowej w aluwiach rzeki Kamiennej (patrz: rys. 9.20 i rys. 9.21). Byłoby to związane z pojawieniem się w bilansie zasobów eksploatacyjnych ujęcia z triasu dodatkowych zasobów wzbudzonych, napływających z czwartorzędowej struktury hydrogeologicznej, i z konsekwencjami dla jakości czerpanych wód w tak zmienionych warunkach hydrodynamicznych. Tego rodzaju ocena ilościowa nie byłaby możliwa na drodze interpretacji przeprowadzonych krótkich pompowań indywidualnych. Sporządzenie modelu matematycznego wymagałoby dla identyfikacji opisanego systemu co najmniej testowego pompowania hydrowęzłowego w wydłużonym czasie.

## 10. PRÓBNE POMPOWANIA W DOKUMENTOWANIU ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH

Według przepisów o ustalaniu zasobów wód podziemnych przez zasoby eksploatacyjne rozumie się ilość wody podziemnej, którą można pobierać w określonej jednostce czasu z ujęcia w określonych warunkach środowiska oraz warunkach hydrogeologicznych i technicznych. Warunki ograniczające skutki eksploatacji powinny być one określane na zasadzie optymalizacji.

Prognozowanie zasobów eksploatacyjnych  $Q_e$  wiąże się z rozwiązywaniem następującego równania bilansowego:

$$Q_e = Q_d + Q_i + \frac{V}{t}, \quad [10.1]$$

gdzie:

$Q_d$  – zasoby dynamiczne,

$Q_i$  – zasoby uzupełniające (wzbudzone),

$V$  – zasoby statyczne,

$t$  – czas eksploatacji ujęcia równy okresowi szczytowania zasobów statycznych,

Rozpatrując podane równanie na tle przedstawionych w niniejszym opracowaniu metod interpretacji próbnych pompowań, można zauważyć, że próbne pompowania hydrowęzłowe i zespołowe ujawniają poszczególne składniki zasobów lub co najmniej dają informację o możliwości ich wystąpienia. Analizując poszczególne składniki podanego równania zasobowego [10.1], można stwierdzić, że:

- zasoby dynamiczne  $Q_d$  są określane według wzoru Darcy'ego [2.1] z parametrów strumienia wód podziemnych, który można również zapisać w postaci:

$$Q_d = L T I,$$

gdzie:  $L$  – szerokość strumienia,

- zasoby statyczne  $V$ : sprężyste dla warstw naporowych; grawitacyjne dla warstw o zwierciadle swobodnym są związane z warunkami filtracji nieustalanej opisanymi równaniami Theisa [2.21] i Boultona [2.30] przy danym czasie eksploatacji  $t$ ,
- zasoby wzbudzone (uzupełniające)  $Q_i$  pojawiają się z przesiąkania wody z warstw hydraulicznie związanych z warstwą eksploatowaną, a proces ich ujawniania opisany jest równaniem Hantusha [2.29],
- zasoby z infiltracji wód powierzchniowych  $Q_i$  ujawniające się w dopływie opisują równania Theisa [2.38] i Dupuita-Thiema [2.39] uwzględniające wpływ granicy zasilającej.

Bindeman i Jazwin (1970) słusznie podkreślają, że równania hydrodynamiczne dopływu wody do studni lub ich zespołu są równocześnie równaniami bilansowymi i mogą być w określonych przypadkach stosowane do analitycznego prognozowania

wania wielkości zasobów eksploatacyjnych na podstawie parametrów filtracyjnych uzyskanych z próbných pompowań hydrowęzłowych i znajomości typu granic badanej struktury wodonośnej.

Zakres badań i prognoz dla ujęcia jest uzależniony od przewidywalnej wydajności ujęcia, stopnia skomplikowania warunków hydrogeologicznych i zagrożeń dla jakości wód. Ze względu na powyższe w „Metodyce określania zasobów eksploatacyjnych ujęć zwykłych wód podziemnych” (Dąbrowski i in., 2004) przyjęto podział na:

1. małe ujęcia o zasobach (zapotrzebowaniu) do 50 m<sup>3</sup>/h,
2. duże ujęcia o zasobach (zapotrzebowaniu) przekraczających 50 m<sup>3</sup>/h,
3. ujęcia pracujące w specyficznych warunkach hydrogeologicznych i użytkowania terenu (niezależnie od wielkości zasobów i zapotrzebowania) określonych przez jeden z poniższych czynników:
  - ujęcia infiltracyjne,
  - warunki hydrogeologiczne zaburzone prowadzonym odwadnianiem górniczym, trwałym budowlanym i melioracją,
  - znaczne zagrożenie jakości wód,
  - ujęcia na terenach ograniczonego użytkowania.

Do obliczeń zasobów eksploatacyjnych, stosowane są następujące metody analityczne: hydrauliczna i hydrodynamiczna oraz metody modelowania matematycznego.

**Metody hydrauliczne**, zwane też metodami ograniczonej ekstrapolacji (Pazdro, 1977, str. 469–474), opierają się na wzorach empirycznych, określających związek między wydajnością i depresją w studni  $Q = f(s)$  zależny od oporów hydraulicznych w warstwie, w strefie wokółfiltrowej, na filtrze i w samej studni. Wzory te nie uwzględniają ani odnawialności zasobów warstwy, ani zasobów uzupełniających, ponieważ do ekstrapolacji zasobowej nie są włączone parametry strumienia filtracyjnego.

**Metody hydrodynamiczne** są grupą metod o wiele dokładniejszą niż metody hydrauliczne, ponieważ bazują na hydrodynamicznych równaniach dopływu do studni lub zespołu studzien. Równania te, jak już uprzednio wspomniano, są również równaniami bilansowymi i po odpowiednim ich przekształceniu służyć mogą do prognozowania zasobów eksploatacyjnych,

**Metody modelowania matematycznego** są grupą metod, które bazują na rozwiązywaniu ogólnych równań przepływu wód podziemnych [2.6]–[2.8], najdokładniej odwzorowujących strumień wód podziemnych, jego granice oraz bilans w warunkach naturalnych i eksploatacyjnych. Stwarzają przez to szereg możliwości dla rozwiązań optymalizacyjnych odnośnie do lokalizacji ujęć.

Rozpatrując zastosowanie poszczególnych metod, uważa się, że:

- metody hydrauliczne mogą służyć do obliczeń zasobów eksploatacyjnych małych ujęć wód podziemnych założonych w warstwach rozpoznanych o zasięgu regionalnym lub małych ujęć infiltracyjnych, gdyż w innych przypadkach są zawodne,
- metody hydrodynamiczne jako grupa najdokładniejszych i najpewniejszych metod obliczeń analitycznych powinny służyć do obliczeń zasobów eksploatacyj-

nych zarówno małych, jak i dużych ujęć wód podziemnych założonych w warstwach o zasięgu regionalnym,

- metody modelowania matematycznego powinny być stosowane do obliczeń zasobów dużych ujęć wód podziemnych w warstwach wodonośnych o złożonych warunkach zasilania oraz w szczegółowym dokumentowaniu regionalnym zasobów wód podziemnych.

Jak wynika z dokonanego przeglądu stosowanych metod obliczeń zasobów wód podziemnych, bez wykonywania próbnych pompowań i ich analizy według zasad podanych w niniejszym opracowaniu niemożliwe jest stosowanie metod hydrodynamicznych i modelowania matematycznego do obliczeń zasobów wód podziemnych.

W niniejszym rozdziale podano przykład opracowania analitycznej prognozy hydrodynamicznej dla ujęcia wód podziemnych oraz wykorzystania wyników próbnego pompowania w warunkach filtracji nieustalanej do identyfikacji modelu matematycznego doliny kopalnej.

## 10.1. Wykorzystanie wyników próbnych pompowań do sporządzania prognoz zasobowych

W rozdziałach 5.1.1 i 6.2 podano przykłady prowadzenia próbnych pompowań otworów rozpoznawczych, ujmujących warstwę piaskowców kościeliskich z jury środkowej w rejonie Wielunia (rys. 5.3). Pokazano sposoby obliczeń parametrów filtracyjnych z pompowań hydrowęzłowych w warunkach filtracji nieustalanej, opisanej równaniem Theisa (rys. 5.4), oraz identyfikację granicy nieprzepuszczalnej na podstawie porównania wykresu  $\lg s = f(\lg t)$  z nomogramem wykresów funkcji Theisa z granicą nieprzepuszczalną (rys. 6.6). Wracając do tych obliczeń, przedstawia się poniżej przykład prognozy zasobów eksploatacyjnych ujęcia według metody hydrodynamicznej.

Ujęcie składa się z trzech studni I, III i IV, rozmieszczonych na wierzchołkach trójkąta o polu  $F = 113\,730\text{ m}^2$ . Promień zastępczy ujęcia według wzoru na wielką studnię (Pazdro, 1977) wynosi:

$$R_o = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = 190\text{ m}.$$

Aby obliczyć zasoby eksploatacyjne danego ujęcia, trzeba uwzględnić warunki techniczne ujęcia wody oraz warunki hydrogeologiczne warstwy wodonośnej. Możliwa do osiągnięcia depresja w studniach na ujęciu wody z warstwy o zwierciadle naporowym jest zależna od wysokości słupa wody ponad stropem warstwy wodonośnej oraz od możliwości podnoszenia wody, czyli od typu pompy głębinowej.

Warstwa piaskowców kościeliskich ma nad sobą w studni słup wody o wysokości 224 m, a wysokość podnoszenia pomp typu G80 przy wydajności ze studni  $Q = 60\text{ m}^3/\text{h}$  wynosi  $H_{max} = 102\text{ m}$ . Warunkiem ograniczającym w tym przypadku wielkość depresji jest podnoszenie wody. Jeżeli więc przyjmiemy  $H_{max} = 102\text{ m}$  jako ograniczenie techniczne, to przy głębokości do zwierciadła wody w studni od po-

wierzchni terenu  $Z_s = 20$  m i uwzględnieniu strat hydraulicznych przy dwustopniowym podawaniu wody do sieci, np. w wysokości  $p = 20$  m, możliwa do uzyskania depresja w studniach na ujęciu wyniesie:

$$s = H_{\max} - (z_s + p) = 102 - (20 + 20) = 62 \text{ m.}$$

Depresja w studni współdziałającej jest jednak sumą dwóch składowych:

$$s = s_o + s_r, \quad [10.2]$$

gdzie:

$s_o$  – depresja wywołana pracą studni w zespole,

$s_r$  – depresja rejonowa dla ujęcia dla danego  $R_o$ .

Przy projektowanych typach pomp wydajność studni wyniesie  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$  i wówczas składową  $s_o$  obliczyć można według wzoru:

$$s_o = \frac{0,366Q}{T} \cdot \lg \frac{r_z}{r_o}, \quad r_z = 0,47 \sqrt{\frac{F_o}{\pi}}, \quad [10.3]$$

gdzie:

$T = km$  – przewodność warstwy wodonośnej,

$r_o$  – promień studni,

$r_z$  – zastępczy promień wpływu studni w zespole,

$F_o$  – powierzchnia strefy wpływu ograniczona liniami łączącymi środki odległości pomiędzy sąsiednimi studniami.

**Obliczenia depresji  $s_o$ :**

Dane:  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{sr} = 4,2 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $r_o = 0,15 \text{ m}$ ,  $r_z = 446 \text{ m}$ .

$$s_o = \frac{0,366Q}{T} \cdot \lg \frac{r_z}{r_o} = \frac{0,366 \cdot 60}{4,2} \cdot \lg \frac{446}{0,15} = 16,74 \approx 17 \text{ m.}$$

Po obliczeniu składowej depresji wywołanej pracą studni w zespole można z zależności [10.2] obliczyć depresję rejonową ujęcia:

$$s_r = s - s_o = 62 - 17 = 45 \text{ m.}$$

Znając wielkość depresji rejonowej, można przystąpić do opracowania prognozy wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęcia. W tym celu sporządza się schemat warunków hydrogeologicznych badanej warstwy wodonośnej.

Schematyzacja ta obejmuje:

- przyjęcie uśrednionych parametrów filtracyjnych dla warstwy wodonośnej,
- określenie jej granic,
- określenie typu hydrodynamicznego warstwy.

W rozważanym przypadku określono z pompowania hydrowęzłowego parametry: przewodności  $T$  i współczynnika piezoprzewodności  $a$  oraz zidentyfikowano granicę nieprzepuszczalną w odległości  $d_1 = 2100 \text{ m}$  od ujęcia. Natomiast z ogólnego rozpoznania budowy geologicznej regionu przyjęto możliwość zasilania warstwy piaskowców na wychodniach na powierzchnię podczwartorzędową w odległości  $d_2 = 15 \text{ km}$ .



Tabela 10.1. Wyniki obliczeń prognostycznych wydajności ujęcia

Czas [m-c]	Czas [h]	$4\pi Ts_r$	$u = \frac{R_0^2}{4at}$	$W(u)$	$u_1 = \frac{(2d_1)^2}{4at}$	$W(u_1)$	$u_2 = \frac{(2d_2)^2}{4at}$	$W(u_2)$	$W(u) + W(u_1) - W(u_2)$	$Q_e$ [m <sup>3</sup> /h]
1	720	2700,4	0,00037	7,24	0,18	1,35	4,61	0,802	7,79	314,4
3	2160	2700,4	0,00012	8,69	0,06	2,30	1,54	0,085	10,90	247,7
6	4320	2700,4	0,00006	9,14	0,03	2,96	0,77	0,32	11,78	229,2
9	6480	2700,4	0,00004	9,55	0,02	3,35	0,51	0,50	12,40	217,8
12	8760	2700,4	0,00003	9,84	0,015	3,70	0,38	0,74	12,80	211,0
18	12960	2700,4	0,00002	10,24	0,010	4,04	0,26	1,02	13,26	203,7
24	17520	2700,4	0,000015	10,60	0,0074	4,32	0,19	1,28	13,64	198,0
60	43830	2700,4	0,000006	11,45	0,003	5,23	0,076	2,07	14,61	184,8

W określonych warunkach, przy typie hydrodynamicznym warstwy naporowej spełniającej równanie Theisa [2.2] z dwiema granicami: nieprzepuszczalną (wzór [2.35]) i zasilającą (wzór [2.38]), wzór do prognostycznych obliczeń zasobowych ma postać:

$$Q_e = \frac{4\pi T s_r}{W(u) + W(u_1) - W(u_2)}, \quad u = \frac{R_o^2}{4at}, \quad u_1 = \frac{(2d_1)^2}{4at}, \quad u_2 = \frac{(2d_2)^2}{4at}, \quad [10.4]$$

a poszczególne czynniki i składniki tego równania mają wartości:  $s_r = 45$  m,  $T = 4,3$  m<sup>2</sup>/h,  $a = 33900$  m<sup>2</sup>/h,  $R_o = 190$  m,  $d_1 = 2100$  m,  $d_2 = 15000$  m. Obliczenia prognostyczne według wzoru [10.4] przedstawia tabela 10.1. Przedstawione obliczenia wskazują na konieczność wykonywania prognoz zasobowych dla ujęć z warstw naporowych z odległymi granicami zasilania.

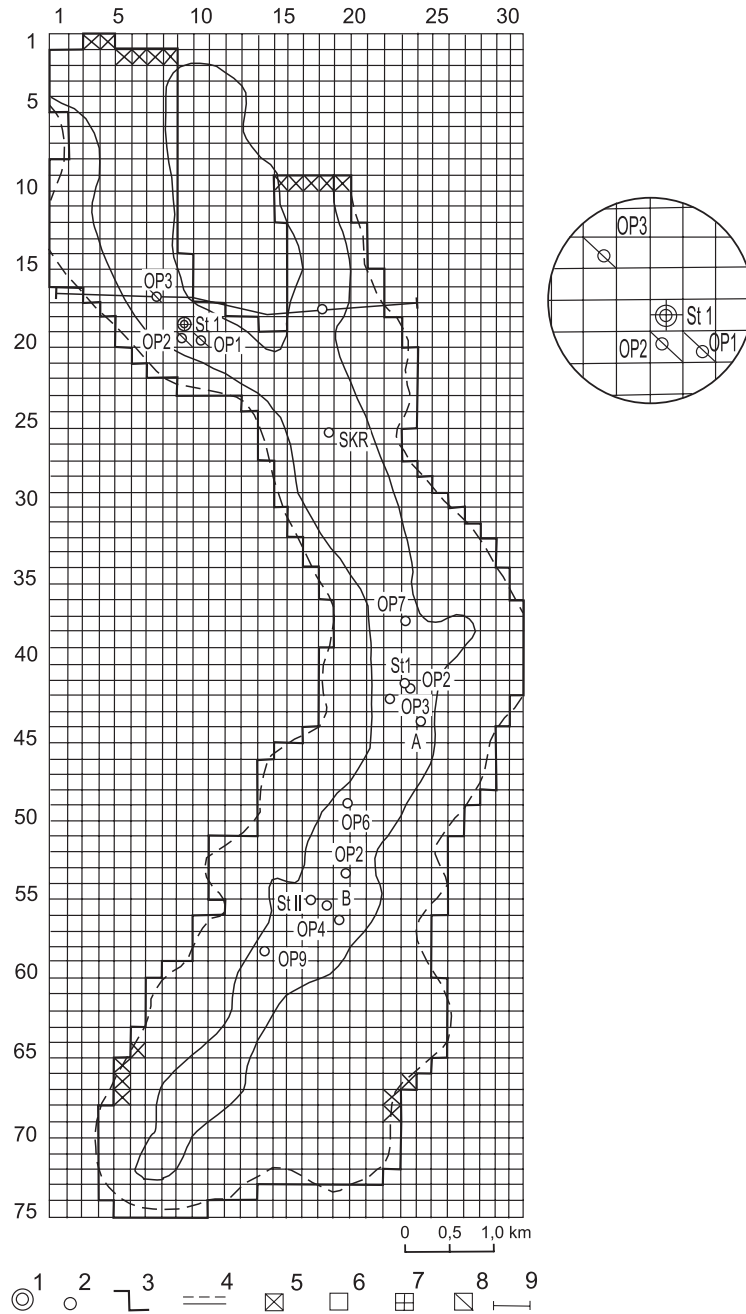
## 10.2. Wykorzystanie wyników próbných pompowań w modelowaniu matematycznym

Jak wspomniano we wstępie do niniejszego rozdziału, modelowanie matematyczne jest podstawową metodą obliczania zasobów wód podziemnych dużych ujęć i regionów hydrogeologicznych. Modelowanie matematyczne jest główną, a praktycznie jedyną metodą, pozwalającą w zadowalający sposób określić:

- bilans krążenia wód w układzie warunków naturalnych jednostki hydrogeologicznej,
- bilans przepływów między warstwami hydraulicznie związanymi w warunkach naturalnych i podczas eksploatacji wód,
- bilans dopływów wody do ujęć wód podziemnych.

Próbné pompowania, jako podstawowa polowa metoda badań hydrogeologicznych warstw wodonośnych, dostarczają niezbędnych danych do budowy modeli matematycznych jednostek hydrogeologicznych w zakresie danych o parametrach filtracyjnych warstw, o charakterze granic i związków hydraulicznych między warstwami wodonośnymi. Wyniki próbných pompowań pozwalają, na etapie przyjęcia założeń budowy modelu matematycznego, określić jego strukturę wewnętrzną oraz związki między warstwami decydujące o przyjęciu warunków brzegowych. Służą one także do identyfikacji modelu matematycznego z modelem hydrogeologicznym. Pompowania hydrowęzłowe są praktycznie jedynymi wzorcami, według których można badać reakcję hydrodynamiczną modelu poprzez symulowanie wydajności pompowania i śledzenie reakcji modelu w zakresie zmian zwierciadła wody w czasie. W tym sensie pozwalają więc one określić stopień wiarygodności zbudowanego modelu matematycznego.

Przedstawiony przykład symulacji jednego z próbných pompowań hydrowęzłowych na modelu matematycznym jednostki hydrogeologicznej, którą jest dolina kopalna w południowej Wielkopolsce, pochodzi z materiałów dokumentacyjnych Biura Projektów Wodnych i Melioracji „Bipromel” Poznań. Modelowanie to zostało wykonane przy współpracy Ośrodka Badań Hydrogeologicznych i Modelo-



Rys. 10.1. Mapa dokumentacyjna z badań modelowych doliny kopalnej w rejonie Krobi  
 1 – otwory rozpoznawcze, 2 – otwory obserwacyjne, 3 – granice modelu, 4 – granice doliny kopalnej,  
 5 – elementarne bloki warunków brzegowych I rodzaju ( $H = \text{const}$ ), 6 – jw. II rodzaju ( $Q = \text{const}$ ),  
 7 – blok modelujący otwór pompowany, 8 – bloki modelujące otwory obserwacyjne, 9 – linia prze-  
 kroju geologicznego

wania Matematycznego Kombinatoru Geologicznego „Zachód” w Poznaniu w 1978 r. Badania modelowe wykonali: Zbigniew Balcerkiewicz i Stanisław Dąbrowski.

Jednostkę hydrogeologiczną, dla której stworzono model matematyczny, stanowi dolina kopalna na wysoczyźnie kaliskiej w rejonie Krobi (rys. 10.1). Forma ta pochodzi z interglacjału wielkiego. Prześlędzono ją na długości około 18,5 km. Jej szerokość waha się od 0,6 do 1 km. W części zachodniej rozdziela się na dwa ramiona. W jej ramieniu południowym położony jest hydrowęzeł Kuczynka, którego pompowanie zostało odtworzone na modelu matematycznym.

Strukturę wodonośną tworzy kompleks osadów piaszczysto-żwirowych o średniej miąższości 15 m (rys. 10.2). Osady te zalegają na utworach ilastych trzeciorzędu. Przykryte są od powierzchni kompleksem glin morenowych zlodowacenia środkowopolskiego o miąższości 21–55 m. Krawędzie doliny kopalnej stanowią ily trzeciorzędowe lub gliny morenowe zlodowacenia krakowskiego. Opisana dolina kopalna stanowi podstawowy poziom wód wglębnych tego rejonu. Poziom ten zasilany jest na drodze przesiąkania wód poprzez gliny z poziomu przypowierzchniowego oraz z dopływów bocznych. Z kolei poziom ten może zasilać poprzez okna hydrogeologiczne poziomy: mioceński i oligoceński. Jego drenaż zachodzi w rejonie współcześnie istniejącej doliny rzeki Rów Polski.

Parametry filtracyjne warstw wodonośnych poziomu są następujące:

- przewodność:

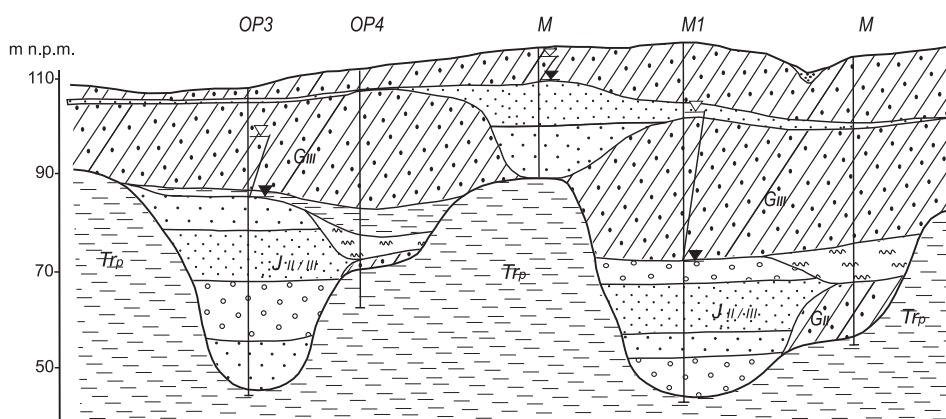
$$T - 18,8 - 75,4 \text{ m}^2/\text{h},$$

- współczynnik filtracji:

$$k - 0,5 - 2,7 \text{ m/h},$$

- współczynnik zasobności sprężystej:

$$\mu_s - 0,0001 - 0,0007.$$



Rys. 10.2. Przekrój geologiczny doliny kopalnej w rejonie Krobi

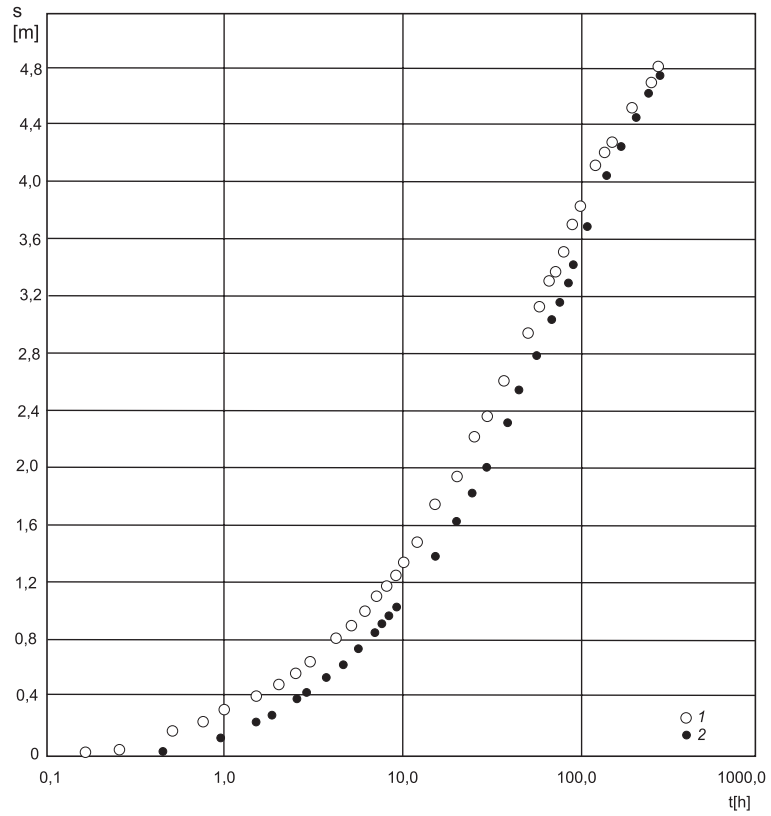
Model matematyczny opisanej jednostki hydrogeologicznej utworzono przez tarowanie warunków brzegowych i wielkości przepływów. Stworzono go dla warunków filtracji ustalonej na stan hydrodynamiczny 1978 r., przy użyciu programu numerycznego SP2A z biblioteki programowej HYDRYLIB, służącej do rozwiązywania zagadnień hydrogeologicznych (Szymanko i in., 1977). Model warunków stacjonarnych stał się podstawą do przeprowadzenia trzech symulacji pompowań hydrowęzłowych. Symulacje pompowań, z których jeden wynik przedstawiono poniżej, przeprowadzono za pomocą programu numerycznego EPD2A (ze wspomnianej biblioteki programów HYDRYLIB) pozwalającego śledzić przebieg nieustalonej filtracji w warstwie naporowej.

Próbne pompowanie symulowano w bloku obliczeniowym, w którym znajdował się otwór rozpoznawczy I pompowany z wydajnością 82,6 m<sup>3</sup>/h przez 289 h (rys. 10.1). Położenie zwierciadła wody w określonych momentach czasowych śledzono w blokach obliczeniowych, w których znajdowały się otwory obserwacyjne oraz otwór pompowany (rys. 10.1). Uzyskane pod koniec pompowania i symulacji tego pompowania na modelu w poszczególnych otworach-blokach obliczeniowych wyniki podaje się w postaci wartości depresji w tabeli 10.2, a kształtowanie się depresji w otworze obserwacyjnym OP1 i odpowiadającym mu bloku obliczeniowym 580 w postaci wykresów  $s = f(lgt)$  na rysunku 10.3. Z porównania przedstawionych wyników pompowania i symulacji wynika zgodność tych wykresów, co świadczy o prawidłowym skonstruowaniu modelu matematycznego tej struktury (rys. 10.1). Przeprowadzone dwie dalsze symulacje pompowań hydrowęzłowych w rejonie Potarzyicy i Krzyżanek (rys. 10.1) wykazały, że przyjęte granice doliny kopalnej w tych rejonach z rozpoznania geofizycznego nie są szczelne, jak założono na modelu, gdyż depresje z symulacji modelowych były prawie dwukrotnie wyższe niż uzyskane z próbnego pompowania. W tym przypadku wyniki symulacji modelowych stały się podstawą weryfikacji uprzednio stworzonego modelu hydrogeologicznego i matematycznego.

Podany przykład świadczy o konieczności wykorzystywania wyników próbnego pompowania lub kontrolowanej eksploatacji ujęć przy budowie modeli matematycznych systemów wodonośnych struktur hydrogeologicznych.

Tabela 10.2. Porównanie wielkości depresji z próbnego pompowania i jego symulacji na modelu matematycznym

Nr otworu	Odległość od otworu pompowanego [m]	Depresja z próbnego pompowania [m]	Depresja z symulacji na modelu [m]
I	–	7,09	5,20
OP1	270	4,82	4,77
OP2	116	5,12	5,10
OP3	508	4,22	4,45
SKR	2190	0,60	1,66



Rys. 10.3. Wykresy  $s = f(\lg t)$  próbnego pompowania hydrowęzłowego i jego symulacji na modelu matematycznym  
1 – pomiary z pompowania, 2 – wyniki obliczeń na modelu

## 11. PROGRAMY KOMPUTEROWE DO INTERPRETACJI PRÓBNYCH POMPOWAŃ

Analiza wyników próbnego pompowania polega na opracowaniu szeregu wykresów doświadczalnych, które następnie za pomocą istniejących metod interpretacji można wykorzystać do identyfikacji schematów hydrodynamicznych, do których badane warstwy wodonośne można przyporządkować. Dokonana identyfikacja pozwala następnie na przeprowadzenie obliczeń parametrów filtracyjnych danej warstwy wodonośnej i jej otoczenia.

W przedstawionych dotychczas rozdziałach zaprezentowano zasady postępowania z wynikami próbnego pompowania przy wykorzystaniu metodyki odręcznego sporządzania wykresów na siatce półlogarytmicznej lub podwójnie logarytmicznej. W przypadku wykresów doświadczalnych typu  $\lg s = f(\lg t)$  przedstawiono sposoby rozwiązań graficznych z użyciem nomogramów odpowiednich funkcji studni: Theisa, Hantusha i Boultona.

Stosując odpowiednie programy numeryczne, można w dużym stopniu zautomatyzować czynności związane ze sporządzaniem różnego typu wykresów próbnego pompowania oraz usprawnić identyfikację tych wykresów z wykresami wzorcowymi.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano zestaw programów w bloku nazwanym **Aquifer Test**, opracowanym przez firmę Waterloo Hydrogeologic Inc z Kanady (Rohrich, 2002). Program jest 32-bitową aplikacją działającą w środowisku Windows (Windows 95/98/ NT/2000). Aplikacja posiada intuicyjny interfejs, w którym wbudowany jest konwerter jednostek oraz możliwe jest stworzenie własnego zestawu skrótów nawigacyjnych znacznie ułatwiających posługiwanie się programem. Analiza wyników próbnego pompowania dotyczyć może warstw wodonośnych o swobodnym i napiętym zwierciadle, z uwzględnieniem przesiąkania, a także masywów skał szczelinowych. Dodatkowo autorzy oprogramowania dostarczyli narzędzia pozwalające na stworzenie przejrzystego raportu końcowego z przeprowadzonych badań. W wersji profesjonalnej program można wykorzystać do planowania próbnego pompowania dzięki dołączonym metodom przewidywania zachowania się warstwy wodonośnej. Umożliwia to lepszy dobór lokalizacji otworów obserwacyjnych, czasu trwania i wydajności pompowania.

Utworzona w programie baza danych umożliwia:

- szybki dostęp do informacji poprzez menu w formie drzewa,
- dostęp do dowolnego otworu (studni, piezometru) w kilku wykonywanych analizach, interpretacyjnych (dane wprowadzane są tylko raz),
- wielokrotną analizę wyników dla jednego zestawu danych,

- zmianę metody interpretacyjnej w dowolnym momencie bez konieczności ponownego wprowadzania danych.

### Wprowadzanie danych

Prace z programem rozpoczynamy od stworzenia projektu, który obejmować może dane o studni, otworach obserwacyjnych i próbnym pompowaniu. Kolejnym krokiem jest wybranie jednostek danych, które będziemy wprowadzać. Ważnym elementem ułatwiającym prace z programem jest możliwość dołączenia do bazy mapy przedstawiającej lokalizację terenu badań. Mapa ta może być dołączona w formie bitmapy lub pliku wektorowego, a po zaimportowaniu do bazy konieczne jest jej skalibrowanie.

Do bazy danych wprowadzamy następujące dane dotyczące studni eksploatowanej podczas próbnego pompowania:

- współrzędne X i Y zgodne z wprowadzoną wcześniej mapą,
- rzędną terenu,
- rzędną punktu odniesienia (poziomu morza),
- długość filtru,
- średnicę studni,
- średnicę studni wraz z obsypką.

W przypadku większej ilości otworów możemy niezbędne dane wpisać do pliku tekstowego, a następnie zaimportować je do bazy programu AquiferTest.

Po ogólnych informacjach przechodzimy do wprowadzenia danych uzyskanych w trakcie próbnego pompowania. Konieczne będzie wprowadzenie miąższości strefy saturacji, dla niektórych analiz (Moench Fracture), odległości od podstawy filtru studziennego do zwierciadła statycznego, czasu trwania i wydajności próbnego pompowania. Wprowadzanie obserwacji stanów zwierciadła wody odbywać się może:

- ręcznie,
- poprzez import z pliku tekstowego, MSEXcel czy ASCII, z dowolnego automatycznego rejestratora stanu zwierciadła wody.

### Wykonywanie obliczeń

Dzięki przygotowanej bazie danych możemy szybko i sprawnie dokonać wizualizacji wyników i wybrać odpowiednią metodę interpretacji wyników próbnych pompowań dostosowaną do warunków, w których przeprowadzono badania. Do wyboru mamy m.in. następujące metody:

- Theisa (1935),
- Coopera-Jacoba w funkcji czas–depresja (1946),
- Coopera-Jacoba w funkcji odległość–depresja (1946),
- Hantusha-Jacoba (1955),
- Neumana (1975),
- Moencha (1993).
- Theisa w zakresie wzniosu zwierciadła wody po pompowaniu (1935).



Przy wyborze odpowiedniej metody interpretacyjnej bardzo pomaga opis każdej z dostępnych metod w instrukcji obsługi programu. Po wybraniu metody otrzymujemy na wstępie wykres zależności położenia zwierciadła wody w czasie lub depresji zwierciadła wody i wydajności studni w czasie.

### Wizualizacja wyników

Efektom analizy danych uzyskanych z próbnego pompowania są wykresy wraz z obliczonymi na ich podstawie parametrami warstwy wodonośnej. Program umożliwia zarówno automatyczne, jak i ręczne dopasowanie wykresu do obserwacji, a także usunięcie błędnych danych. Aktualizacja wykresu oraz obliczanych parametrów następuje natychmiastowo po zatwierdzeniu zmian.

Twórcy programu umożliwili stworzenie prostych i przejrzystych raportów zawierających podstawowe informacje o przeprowadzonym badaniu (miejsce, czas trwania, kto je wykonał) oraz wynik zarówno prowadzonych obserwacji, jak i wykresy wraz z obliczonymi parametrami. W szablonie zaproponowanym przez Waterloo Hydrogeologic Inc jest również miejsce na logo firmy prowadzącej badania hydrogeologiczne. Największym atutem Aquifer Test jest szybkie wykonanie wykresów i obliczeń oraz szeroka gama dostępnych metod analitycznych.

Pomimo łatwości obsługi i możliwości, jakie stwarza opisany blok numerycznych programów obliczeniowych, korzystanie z niego wymaga jednak szerszej wiedzy dotyczącej metodyki i analizy próbnych pompowań w różnych warunkach hydrogeologicznych. Wiedza ta została zaprezentowana Czytelnikom przez autorów poradnika na bazie doświadczeń własnych i zespołu hydrogeologów, wymienionych we wstępie do niniejszej publikacji.

### Przykłady obliczeń

Wykorzystanie programu Aquifer Test przedstawia się na przykładzie pompowania hydrowęzłowego przeprowadzonego w dolinie rzeki Ołobok w Ostrowie Wielkopolskim, opisanego już w niniejszym poradniku w rozdziale 8 i przedstawionego tamże na rysunkach od 8.27 do 8.30. Przedmiotem badań była pasmowa struktura hydrogeologiczna (rys. 8.28) w obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego, w którym dwie warstwy wodonośne rozdzielone są osadami słabo przepuszczalnymi w postaci mułków. Warstwa dolna (naporowa) w warunkach poboru z niej wody jest zasilana z warstwy górnej o zwierciadle swobodnym, które pod wpływem dłuższego pompowania również ulega zdepresjonowaniu.

Dane o hydrowęzle badawczym, składającym się ze studni nr VIII oraz pozostających w jej otoczeniu innych otworów rozpoznawczych i obserwacyjnych (piezometrów), przedstawiono w tabeli 11.1. Szkic sytuacyjny hydrowęzła zamieszczono w rozdziale 8 na rysunku 8.26.

Na rysunku 11.1 przedstawiono wykres  $s = f(\lg t)$  z obserwacji przeprowadzonych w piezometrze B7 odległym od pompowanej studni o 50 m, sporządzony za pomocą programu Aquifer Test. Wykres ten jako odrębny przedstawiono już w rozdziale 8 na rysunku 8.28 z wyznaczeniem nachylenia  $c = 0,88$  m oraz wielkości  $t_0 = 0,14$  h.

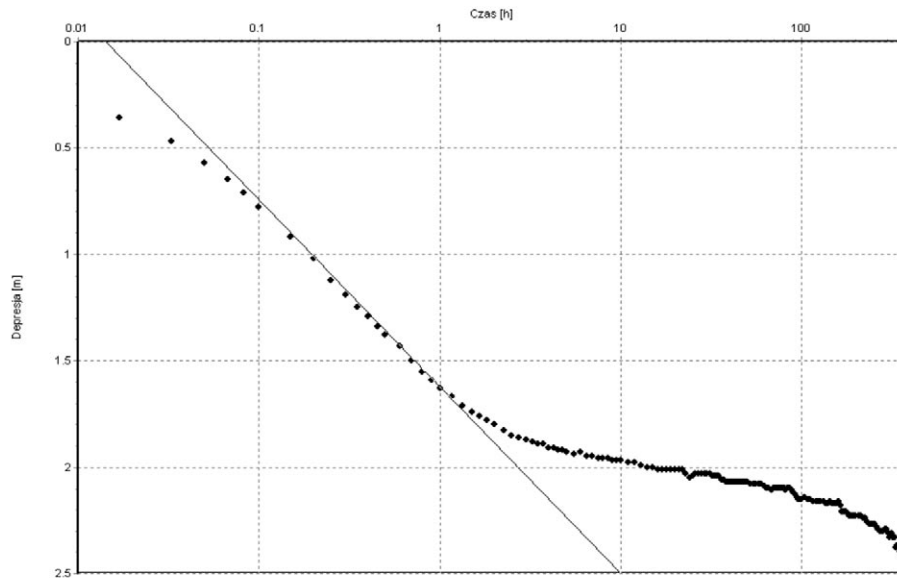
Tabela 11.1. Dane o hydrowęzle VIII w dolinie rzeki Ołobok

HYDROWĘZEL VIII						
Wydajność pompowania [m <sup>3</sup> /h]	201					
Czas pompowania [h]	386					
Studnia VIII i piezometry	VIII	B7	B8	B6	VII	B9
Odległości od studni [m]	0	50	230	350	400	570
Miąższość warstwy wodonośnej [m]	36	38	38	46	46	48

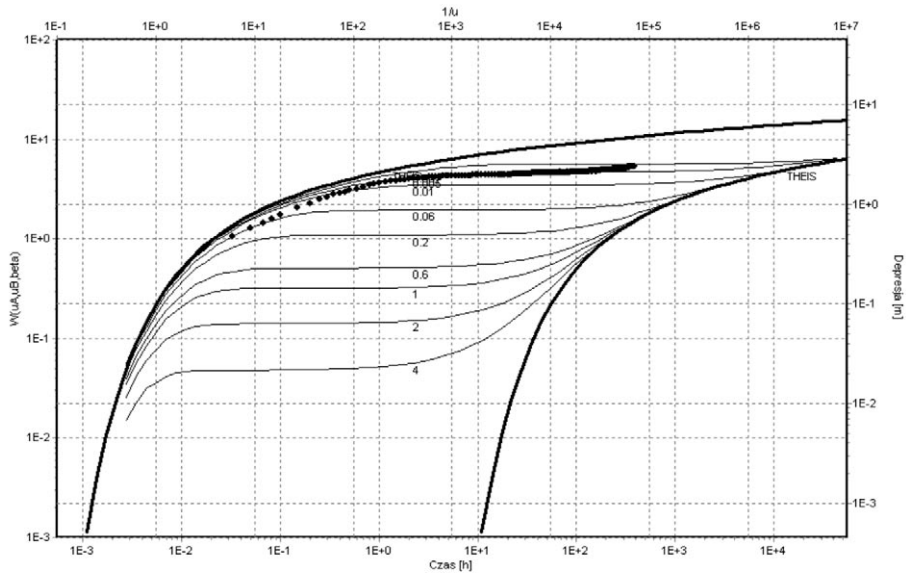
Wyniki obliczeń parametrów: przewodności  $T$ , współczynnika filtracji  $k$  oraz współczynnika odsączalności sprężystej  $\mu_s$  według programu Aquifer Test podano w treści rysunku 11.1.

Czytelnik może porównać te wyniki z obliczeniami uzyskanymi z wykresu przedstawionego na rysunku 8.28 ( $c$  oraz  $t_0$  jw.), prowadząc obliczenia wg wzorów [5.5] i [5.6]. Metoda nazwana w literaturze polskiej metodą przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba (rozdz. 5.1.1.2) w literaturze amerykańskiej nosi nazwę Cooper-Jacob Time-Drawdown (Aquifer Test).

Na podstawie raz wczytanych do programu danych obserwacji w otworze B7 posłużyły również do sporządzenia wykresu  $\lg s = f(\lg t)$ , a następnie do identyfikacji uzyskanej krzywej doświadczalnej z jedną z krzywych wzorcowych wyliczonych przez program dla metody Neumana (patrz: rozdział 2.4.2.2.). Postać wykre-



Rys. 11.1. Wykres doświadczalny  $s = f(\lg t)$  dla otworu nr B7 z wynikami obliczeń według metody przybliżenia logarytmicznego wzoru Theisa (metoda Coopera-Jacoba, 1946)  
Obliczone parametry:  $T = 41,9 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $k = 1,17 \text{ m/h}$ ,  $\mu_s = 0,00063$



Rys. 11.2. Wykres doświadczalny  $\lg s = f(\lg t)$  dla otworu obserwacyjnego B7 z wynikami obliczeń według metody Neumana (1975) na tle diagramu funkcji  $W(uA, uB, \beta)$   
 Obliczone parametry  $T = 35,4 \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $k = 0,99 \text{ m/h}$ ,  $\mu_s = 0,00037$

su i jego odniesienie do paletki krzywych, nałożonej na wykres doświadczalny, zilustrowano na rysunku 11.2.

Zaprezentowane wykresy, sporządzone i zinterpretowane za pomocą programu Aquifer Test, pochodzą z pracy magisterskiej J. Niezabitowskiego (2004), wykonanej w Zakładzie Hydrogeologii i Ochrony Wód Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem J. Przybyłka.

## LITERATURA ŹRÓDŁOWA I UZUPEŁNIAJĄCA

- Antropcev A.M., Krasil'nikova N.P., 1967. K metodike opytnych fil'tracionnykh rabot pri izučenii podzemnykh vod drevnich depresij. *Geologija i Razvedka*, 3. Izv. Vys. Učeb. Zaved. Barenblatt G.I., Entov V., Ryžik V.M., 1972. Teorija niestacionarnej fil'tracii židkosti i gaza. Izd. Nedra, Moskva.
- Barenblatt G.I., Želtov Ju.P., Kočina I.P., 1960. Ob osnovnykh predstavlenijach teorii fil'tracii odnorodnykh židkостей v treščinovatykh porodach. *Prikladnaja matematika i mehanika*. Novaja Serija, XXI, 5, 852–864. Izv. AN SSSR.
- Bear J., Zaslavsky D., Irmay S., 1968. Physical principles of water percolation and seepage. UNESCO. Tłum. na jęz. rosyjski, Moskwa 1971.
- Bieniewski J., Jarodzki L., 1975. Określenie zasięgu leja depresji metodą modelowania. *Górnictwo Odkrywkowe*, 4–5.
- Bieske E., 1973. *Bohrbrunnen*. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- Bindeman N.N. i dr., 1969. Poiski i razvedka podzemnykh vod dlja krupnogo vodosnabženija. Izd. Nedra, Moskva.
- Bindeman N.N., Jazvin L.S., 1970. Ocenka eksploatacionnykh zaspos podzemnykh vod. Izd. 2. Izd. Nedra, Moskva, s. 215.
- Birsoy V.K., Sumpzers W.K., 1980. Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data. *Ground Water*, 18, 137–146.
- Bobiński E., 1961. Metody interpretacji wyników próbných pompowań dla określenia przepuszczalności gruntów. *Gosp. Wodna*, 3.
- Bočever F.M., Verigin N.N., 1961. Metodičeskoe posobie po rasčetał eksploatacionnykh zaspos podzemnykh vod dlja vodosnabženija. Gosstrojizdat, Moskva, s. 199.
- Bonnet M., Ungemach P., Suzanne P., 1967. Interpretation des essais de pompage en regime transitoire. L'effet de puits et la postproduction. C. R. 86e congr. Assoc. fr. Avanc. sc. Chron. Hydrogeol., 12. Bordeaux.
- Borevskij B.V., 1969. Učet estestvennykh kolebanij urovnja podzemnykh vod pri obrabotke rezul'tatov opytnych otkaček. *Pazvedka i Ochrana Nedr*, 10, 45–47.
- Borevskij B.V., 1971. Opredelenie rasčetnykh gidrogeologičeskich parametrov dlja ocenki eksploatacionnykh zaspos. V: *Izyskaja i ocenka zaspos promyšlennykh podzemnykh vod*. Izd. Nedra, Moskva.
- Borevskij B.V., 1971. Osobennosti opredelenija rasčetnykh gidrogeologičeskich parametrov treščinovatykh porod. *Tr. VSEGINGEO*, 45, 41–55.
- Borevskij B.V., Jazvin L.S., Peresun'ko D.I., 1970. Vlijanie osrednenija fil'tracionnykh parametrov na točnost' gidrogeologičeskich prognozov. *Tr. VSEGINGEO*, 32, 35–50.
- Borevskij B.V., Samsonov B.G., Jazvin L.S., 1975. Metodika opredelenija parametrov vodosnykh gorizontov po dannym otkaček. Izd. Nedra, Moskva.
- Boulton N.S., 1954. The drawdown of the water-table under non-steady conditions near a pumped well in unconfined formation. *Proc. Inst. Civil. Eng.*, 3, 564–579.
- Boulton N.S., 1963. Analysis of data from non-equilibrium pumping test allowing for delayed yield from storage. *Proc. Inst. Civil. Eng.*, 26, 469–482.
- Boulton N.S., Streltsova T.D., 1975. New equations for determining the formation constants of an aquifer from pumping test data. *Water Resour. Res.*, 11/1, 148–153.

- Bouwer H., 1989. The Bouwer and Rice Slug Test – An Update. *Ground Water*, 27, 3, 304–309.
- Bouwer H., Rice R.C., 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12, 3, 423–428.
- Bremond R., 1965. Contribution a l'interpretation des mesures de debit et de rabattement dans les eaux souterraines. Gauthier-Villars, Paris.
- Butler, James J., 1998. *The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 252 p.
- Castany G., 1967. *Traite pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris.
- Castany G., 1982. *Hydrogeologie principes et methods*. Dunod, Paris.
- Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3, 263–269.
- Cooper H.H., Jacob C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans.*, 27, 526–534.
- Darcy H., 1856. *Les fontaines publiques des la ville de Dyon*. V. Dalmont, Paris.
- Dawson K.J., Istok J.D., 1991. *Aquifer Testing: design and analysis of pumping and slug tests*. Lewis Publishers, INC., Chelsea, Michigan, 334 p.
- Dąbrowski S., 1993. Ocena zeskoku i sprawności technicznej studni ujęć wielootworowych na podstawie badań wzniosu zwierciadła wody. W: *Problemy ujmowania i ochrony wód podziemnych*. Wyd. UAM, Poznań.
- Dąbrowski S., Górski J., Kapuściński J., Przybyłek J., Szczepański A., 2004. *Metodyka określania zasobów eksploatacyjnych ujęć zwykłych wód podziemnych*. Poradnik metodyczny. Borgis Wydawnictwo Medyczne, Warszawa.
- Dąbrowski S., Przybyłek J., 1973. Wyniki badań filtracji nieustalanej wód podziemnych na obszarze Polski (z badań przedsiębiorstw ZPH w latach 1966–1973). *Maszynopis*. Przeds. Hydrogeol., Poznań.
- Dąbrowski S., Przybyłek J., 1980. *Metodyka próbných pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Dąbrowski S., Zboralska E., Zborowska T., 1983. *Metodyka badań hydrowęzłowych hydrogeologicznych układów wielowarstwowych na przykładzie badań wielkopolskiej doliny kopalnej*. Materiały Sympozjum: *Metodyka badań wód podziemnych*. Wyd. Geol., Warszawa.
- De Glee G.J., 1930. *Over grondwater stromingen bij wateronttrekking door middel van putten*, Thesis. J. Waltman, Delft (The Netherlands).
- Dominico P.A., Schwartz F.W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, Inc., 824 p.
- Dowgiałło J. i in. (red.), 2002. *Słownik hydrogeologiczny*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Driscoll F.G., 1987. *Groundwater and Wells*. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, 1089 p.
- Drobnochođ N.I., 1976. *Oценка запасов подземных вод*. Izd. Vysšaja Škola, Kiev.
- Dupuit J., 1863. *Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables*. Dunod, Paris.
- Ferris J.G., Knowless D.B., Brown R.H., Stallman R.W., 1962. *Theory of aquifer tests*. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1536E, 174.
- Fetter C.W., 1988. *Applied Hydrogeology*. Second Ed. Macmillan Publishing Company, New York, 592 p.
- Fetter C.W., 1994. *Applied Hydrogeology*. Third Ed. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 691 p.
- Freeze R.A., Cherry J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 604 p.

- Forkasiewicz J., 1970. Programation des pompages d'essai appliques a l'evaluation des parametres des couches aquiferes. Bull. BRGM, sec. III, 1.
- Forkasiewicz J., 1973. Interpretacja wyników próbnego pompowania dla oceny parametrów warstw wodonośnych. Tłum. z jęz. francuskiego. Przeds. Hydrogeol., Poznań.
- Forkasiewicz J., 1978. Essais de puits par palier de debit. Analyse et interpretation des donnees. Doc. B.R.G.M., Orleans.
- Grenier B., 1985. La pratique des pompages d'essai en hydrogeologie. Editions du BRGM, Orleans.
- Haładus A., Motyka J., Szczepański A., 1979a. Interpretacja wyników próbnych pompowań prowadzonych w skałach szczelinowo-krasowych. Cz. I. Technika Poszukiwań, 5, 19–24.
- Haładus A., Motyka J., Szczepański A., 1979b. Interpretacja wyników próbnych pompowań prowadzonych w skałach szczelinowo-krasowych. Cz. II. Przykłady interpretacji wyników próbnych pompowań w różnych strukturach hydrogeologicznych. Technika Poszukiwań, 6, 16–21.
- Hantush M.S., 1949. Plain potential flow of ground water with linear leakage. Doctoral dissertation. Univ. of Utah.
- Hantush M.S., 1956. Analysis of data from pumping test in leaky aquifers. Trans. Am. Geophys. Un., 37, 702–714.
- Hantush M.S., 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. Journ. Geophys. Res., 65, 3713–3725.
- Hantush M.S., 1964. Hydraulics of wells. W: V.T. Chow (ed.). Advances in Hydrosience. Vol. I. Academic Press, New York, London, p. 281–432
- Hantush M.S., 1965. Wells near streams with semi pervious beds. Journ. Geophys. Res., 70, 2829–2838.
- Hantush M.S., Jacob C.E., 1954. Plain potential flow of ground water with linear leakage. Trans. Am. Geophys. Un., 35, 917–936.
- Hantush M.S., Jacob C.E., 1955a. Steady three-dimensional flow to a well in a two-layered aquifer. Trans. Am. Geophys. Un., 36, 286–292.
- Hantush M.S., Jacob C.E., 1955b. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Trans. Am. Geophys. Un., 36, 95–100.
- Hall P., 1996. Water Well and Aquifer Test Analysis. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 412 p.
- Herbich P., 1980. Tektoniczne uwarunkowanie horyzontalnej anizotropii, wodoprzepuszczalności utworów górnej kredy rejonu Chełma. Technika Poszukiwań, 3, 27–32.
- Herbich P., 1995. Eksploatacyjne zmiany oporów dopływu do studzien ujmujących porowo-szczelinowe twory węglanowe kredy lubelskiej i miechowskiej. W: Współczesne problemy hydrogeologii. T. VII, cz. 2. Wyd. AGH, Kraków, s. 275–282.
- Herbich P., Krajewski S., 1977. Określanie horyzontalnej anizotropii warunków filtracji w utworach szczelinowych na podstawie analizy nieustalonego dopływu do studzien. Prz. Geol., 8–9.
- Herbich P., Krajewski S., 1985. Zastosowanie wyników próbnych pompowań wielostopniowych do obliczeń wodoprzepuszczalności metodą analizy liniowych oporów filtracji. W: Aktualne problemy hydrogeologii, Kraków–Karniowice. Wyd. AGH, Kraków, s. 567–574.
- Herbich P., Krajewski S., 1989. Warunki filtracji w szczelinowych skałach węglanowych kredy miechowskiej w świetle analizy oporów hydraulicznych. W: Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski. II konferencja Szklarska Poręba. Prace Naukowe Politechniki Wrocławskiej, 58, seria: Konferencje, 29, 207–213.

- Hvorslev M.J., 1951. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations. Bul. 26, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi.
- Jacob C.E., 1940. On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Trans. Am. Geophys. Un., 72, 574–586.
- Jacob C.E., 1946. Radial flow in a leaky artesian aquifer. Trans. Am. Geophys. Un., 27, K. 2, 198–208.
- Jarodzki L., 1972. Wytyczne obliczeń współczynnika filtracji na podstawie polowych metod badań hydrogeologicznych. Wyd. Geol., Warszawa.
- Kapuściński J., 1989. Rola wyznaczania oporów hydraulicznych studni w prognozie zasobowej rejonów intensywnej eksploatacji na przykładzie modelu wykonanego dla Łomży. Materiały sympozjum: Matematyczne modelowanie ujęć wody podziemnej. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Kłyza T., Przybyłek J., 1968. Przykłady zastosowania wzorów równowagi nieustalanej do prognozowania eksploatacji ujęć wód podziemnych. II Konf. Nauk.-Techn.: Hydrogeologia i geologia inżynierska, Gdańsk, 1968. Wyd. Geol., Warszawa.
- Kłyza T., Przybyłek J., 1969. Wyniki badań parametrów hydrogeologicznych artezyjskiej warstwy wodonośnej metodą C.V. Theisa. III Sympozjum Filtracji, Gdańsk.
- Kordas B., 1971. Matematyczne modelowanie ruchu wód gruntowych. Prz. Geofiz., 1–2.
- Kozłowski J., Safader L., 1966. Zagadnienie stosowania wzorów dla określania parametrów hydrogeologicznych w warunkach nieustalanej filtracji. Techn. Poszukiwań, 19.
- Kulma R., 1995. Podstawy obliczeń filtracji wód podziemnych. Wyd. AGH, Kraków.
- Kruseman G.P., de Ridder N.A., 1979. Analysis and evaluation of pumping test data. Bull. 11. Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvements, Wageningen, Netherlands, 200 p.
- Kruseman G.P., de Ridder N.A., 1990. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Second Ed. ILRI publication 47. Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvements, Wageningen, Netherlands, 377 p.
- Langefeld F., Ungemach P., 1962. L'interpretation des essais de pompage en regime transitoire par la methode d'identification. L'eau 1, Paris.
- Liszkowski J., Stochlak J. (red.), 1976. Szczelinowatość masywów skalnych. Wyd. Geol., Warszawa.
- Macioszczyk T., 1965. Niektóre problemy dopływu do studzien w warunkach filtracji laminarnej, mieszanej i turbulენტnej. II Sympozjum Filtracji. Gdańsk.
- Macioszczyk T., 1969. Obliczenia hydrogeologiczne ujęć wód podziemnych. Wodrol-Projekt, Warszawa.
- Macioszczyk T., 1973a. Aktualne problemy badawcze wód podziemnych występujących w skałach szczelinowych. Pr. Hydr. Inst. Geol., 4.
- Macioszczyk T., 1973b. Metody modelowe w badaniach bilansów wód podziemnych i dokumentowaniu ich zasobów. Prz. Geol., 10.
- Macioszczyk T., 1974. Zmienność parametrów nieliniowej filtracji wód podziemnych. Biul. Geol. Wydz. Geol. UW, 15.
- Macioszczyk T., Szestakow W.M., 1983. Dynamika wód podziemnych – metody obliczeń. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Mańkowski M., Siwek Z., 1978. Kryteria odbioru studni wierconych i system zabiegów technicznych usprawniających dopływ wody do ujęcia. Mat. na Konf. Nauk.-Techn.: Rozpoznawanie wód podziemnych dla potrzeb gospodarki narodowej. Wyd. Geol., Warszawa.
- Matyjasik M., Youke W.A., Barnett D.A., 2002. Ground water flow in fractured aquifers in the Sevier Thrust Belt, Wasatch Mountains, Utah, USA. Biul. Państw. Inst. Geol., 404, 85–106.
- Mironenko V.A., 1970. Rukovodstvo po drenirovaniju kar'ernih polej. Leningrad.

- Mironenko V.A., Serdjukov L.I., 1968. Obrabotka rezul'tatov opytnych otkaček, proveden-nych v uslovijach dwuchslojnoj tołšči. Razvedka i Ochrana Nedr, 10, 34–38.
- Mironenko V.A., Serdjukov L.I., 1970. Ob učete szimaemosti glinistych porod pri otkačkach iz napornych vodonosnych gorizontov. Razvedka i Ochrana Nedr, 11, 51–55.
- Moench A.F., 1984. Double-Porosity Models for Fissured Groundwater Reservoir with Fracture Skin. Water Resources Research, 20, 7, 831–846.
- Moench A.F., 1988. The Response of Partially Penetrating Wells to Pumpage from Double-Porosity Aquifers. Symposium Proceedings of International Conference on Fluid Flow in Fractured Rocks. Hydrogeology Program – Department of Geology, Georgia State University, pp. 208–219.
- Moench A.F., 1993. Computation of Type Curves for Flow to Partially Penetrating Wells in Water-Table Aquifers. Ground Water, 31, 6, 966–971.
- Moench A.F., 1994. Specific Yield as Determined by Type-Curve analysis of Aquifer Test Data. Ground Water, 32, 6, 949–957.
- Moench A.F., 1995. Combining the Neuman and Boulton Models for Flow to a Well in Unconfined Aquifer. Ground Water, 33, 3, 378–384.
- Moench A.F., 1996. Flow to a Well in a Water-Table Aquifer: An Improved Laplace Transform Solution. Ground Water, 34, 4, 593–596.
- Moogy L., 1969. Step drawdown test needs critical reviv. Ground Water, 7, 1.
- Morkos N.Z., Manuk'jan D.A., 1968. Metodika opredelenija gidrogeologičeskich parametrov dvuchslojnoj sredy po dannym opytnych rabot. Razvedka i Ochrana Nedr, 10, 38–42.
- Morkos N.Z., Šestakov V.M., 1966. Metodika opredelenija gidrogeologičeskich parametrov dvuchslojnogo plasta po dannym opytnych otkaček. Razvedka i Ochrana Nedr, 4, 48–52.
- Motyka J., Czop M., Polak K., 2002. Określenie właściwości hydrogeologicznych wapieni jury górnej na podstawie wzniosu zwierciadła wody w kamieniołomie „Zakrzówek” w Krakowie. Biul. Państw. Inst. Geol., 404, 107–2002.
- Neuman S.P., 1975. Analysis of Pumping Test Data From Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. Water Resources Research, 11, 2, 329–342.
- Niedzielski H., 1972. Z doświadczeń nad określaniem parametrów hydrogeologicznych metodą ruchu nieustalonego. Technika Poszukiwań, 40.
- Nielubowicz B., 1969. Metody określenia przepływu wód gruntowych poprzez półprzepuszczalne warstwy rozgraniczające horyzonty wodonośne. Odwodnienie Kopalń i Geotechnika, 2.
- Niezabitowski J. 2004. Analiza próbných pompowań z wykorzystaniem programu Aquifer-Test v.3.5 na przykładzie wybranych ujęć wód podziemnych. Praca magisterska. Archiwum Zakładu Hydrogeologii i Ochrony Wód UAM, Poznań.
- Nwankwor G.I., 1985. Delayed Yield Processes and Specific Yield in a Shallow Sand Aquifer. Ph.D. Thesis, Department of Earth Sciences, University of Waterloo.
- Olendski W., 1960. O sprężystych zasobach wód artezyjskich i ropy naftowej. Prz. Geol., 10.
- Ossowski J., 1985. Wodoprzepuszczalność kaolinu. W: Aktualne problemy hydrogeologii, Kraków – Karniowice. Wyd. AGH, Kraków.
- Paškovskij I.S., 1969. Opredelenije gidrogeologičeskich parametrov v uslovijach vzaimodejstvija vodonosnych gorizontov. Geologija, 2, 57–64. Vestn. MGU.
- Pazdro Z., 1977. Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- Pazdro Z., Kozerski B., 1990. Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- Percovskij V.V., 1968. Ob ocenke točnosti opredelenija parametrov fil'tracii. Razvedka i Ochrana Nedr, 4, 41–43.
- Pleczyński J., Przybyłek J., 1974. Problematyka dokumentowania zasobów wód podziemnych w dolinach rzecznych. Wyd. Geol., Warszawa.
- Plotnikov N.I., 1975. Ekspluatacionnaja razvedka podzemnych vod. Izd. Nedra, Moskva.



- Podniewski A., 1963. Analiza metod hydromechanicznych wyznaczania granicznych parametrów w zastosowaniu do studni zupełnych i grobli ziemnych. Prace Instytutu Gospodarki Wodnej, I, 3, 11–65. Wyd. Komunikacji i Łączności.
- Prażak J., Rzonca B., 2002. Zmienność parametrów filtracyjnych węglanowych skał dewońskich w Górach Świętokrzyskich. Biul. Państw. Inst. Geol., 404, 233–248.
- Przybyłek J., 1977. Polowe badania filtracji nieustalanej w różnych jednostkach hydrogeologicznych. Praca doktorska – maszynopis. AGH, Kraków.
- Przybyłek J., 2002. Wody podziemne w osadach kalkarenitowych wybrzeża Trypolitanii w świetle badań parametrów hydrogeologicznych. Biul. Państw. Inst. Geol., 404, 177–190. Warszawa.
- Przybyłek J., Brylska E., Dąbrowski S., 1971. Zasady obliczeń filtracji nieustalanej według wzorów Theisa i Hantusha. Wyd. Geol., Warszawa.
- Przybyłek J., Dąbrowski S., 1970. Instrukcja stosowania metody Theisa. Przeds. Hydr., Poznań.
- Röhrich T., Waterloo Hydrogeologic., 2002. Aquifer Test v.3.5. User's Manual.
- Rorabaugh M.I., 1953. Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian well. ASCE Proc., 362, 79.
- Schoeller H., 1962. Les eaux souterraines. Masson, Paris.
- Siwek Z., Mańkowski M., 1981. Wyznaczanie parametrów hydraulicznych ujęcia wód podziemnych na podstawie pompowań próbnych. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Sternberg Y.M., 1971. Parameter estimation for aquifer evaluation. Water Res. Bull., 7, 3, 447–455.
- Streltsova T.D., 1976a. Hydrodynamics of Groundwater flow in a fractured formation. Water Resour. Res., 12, 3, 405–414.
- Streltsova T.D., 1976b. Analysis of aquifer-aquitard flow. Water Resour. Res., 12, 3, 415–422.
- Szczepański A., 1973a. Uwagi o metodyce próbnego pompowania prowadzonego dla oceny parametrów hydrogeologicznych. Technika Poszukiwań, 45/46.
- Szczepański A., 1973b. O interpretacji wyników próbnych pompowań. Technika Poszukiwań, 47/48.
- Szczepański A., 1977. Dynamika wód podziemnych. Skrypt AGH. Wyd. Geol., Warszawa.
- Šestakov V.M., 1962. Ob opredelenii gidrogeologičeskich parametrov plasta po dannym opytnych otkaček v uslovijach neustanovivšejsja fil'tracii. Razvedka i Ochrana Nedr, 12, 37–42.
- Šestakov V.M., 1964. Ocenka soprotivlenija loža vodoemov pri gidrogeologičeskich rasčetach. Razvedka i Ochrana Nedr, 5, 34–38.
- Šestakov V.M., 1964. Opredelenije gidrogeologičeskich parametrov v uslovijach neustanovivšejsja fil'tracii c pomošč'ju etalonnnych krivyh. Bjull, NTI Gosgeolcoma SSSR, 3.
- Šestakov V.M., 1965. Neustanovivšajasja fil'tracija v dvuchslojnoj srede. OTN, 6. Izv. AN SSSR.
- Šestakov V.M., 1965. Teoretičeskije osnovy ocenki podpora, vodoponiženija i drenaža. Izd. MGU, s. 233.
- Šestakov V.M., Paškowskij I.S., 1967. Analiz režima vosstanovlenija urovnja vody v skvažine. Tr. VSEGINGEO, 1, 28–35.
- Šestakov V.M., Strel'cova T.D., 1967. Metodika obrabotki opytnych otkaček iz soveršennyh skvažin v gruntovyh potokach. Tr. VSEGINGEO, 1.
- Szymanko J., 1972. W sprawie metod projektowania i realizacji badań hydrogeologicznych przy ustalaniu zasobów wód podziemnych. Prz. Geol., 11.
- Szymanko J. i in., 1977. Zastosowanie modelowania matematycznego do badania bilansu wód podziemnych i obliczania ich zasobów. Biblioteka programów obliczeniowych. Blok programowy SP i EPD. KG Zachód, Poznań,

- Szymanko J., 1980. Modelowanie i analiza systemów wodonośnych. Wyd. Geol., Warszawa.
- Śmietański Z., 1969. Metoda analogii hydraulicznych w ocenie procesów nieustalonej filtracji przy odwadnianiu kopalń odkrywkowych. Pr. Geol. Kom. Nauk. Geol. PAN, Oddz. w Krakowie, 56. Wyd. Geol., Warszawa.
- Śmietański Z., Szczepański A., 1968. Określanie niektórych parametrów horyzontu wodonośnego przy zastosowaniu maszyn liczących ciągłego działania. Technika Poszukiwań, 26.
- Theis C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Am. Geophys. Un. Trans., 16, 519–524.
- Thiem G., 1906. Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig.
- Turek S., 1973. Problem oceny charakteru dopływu wód do studni w skałach szczelinowych. Pr. Hydr. Inst. Geol., 4.
- Verigin N.N. i dr., 1977. Gidrodinamičeskije i fiziko-chimičeskije svojstva gornych porod. Izd. Nedra, Moskva.
- Walton W.C., 1962. Selected analytical methods for well and aquifer elevation. Illinois State Water Survey, Bull., 49, 81.
- Walton W.C., 1970. Groundwater resource evaluation. Mc Graw-Hill Book Company, New York, St. Louis, San Francisco, Düsseldorf, London, Mexico, Panama, Sydney, Toronto.
- Walton W.C., 1996. Aquifer Test Analysis with WINDOWS Software. CRC Press, Boca Raton, Florida, 301 p.
- Wieczysty A., 1970. Hydrogeologia inżynierska. PWN, Warszawa, Kraków.
- Wilk Z., 1962. O określaniu parametrów hydrogeologicznych złoża wody podziemnej w warunkach nieustalonego przepływu. Prz. Geol., 9.
- Zeegofer Ju.O., Šestakov B.M., 1968. Metodika obrabotki danych opytnych otkaček vblizi reki. Pazvedka i Ochrana Nedr, 9, 38–44.
- Zelenin I.V., 1968. Ob ocenke vodoprovodimosti po formule Dupuita. Geologija i Razvedka, 5, 110–112. Izv. VUZov.

## INDEKS HASEŁ

### B

- badania modelowe *patrz* modelowanie
- matematyczne . . . . . 230, 250, 251
- bilans,
  - zasobów eksploatacyjnych . . . . . 244
  - krążenia wód . . . . . 250
  - przepływów . . . . . 250
  - dopływów wody . . . . . 250
  - równanie bilansowe . . . . . 245, 246

### C

- czas pompowań . . . 16, 55, 62, 63, 66, 152
- częstotliwość pomiarów . . . . . 59, 61, 83

### D

- depresja zwierciadła wody,
  - całkowita . . . . . 9, 77, 80, 81, 86
  - dotatkowa (zeskok hydrauliczny) 10, 76
  - rejonowa . . . . . 248
  - rzeczywista . . . . . 10, 76, 80, 81, 86
  - skorygowana . . . . . 49, 122, 137
- dopływ do studni . . . 29, 31, 32, 33, 46, 76
  - płasko-radialny . . . . . 32
  - sferyczno-radialny . . . . . 31
  - nieustalony . . . . . 33
  - ustalony . . . . . 33
- dzienniki próbnych pompowań 63–65, 83, 84

### F

- filtracja . . . . . 19–21, 30, 33, 36
  - nieustalona . . . . . 33
  - pionowa . . . . . 21
  - pozioma . . . . . 21
  - quasi-ustalona . . . . . 36
- funkcje,
  - Bessela drugiego rzędu . . . . . 10, 33
  - Boultona (odsączania) . . . . . 10, 39
  - charakterystyczna . . . . . 35
  - Hantusha (przesiäkania,
    - przesączania) . . . . . 10, 38, 88, 95, 96
    - przesiäkania . . . . . 37

- Theisa . . . . . 10, 35, 36, 38, 68, 88, 96
- teoretyczne (wzorcowe) . . . . . 40, 91, 96
- warstw jednostronnie ograniczonych 10, 44

### G

- gęstość . . . . . 18, 19
- gradient hydrauliczny . . . . . 9, 33
- granice warstw wodonośnych . . . . . 43
  - nieprzepuszczalne . . . . . 44, 45
  - zasilające . . . . . 44, 46, 139

### H

- hydrowęzeł . . . . . 51, 52, 53
  - krzyżowy . . . . . 51
  - podwójny . . . . . 53
  - prostokątny . . . . . 52
  - trójkątny . . . . . 52
  - w dolinie kopalnej . . . . . 53
  - w dolinie rzecznej . . . . . 53
  - w warstwach związanych . . . . . 53

### K

- klasa,
  - przepuszczalności . . . . . 22
  - izolacyjności . . . . . 22
  - przesiäkalności . . . . . 22
- korekta depresji . . . . . 85, 137
- krzywa,
  - depresji . . . . . 30, 31, 45, 46
  - opadania . . . . . 152–155
  - wzniosu . . . . . 152–155

### L

- lej depresji . . . . . 10, 16, 133, 134, 244
- lepkość dynamiczna . . . . . 18
- linie,
  - ekwipotencjalne . . . . . 45, 46
  - prądu . . . . . 45, 46
- logarytmiczne przybliżenie . . . . . 35

**M**

## metody,

- Boultona (podwójnie logarytmiczna) 69, 116, 120, 137
- Bruina-Hudsona . . . . . 77, 85
- Cooper-Jacob Distance Drawdown 135, 256, 258
- De Glee (podwójnie logarytmiczna) 113, 115
- Dupuita-Thiema . . 110, 125, 126, 146, 199, 204, 216
- Hantusha – przybliżenia logarytmicznego . . . . . 101
- Hantusha – podwójnie logarytmiczna . . . . . 104
- Jacoba . . . . . 49
- modelowania . . . . . 246, 247, 250
- Neumana . . . . . 40, 256, 258, 259
- Theisa (podwójnie logarytmiczna) . 49, 87, 94, 96, 104
- Theisa-Jacoba (przybliżenia logarytmicznego) . 36, 41, 47, 92, 93, 94, 103, 108
- Waltona (podwójnie logarytmiczna) 95
- hydrodynamiczne . . . . . 246
- hydrauliczne . . . . . 246
- modelowania matematycznego . . 246
- miąższość . . . . . 18, 37, 40, 53
- nadkładu . . . . . 90
- warstwy wodonośnej . . . . . 9, 53
- warstwy słabo przepuszczalnej . . . . 9
- modelowanie matematyczne . . 246, 250, 251, 253
- moduł sprężystości wody . . . . . 18, 26

**O**

- odsączalność . . . . . 106, 130
- okna hydrogeologiczne . . . . . 23, 195
- opory filtracyjne (hydrauliczne) studni 78
- opór hydrauliczny (przesącznia, przesiąkania) . . . . . 27
- otwory,
- obserwacyjne (piezometry) 44, 51, 56–58, 151
- studienne . . . . . 76, 77

**P**

- parametry,
- filtracyjne . . . . . 18

- warstwy . . . . . 18
- wody . . . . . 18
- piezometry (otwory obserwacyjne),
- konstrukcja . . . . . 51, 58
- odległość . . . . . 56
- posadowienie . . . . . 57
- piezoprzewodność. . . . . 9
- pojemność studni . . . . . 152
- pompowania,
- indywidualne . . . . . 16
- zespołowe . . . . . 16, 221
- poprawka Jacoba . . . . . 11, 36
- porowatość . . . . . 72, 210
- poziom wodonośny,
- o pełnej więzi hydraulicznej . . . . . 24
- o więzi ograniczonej . . . . . 24
- o więzi strefowej . . . . . 24
- prawo,
- Darcy . . . . . 19, 28
- Chezy-Krasnopolskiego . . . . . 20
- prędkość filtracji . . . . . 28, 29
- dopuszczalna . . . . . 49
- promień studni . . . . . 10, 49
- próbne pompowania . . . . . 7, 15
- hydrowęzłowe . . . . . 16
- indywidualne . . . . . 16
- jednostopniowe powtarzalne . . . . . 82
- wielostopniowe . . . . . 79
- zespołowe . . . . . 16
- przepływ,
- laminarny . . . . . 77
- turbulentny . . . . . 77
- przerwy w pompowaniu . . . . . 61
- przewodność,
- hydrauliczna . . . . . 84
- warstwy . . . . . 9

**R**

- rodzaje warstw wodonośnych . . . . . 25
- ruch laminarny . . . . . 77
- ruch turbulentny . . . . . 20, 77
- równania,
- Boultona . . . . . 39
- Boussinesqua . . . . . 29
- Chezy-Krasnopolskiego . . . . . 20
- de Glee . . . . . 33
- Dupuita . . . . . 29
- Dupuita-Thiema . . . . . 36
- Fouriera . . . . . 29

- Hantusha . . . . . 37  
 krzywej depresji . . . . . 31  
 krzywej wzniosu . . . . . 41  
 Laplace'a . . . . . 29  
 Neumana . . . . . 40  
 Theisa . . . . . 34  
 Theisa-Jacoba . . . . . 36  
 Thiema . . . . . 31
- S**  
 schemat obliczeniowy,  
 Boultona . . . . . 38  
 Dupuita . . . . . 29  
 Theisa . . . . . 34  
 spadek hydrauliczny . . . . . 9  
 sprawność studni . . . . . 79, 80  
 strefa saturacji . . . . . 40, 256  
 strumień wód podziemnych 30, 31, 32, 33,  
 34, 36  
 studnie,  
 awaryjne . . . . . 194  
 niezupełne . . . . . 40, 50, 76  
 zupełne . . . . . 30, 35, 50  
 system wodonośny . . . . . 241
- Ś**  
 średnica studni . . . . . 50
- T**  
 teoria odbić zwierciadlanych . . . . 44, 47  
 typy hydrodynamiczne warstw  
 wodonośnych . . . . . 25
- U**  
 ujęcia,  
 infiltracyjne . . . . . 246  
 małe . . . . . 246  
 duże . . . . . 246
- W**  
 warstwa wodonośna,  
 nieograniczona . . . . . 7  
 o zwierciadle naporowym . . . . 25, 30  
 o zwierciadle naporowym (napiętym) 25  
 o zwierciadle niezupełnie napiętym 25,  
 37  
 o zwierciadle wewnętrznie niezupełnie  
 napiętym . . . . . 25
- o zwierciadle niezupełnie  
 swobodnym . . . . . 25  
 o zwierciadle swobodnym . . . 25, 31, 33  
 ograniczona . . . . . 7, 49  
 półprzepuszczalna . . . . . 25
- warunki,  
 dopływu . . . . . 37  
 brzegowe . . . . . 43
- wskaźnik opóźnienia . . . . . 11
- współczynnik,  
 filtracji poziomej . . . . . 40  
 filtracji pionowej . . . . . 9, 40  
 jednostkowej pojemności sprężystej . 26  
 odsączalności sprężystej . 9, 26, 40, 94,  
 96  
 grawitacyjnej . . . . . 9, 26, 40  
 opóźnionego odsączania . . . . . 10, 27  
 oporu studni . . . . . 84  
 piezoprzewodności . . . . . 9, 26  
 porowatości . . . . . 26  
 przeciekania . . . . . 9, 38  
 przesiąkania . . . . . 27, 38, 96  
 przewodności . . . . . 89, 96  
 ściśliwości . . . . . 26  
 zasobności sprężystej (wielkość) . . 55
- wydajność studni (pompowanego otworu)  
 . . . . . 49, 54, 61
- wykresy,  
 funkcji Theisa . . . . . 35  
 funkcji Hantusha . . . . . 38  
 krzywej wzorcowej (wzorcowe) . 75, 89  
 krzywej doświadczalnej (doświadczalne)  
 . . . . . 89  
 opadania zwierciadła wody . . . . . 73  
 próbnych pompowań . . . . . 73, 74  
 przybliżenia logarytmicznego (Theisa-  
 -Jacob'a) . . . . . 67-72, 93  
 wskaźnikowe . . . . . 62, 66  
 wzniosu zwierciadła wody . . . . . 73
- wysokość hydrauliczna (wysokość naporu)  
 . . . . . 9, 18, 19, 25
- Z**  
 zafiltrowanie . . . . . 49, 50, 55,  
 205  
 zasięg leja depresji . . . . . 34, 54  
 zasoby wód podziemnych,  
 dodatkowe . . . . . 244  
 dynamiczne . . . . . 245

eksploatacyjne . . . . .	246	uzupełniająca (wzbudzone) . . . . .	245
sprężyste . . . . .	245	zeskok hydrauliczny . . . . .	81
statyczne . . . . .	245	zeskok zwierciadła wody . . . . .	81, 152

Dodatek 1. Wartości funkcji  $W(u, r/B)$  według Hantusha (1956)

u	r / B										u	
	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009		0,01
0		14,0474	12,6611	11,8502	11,2748	10,8286	10,464	10,1557	9,8887	9,6532	9,4425	0
0,000001	13,2383	13,0031	12,4417	11,8163	11,2711	10,8283	10,464	10,1557	9,8887			0,000001
0,000002	12,5451	12,424	12,1013	11,6716	11,2259	10,8174	10,4619	10,1554	9,8886	9,6532		0,000002
0,000003	12,1397	12,0581	11,8322	11,5098	11,1462	10,7849	10,4509	10,1523	9,8879	9,653	9,4425	0,000003
0,000004	11,852	11,7905	11,6168	11,3597	11,0555	10,7374	10,4291	10,1436	9,8849	9,6521	9,4422	0,000004
0,000005	11,6289	11,5795	11,4384	11,2248	10,9642	10,6822	10,3993	10,129	9,8786	9,6496	9,4413	0,000005
0,000006	11,4465	11,4503	11,2866	11,104	10,8764	10,624	10,364	10,1094	9,8686	9,645	9,4394	0,000006
0,000007	11,2924	11,257	11,1545	10,9951	10,7933	10,5652	10,3255	10,0862	9,8555	9,6382	9,4361	0,000007
0,000008	11,1589	11,1279	11,0377	10,8962	10,7151	10,5072	10,2854	10,0602	9,8398	9,6292	9,4313	0,000008
0,000009	11,0411	11,0135	10,933	10,8059	10,6416	10,4508	10,2446	10,0324	9,8219	9,6182	9,4251	0,000009
0,00001	10,9357	10,9109	10,8382	10,7228	10,5725	10,3963	10,2038	10,0034	9,8024	9,6059	0,4176	0,00001
0,00002	10,2426	10,2301	10,1932	10,1322	10,0522	9,953	9,8386	9,7126	9,5781	9,4383	9,2961	0,00002
0,00003	9,8371	9,8288	9,8041	9,7635	9,7081	9,6392	9,5583	9,4671	9,3674	9,2611	9,1499	0,00003
0,00004	9,5495	9,5432	9,5246	9,494	9,452	9,3992	9,3366	9,2653	9,1863	9,1009	9,0102	0,00004
0,00005	9,3263	9,3213	9,3064	9,2818	9,248	9,2052	9,1542	9,0957	9,0304	8,9591	8,8227	0,00005
0,00006	9,1140	9,1398	9,1274	9,1069	9,0785	9,0426	8,9996	8,95	8,8943	8,8332	8,7673	0,00006
0,00007	8,9899	8,9863	8,9756	8,958	8,9336	8,9027	8,8654	8,8224	8,7739	8,7204	8,6625	0,00007
0,00008	8,8563	8,8532	8,8439	8,8284	8,807	8,7798	8,747	8,709	8,6661	8,6186	8,5669	0,00008
0,00009	8,7386	8,7358	8,7275	8,7138	8,6947	8,6703	8,6411	8,6071	8,5686	8,5258	8,4792	0,00009
0,0001	8,6332	8,6308	8,6233	8,6109	8,5938	8,5717	8,5433	8,5145	8,4796	8,4407	8,3983	0,0001
0,0002	7,9402	7,939	7,9352	7,929	7,9203	7,9092	7,8958	7,88	7,8619	7,8416	7,8192	0,0002
0,0003	7,5348	7,534	7,5315	7,5274	7,5216	7,5141	7,5051	7,4945	7,4823	7,4686	7,4534	0,0003
0,0004	7,2472	7,2466	7,2447	7,2416	7,2373	7,2317	7,2249	7,2169	7,2078	7,1974	7,1859	0,0004

u	r / B										u	
	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009		0,01
0		14,0474	12,6611	11,8502	11,2748	10,8286	10,464	10,1557	9,8887	9,6532	9,4425	0
0,0005	7,0242	7,0237	7,0222	7,0197	7,0163	0,0118	7,0063	6,9999	6,9926	6,9843	6,975	0,0005
0,0006	6,842	6,8416	6,8403	6,8383	6,8353	6,8316	6,8271	6,8218	6,8156	6,8086	6,8009	0,0006
0,0007	6,6879	6,6876	6,6865	6,6848	6,6823	6,679	6,6752	6,6706	6,6653	6,6594	6,6527	0,0007
0,0008	6,5545	6,5542	6,5532	6,5517	6,5495	6,5467	6,5433	6,5393	6,5347	6,5295	6,5237	0,0008
0,0009	6,4368	6,4365	6,4357	6,4344	6,4324	6,4299	6,4269	6,4233	6,4192	6,4146	6,4094	0,0009
0,001	6,3315	6,3313	6,3305	6,3293	6,3276	6,3253	6,3226	6,3194	6,3157	6,3115	6,3069	0,001
0,002	5,6394	5,6393	5,6389	5,6383	5,6374	5,6363	5,635	5,6334	5,6315	5,6294	5,6271	0,002
0,003	5,2349	5,2348	5,2346	5,2342	5,2336	5,2329	5,232	5,231	5,2297	5,2283	5,2267	0,003
0,004	4,9462	4,9482	4,948	4,9477	4,9472	4,9467	4,946	4,9453	4,9443	4,9433	4,9421	0,004
0,005	4,7261	4,726	4,7259	4,7256	4,7253	4,7249	4,7244	4,7237	4,723	4,7222	4,7212	0,005
0,006	4,5448	4,5448	4,5447	4,5444	4,5441	4,5438	4,5433	4,5428	4,5422	4,5415	4,5407	0,006
0,007	4,3916	4,3916	4,3915	4,3913	4,391	4,3908	4,3904	4,3899	4,3894	4,3888	4,3882	0,007
0,008	4,2591	4,259	4,259	4,2588	4,2586	4,2583	4,258	4,2576	4,2572	4,2567	4,2561	0,008
0,009	4,1423	4,1423	4,1422	4,142	4,1418	4,1416	4,1413	4,141	4,1406	4,1401	4,1396	0,009
0,01	4,0379	4,0379	4,0378	4,0377	4,0375	4,0373	4,0371	4,0368	4,0364	4,036	4,0356	0,01
0,02	3,3547	3,3547	3,3547	3,3546	3,3545	3,3544	3,3543	3,3542	3,354	3,3538	3,3536	0,02
0,03	2,9591	2,9591	2,9591	2,959	2,959	2,9589	2,9889	2,9588	2,9587	2,9585	2,9584	0,03
0,04	2,6813	2,6812	2,6812	2,6812	2,6812	2,6811	2,681	2,681	2,6809	2,6808	2,6807	0,04
0,05	2,4679	2,4679	2,4679	2,4679	2,4678	2,4678	2,4678	2,4677	2,4676	2,4676	2,4675	0,05
0,06	2,2953	2,2953	2,2953	2,2953	2,2952	2,2952	2,2952	2,2952	2,2951	2,295	2,295	0,06
0,07	2,1508	2,1508	2,1508	2,1508	2,1508	2,1508	2,1507	2,1507	2,1507	2,1506	2,1506	0,07
0,08	2,0269	2,0269	2,0269	2,0269	2,0269	2,0269	2,0269	2,0268	2,0268	2,0268	2,0267	0,08
0,09	1,9187	1,9187	1,9187	1,9187	1,9187	1,9187	1,9187	1,9186	1,9186	1,9186	1,9185	0,09
0,1	1,8229	1,8229	1,8229	1,8229	1,8229	1,8229	1,8229	1,8228	1,8228	1,8228	1,8227	0,1





u	r / B													u
	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,067	0	
0,000001	8,6319	8,0569	7,6111	7,2472	6,9394	6,6731	6,4383	6,2285	6,0388	5,8658	5,7067	0	0,000001	
0,000002													0,000002	
0,000003													0,000003	
0,000004													0,000004	
0,000005													0,000005	
0,000006													0,000006	
0,000007	8,6319												0,000007	
0,000008	8,6318												0,000008	
0,000009	8,6316												0,000009	
0,00001	8,6313	8,0569											0,00001	
0,00002	8,6152	8,0558	7,6111	7,2471									0,00002	
0,00003	8,5737	8,0483	7,6101	7,247									0,00003	
0,00004	8,5168	8,0320	7,6069	7,2465	6,9394	6,6731							0,00004	
0,00005	8,4533	8,0080	7,6000	7,245	6,9391	6,6730							0,00005	
0,00006	8,388	7,9786	7,5894	7,2419	6,9384	6,6729	6,4383						0,00006	
0,00007	8,3233	7,9456	7,5754	7,2371	6,937	6,6726	6,4382	6,2285					0,00007	
0,00008	8,2603	7,9105	7,5589	7,2305	6,9347	6,6719	6,4381	6,2284					0,00008	
0,00009	8,1996	7,8743	7,5402	7,2222	6,9316	6,6709	6,4378	6,2283					0,00009	
0,0001	8,1414	7,8375	7,5199	7,2122	6,9273	6,6693	6,4372	6,2282	6,0388	5,8658	5,7067	0,0001		
0,0002	8,678	7,4972	7,2898	7,0685	6,8439	6,6242	6,4143	6,2173	6,0338	5,8637	5,7059	0,0002		
0,0003	8,3562	7,2281	7,0759	6,9068	6,7276	6,5444	6,3623	6,1848	6,0145	5,8527	5,6999	0,0003		
0,0004	8,1119	7,0128	6,8929	6,7567	6,6088	6,4538	6,2955	6,1373	5,9818	5,8309	5,6860	0,0004		
0,0005	8,9152	6,8346	6,7357	6,6219	6,4964	6,3626	6,2236	6,0821	5,9406	5,8011	5,6648	0,0005		
0,0006	8,7508	6,6828	6,5988	6,5011	6,3923	6,2748	6,1512	6,0239	5,8948	5,7658	5,6383	0,0006		

u	r / B															u
	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	0,085	
0	8,6319	8,0569	7,6111	7,2472	6,9394	6,6731	6,4383	6,2285	6,0388	5,8658	5,7067	0				
0,0007	8,6096	6,5508	6,4777	6,3923	6,2962	6,1917	6,0807	5,9652	5,8468	5,7274	5,6081	0,0007				
0,0008	8,4858	6,4340	6,3695	6,2935	6,2076	6,1136	6,0129	5,9073	5,7982	5,6873	5,5755	0,0008				
0,0009	8,3757	6,3294	6,2716	6,2032	6,1256	6,0401	5,9481	5,8509	5,7500	5,6465	5,5416	0,0009				
0,001	6,2765	6,2347	6,1823	6,1202	6,0494	5,9711	5,8864	5,7965	5,7026	5,6058	5,5071	0,001				
0,002	5,6118	5,5907	5,5636	5,5314	5,4939	5,4516	5,4027	5,3538	5,2991	5,2411	5,1803	0,002				
0,003	5,2166	5,2025	5,1845	5,1627	5,1373	5,1084	5,0762	5,0408	5,0025	4,9615	4,918	0,003				
0,004	4,9345	4,924	4,9105	4,8941	4,8749	4,853	4,8286	4,8016	4,7722	4,7406	4,7068	0,004				
0,005	4,7152	4,7068	4,696	4,6829	4,6675	4,6499	4,6302	4,6084	4,5846	4,559	4,5314	0,005				
0,006	4,5357	4,5287	4,5197	4,5088	4,496	4,4814	4,4649	4,4467	4,4267	4,4051	4,3819	0,006				
0,007	4,3839	4,3779	4,3702	4,3609	4,35	4,3374	4,3233	4,3077	4,2905	4,2719	4,2518	0,007				
0,008	4,2524	4,2471	4,2404	4,2323	4,2228	4,2118	4,1994	4,1857	4,1707	4,1544	4,1368	0,008				
0,009	4,1363	4,1317	4,1258	4,1186	4,1101	4,1004	4,0894	4,0772	4,0638	4,0493	4,0336	0,009				
0,01	4,0326	4,0285	4,0231	4,0167	4,0091	4,0003	3,9905	3,9795	3,9675	3,9544	3,9403	0,01				
0,02	3,3521	3,3502	3,3476	3,3444	3,3408	3,3365	3,3317	3,3264	3,3205	3,3141	3,3071	0,02				
0,03	2,9575	2,9562	2,9545	2,9523	2,9501	2,9474	2,9444	2,9409	2,937	2,9329	2,9284	0,03				
0,04	2,68	2,6791	2,6779	2,6765	2,6747	2,6727	2,6705	2,668	2,6652	2,6622	2,6589	0,04				
0,05	2,467	2,4662	2,4653	2,4642	2,4628	2,4613	2,4595	2,4576	2,4554	2,4531	2,4505	0,05				
0,06	2,2945	2,294	2,2932	2,2923	2,2912	2,29	2,2885	2,287	2,2852	2,2833	2,2812	0,06				
0,07	2,1502	2,1497	2,1491	2,1483	2,1474	2,1464	2,1452	2,1439	2,1424	2,1408	2,1391	0,07				
0,08	2,0264	2,026	2,0255	2,0248	2,024	2,0231	2,0221	2,021	2,0198	2,0184	2,0169	0,08				
0,09	1,9183	1,9179	1,9174	1,9169	1,9162	1,9154	1,9146	1,9136	1,9125	1,9114	1,9101	0,09				
0,1	1,8225	1,8222	1,8218	1,8213	1,8207	1,82	1,8193	1,8184	1,8175	1,8164	1,8153	0,1				
0,2	1,2225	1,2224	1,2222	1,222	1,2218	1,2215	1,2212	1,2209	1,2205	1,2201	1,2196	0,2				
0,3	0,9056	0,9055	0,9054	0,9053	0,9052	0,905	0,9049	0,9047	0,9045	0,9043	0,904	0,3				



u	r / B											u
	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	
0	5,5596	5,4228	5,295	5,1750	5,0620	4,9553	4,8541	4,0601	3,5054	3,0830	2,7449	0
0,000001												0,000001
0,000002												0,000002
0,000003												0,000003
0,000004												0,000004
0,000005												0,000005
0,000006												0,000006
0,000007												0,000007
0,000008												0,000008
0,000009												0,000009
0,00001												0,00001
0,00002												0,00002
0,00003												0,00003
0,00004												0,00004
0,00005												0,00005
0,00006												0,00006
0,00007												0,00007
0,00008												0,00008
0,00009												0,00009
0,0001	5,5596	5,4223	5,2950									0,0001
0,0002	5,5593	5,4227	5,2949	5,1750	5,0620	4,9553						0,0002
0,0003	5,5562	5,4212	5,2942	5,1747	5,0619	5,9552	4,8541					0,0003
0,0004	5,5476	5,416	5,2912	5,1730	5,0610	4,9547	4,8539					0,0004
0,0005	5,5330	5,4062	5,2848	5,1689	5,0585	4,9532	4,8530					0,0005
0,0006	5,5134	5,3921	5,2749	5,1621	5,0539	4,9502	4,8510	4,0601				0,0006

u	r / B															u
	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30				
0	5,5596	5,4228	5,295	5,1750	5,0620	4,9553	4,8541	4,0601	3,5054	3,0830	2,7449	0				
0,0007	5,4902	5,3745	5,2618	5,1526	5,0471	4,9454	4,8478	4,0600				0,0007				
0,0008	5,4642	5,3542	5,2461	5,1406	5,0381	4,9388	4,8430	4,0599				0,0008				
0,0009	5,4364	5,3317	5,2282	5,1266	5,0272	4,9306	4,8368	4,0598				0,0009				
0,001	5,4075	5,3078	5,2087	5,1109	5,0133	4,9208	4,8292	4,0595	3,5054			0,001				
0,002	5,117	5,0517	4,9848	4,9166	4,8475	4,7778	4,7079	4,0435	3,5043	3,083	2,7449	0,002				
0,003	4,8722	4,8243	4,7746	4,7234	4,6707	4,6169	4,5622	4,0092	3,4969	3,0821	2,7448	0,003				
0,004	4,671	4,6335	4,5942	4,5533	4,5111	4,4676	4,423	3,9551	3,4806	3,0788	2,7444	0,004				
0,005	4,5022	4,4713	4,4389	4,405	4,3699	4,3335	4,296	3,8821	3,4567	3,0719	2,7428	0,005				
0,006	4,3573	4,3311	4,3036	4,2747	4,2446	4,2134	4,1812	3,8384	3,4274	3,0614	2,7398	0,006				
0,007	4,2305	4,2078	4,1839	4,1588	4,1326	4,1053	4,0771	3,7529	3,3947	3,0476	2,735	0,007				
0,008	4,118	4,098	4,0769	4,0547	4,0315	4,0073	3,9822	3,6903	3,3598	3,0311	2,7284	0,008				
0,009	4,0169	3,9991	3,9802	3,9603	3,9395	3,9178	3,8952	3,6302	3,3239	3,0126	2,7202	0,009				
0,01	3,9252	3,9091	3,892	3,8741	3,8552	3,8356	3,815	3,5725	3,2875	3,0025	2,7104	0,01				
0,02	3,2997	3,2917	3,2832	3,2742	3,2647	3,2547	3,2442	3,1158	2,9521	2,7658	2,5688	0,02				
0,03	2,9235	2,9183	2,9127	2,9069	2,9007	2,8941	2,8873	2,8017	2,6896	2,5571	2,411	0,03				
0,04	2,6553	2,6515	2,6475	2,6432	2,6386	2,6338	2,6288	2,5655	2,4816	2,3802	2,2661	0,04				
0,05	2,4478	2,4448	2,4416	2,4383	2,4347	2,431	2,4271	2,3776	2,311	2,2299	2,1371	0,05				
0,06	2,279	2,2766	2,274	2,2713	2,2684	2,2654	2,2622	2,2218	2,1673	2,1002	2,0227	0,06				
0,07	2,1372	2,1352	2,1331	2,1308	2,1284	2,1258	2,1232	2,0894	2,0435	1,9867	1,9206	0,07				
0,08	2,0153	2,0136	2,0118	2,0099	2,0078	2,0056	2,0034	1,9745	1,9351	1,8861	1,829	0,08				
0,09	1,9087	1,9072	1,9056	1,904	1,9022	1,9003	1,8983	1,8732	1,8389	1,7961	1,746	0,09				
0,1	1,8141	1,8128	1,8114	1,8099	1,8084	1,8067	1,805	1,7829	1,7527	1,7149	1,6704	0,1				
0,2	1,2192	1,2186	1,2181	1,2175	1,2168	1,2162	1,2155	1,2066	1,1944	1,1789	1,1602	0,2				
0,3	0,9038	0,9035	0,9032	0,9029	0,9025	0,9022	0,9018	0,8969	0,8902	0,8817	0,8713	0,3				

u	r / B														u
	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30				
0	5,5596	5,4228	5,295	5,1750	5,0620	4,9553	4,8541	4,0601	3,5054	3,0830	2,7449	0			
0,4	0,7012	0,701	0,7008	0,7006	0,7004	0,7002	0,7	0,6969	0,6927	0,6874	0,6809	0,4			
0,5	0,559	0,5588	0,5587	0,5586	0,5584	0,5583	0,5581	0,5561	0,5532	0,5496	0,5453	0,5			
0,6	0,4538	0,4537	0,4536	0,4535	0,4534	0,4533	0,4532	0,4518	0,449B	0,4472	0,4441	0,6			
0,7	0,3733	0,3733	0,3732	0,3732	0,3731	0,373	0,3729	0,3719	0,3704	0,3685	0,3663	0,7			
0,8	0,3103	0,3102	0,3102	0,3101	0,3101	0,31	0,31	0,3092	0,3081	0,3067	0,305	0,8			
0,9	0,2599	0,2599	0,2599	0,2598	0,2598	0,2597	0,2597	0,2591	0,2583	0,2572	0,2559	0,9			
1,0	0,2192	0,2191	0,2191	0,2191	0,2191	0,219	0,219	0,2186	0,2179	0,2171	0,2161	1,0			
2,0	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489	0,0488	0,0488	0,0488	0,0487	0,0486	0,0485	2,0			
3,0	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	3,0			
4,0	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	4,0			
5,0	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	5,0			
6,0	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	6,0			
7,0	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	7,0			
8,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,0			

u	r / B															u
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0				
0	2,4654	2,2291	2,0258	1,8488	1,6931	1,5550	1,4317	1,3210	1,2212	1,1307	1,0485	0	0,001			
0,001													0,002			
0,002													0,003			
0,003													0,004			
0,004	2,4654	2,2291											0,005			
0,005	2,4651	2,2290											0,006			
0,006	2,4644	2,2289	2,0258										0,007			
0,007	2,4630	2,2286	2,0257										0,008			
0,008	2,4608	2,2279	2,0256	1,8488									0,009			
0,009	2,4576	2,2269	2,0253	1,8487									0,01			
0,01	2,4534	2,2253	2,0248	1,8486	1,6931	1,5550	1,4317	1,3210	1,2212	1,1307	1,0485	0,02	0,03			
0,02	2,3713	2,1609	2,0023	1,8379	1,6883	1,5530	1,4309	1,3207	1,2210	1,1306	1,0484	0,04	0,05			
0,03	2,2578	2,1031	1,9515	1,8062	1,6695	1,5423	1,4251	1,3177	1,2195	1,1299	1,0481	0,06	0,07			
0,04	2,H31	2,0155	1,8869	1,7603	1,6379	1,5213	1,4117	1,3094	1,2146	1,1270	1,0465	0,08	0,09			
0,05	2,0356	1,9283	1,8181	1,7075	1,5985	1,4927	1,3914	1,2955	1,2052	1,1210	1,0426	0,1	0,2			
0,06	1,9369	1,8452	1,7497	1,6524	1,5551	1,4593	1,3663	1,2770	1,1919	1,1116	1,0362	0,3	0,4			
0,07	1,8469	1,7673	1,6835	1,5973	1,5101	1,4232	1,3380	1,2551	1,1754	1,0993	1,0272	0,5	0,6			
0,08	1,7646	1,6947	1,6206	1,5436	1,4650	1,3860	1,3078	1,2310	1,1564	1,0847	1,0161	0,08	0,09			
0,09	1,6892	1,6272	1,5609	1,4918	1,4206	1,3486	1,2766	1,2054	1,1358	1,0682	1,0032	0,1	0,2			
0,1	1,6198	1,5644	1,5048	1,4422	1,3774	1,3115	1,2451	1,1791	1,1140	1,0505	0,9890	0,3	0,4			
0,2	1,1387	1,1145	1,0879	1,0592	1,0286	0,9964	0,9629	0,9284	0,8932	0,8575	0,8216	0,5	0,6			
0,3	0,8593	0,8457	0,8306	0,8142	0,7964	0,7775	0,7577	0,7369	0,7154	0,6932	0,6706	0,08	0,09			
0,4	0,6733	0,6647	0,6551	0,6446	0,6332	0,6209	0,6080	0,5943	0,5801	0,5653	0,5501	0,1	0,2			
0,5	0,5402	0,5344	0,5278	0,5206	0,5128	0,5044	0,4955	0,4860	0,4761	0,4658	0,4550	0,3	0,4			
0,6	0,4405	0,4364	0,4317	0,4266	0,4210	0,4150	0,4086	0,4018	0,3946	0,3871	0,3793	0,5	0,6			









Dodatek 2. Wartości funkcji  $W(u, \psi)$ . Według Hantusha, 1964\*

$\psi$	(-3)					(-2)					(-1)				
	1	2	5	1	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5	
1(-6)	11,9842	11,4237	10,5908	9,9259	9,2469	8,3395	7,6497	6,959	6,0463						
5(-6)	10,8958	10,4566	9,7174	9,0866	8,4251	7,5284	6,8427	6,1548	5,2459						
1(-5)	10,3739	9,9987	9,3203	8,7142	8,0657	7,1771	6,4944	5,8085	4,9024						
5(-5)	9,0422	8,8128	8,3171	7,8031	7,2072	6,3523	5,6821	5,0045	4,109						
1(-4)	8,4258	8,2487	7,8386	7,3803	6,8208	5,9906	5,3297	4,6581	3,77						
5(-4)	6,9273	6,8375	6,6024	6,2934	5,8561	5,1223	4,4996	3,8527	2,9933						
1(-3)	6,2624	6,1969	6,0193	5,7727	5,4001	4,729	4,1337	3,5045	2,665						
5(-3)	4,6951	4,6649	4,5786	4,4474	4,2231	3,7415	3,2483	2,6891	1,925						
1(-2)	4,0163	3,995	3,9334	3,8374	3,6669	3,2752	2,8443	2,3325	1,6193						
5(-2)	2,459	2,4502	2,4243	2,3826	2,304	2,1007	1,8401	1,4872	0,954						
1(-1)	1,8172	1,8116	1,7949	1,7677	1,7157	1,5768	1,3893	1,1207	0,6947						
5(-1)	0,5584	0,557	0,553	0,5463	0,5333	0,4969	0,4436	0,3591	0,2083						
1(0)	0,2189	0,2184	0,2169	0,2144	0,2097	0,1961	0,1758	0,1427	812(-4)						
5(0)	115(-5)	114(-5)	114(-5)	112(-5)	110(-5)	104(-5)	934(-6)	763(-6)	423(-6)						
10(0)	415(-8)	414(-8)	411(-8)	407(-8)	399(-8)	375(-8)	339(-8)	277(-8)	153(-8)						

ψ u	(0)					(1)					(2)				
	1	2	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5
1(-6)	5,3575	4,6721	3,7756	3,111	2,4671	1,671	1,1361	0,6879	0,2698						
5(-6)	4,5617	3,8836	3,0055	2,3661	1,7633	1,0574	0,6256	0,3091	757(-4)						
1(-5)	4,2212	3,5481	2,6822	2,059	1,4816	0,8285	0,4519	0,1978	385(-4)						
5(-5)	3,4394	2,7848	1,9622	1,3943	0,8994	0,4024	0,1685	494(-4)	405(-5)						
1(-4)	3,1082	2,4658	1,6704	1,1359	0,6878	0,2698	963(-4)	222(-4)	107(-5)						
5(-4)	2,3601	1,7604	1,0564	0,6252	0,3089	787(-4)	166(-4)	169(-5)	129(-7)						
1(-3)	2,0506	1,4776	0,8271	0,4513	0,1976	388(-4)	590(-5)	361(-6)							
5(-3)	1,3767	0,8915	0,4001	0,1677	493(-4)	403(-5)	205(-6)	228(-8)							
1(-2)	1,1122	0,6775	0,267	955(-4)	221(-4)	106(-5)	274(-7)								
5(-2)	0,5812	0,2923	755(-4)	160(-4)	164(-5)	126(-7)									
1(-1)	0,397	0,1789	359(-4)	552(-5)	340(-6)										
5(-1)	0,1006	325(-4)	288(-5)	151(-6)	171(-8)										
1(0)	365(-4)	993(-5)	547(-6)	151(-7)											
5(0)	167(-6)	309(-7)													
10(0)															

\* Cyfry w nawiasach są potęgami liczby 10, przez które należy pomnożyć stojące przy nich liczby, np. (-4) = 0,0488

Dodatek 3. Wartości funkcji  $e^x$ ,  $e^{-x}$ ,  $K_0(x)$  i  $e^{-x}K_0(x)$ . Według Hantusha (1956)

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$K_0(x)$	$e^{-x}K_0(x)$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$K_0(x)$	$e^{-x}K_0(x)$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$K_0(x)$	$e^{-x}K_0(x)$
0,010	1,010	0,990	4,721	4,769	0,070	1,072	0,932	2,780	2,981	0,40	1,492	0,670	1,114	1,663
0,011	1,011	0,989	4,626	4,677	0,071	1,074	0,931	2,766	2,969	0,41	1,507	0,664	1,093	1,647
0,012	1,012	0,988	4,539	4,594	0,072	1,075	0,930	2,752	2,957	0,42	1,522	0,657	1,072	1,632
0,013	1,013	0,987	4,459	4,517	0,073	1,076	0,930	2,738	2,945	0,43	1,537	0,650	1,052	1,617
0,014	1,014	0,986	4,385	4,447	0,074	1,077	0,929	2,725	2,934	0,44	1,553	0,644	1,032	1,602
0,015	1,015	0,985	4,316	4,381	0,075	1,078	0,928	2,711	2,923	0,45	1,568	0,638	1,013	1,589
0,016	1,016	0,984	4,251	4,320	0,076	1,079	0,927	2,698	2,911	0,46	1,584	0,631	0,994	1,575
0,017	1,017	0,983	4,191	4,263	0,077	1,080	0,926	2,685	2,900	0,47	1,600	0,625	0,976	1,562
0,018	1,018	0,982	4,134	4,209	0,078	1,081	0,925	2,673	2,889	0,48	1,616	0,619	0,958	1,549
0,019	1,019	0,981	4,080	4,158	0,079	1,082	0,924	2,660	2,879	0,49	1,632	0,613	0,941	1,536
0,020	1,020	0,980	4,028	4,110	0,080	1,083	0,923	2,647	2,868	0,50	1,649	0,606	0,924	1,524
0,021	1,021	0,979	3,980	4,064	0,081	1,084	0,922	2,635	2,857	0,51	1,665	0,600	0,908	1,515
0,022	1,022	0,978	3,933	4,021	0,082	1,085	0,921	2,623	2,847	0,52	1,682	0,594	0,892	1,501
0,023	1,023	0,977	3,889	3,979	0,083	1,086	0,920	2,611	2,837	0,53	1,699	0,589	0,877	1,489
0,024	1,024	0,976	3,846	3,940	0,084	1,088	0,919	2,599	2,827	0,54	1,716	0,583	0,861	1,478
0,025	1,025	0,975	3,806	3,902	0,085	1,089	0,918	2,587	2,817	0,55	1,733	0,577	0,847	1,467
0,026	1,026	0,974	3,766	3,866	0,086	1,090	0,918	2,576	2,807	0,56	1,751	0,571	0,832	1,457
0,027	1,027	0,973	3,729	3,831	0,087	1,091	0,917	2,564	2,798	0,57	1,768	0,565	0,818	1,446
0,028	1,028	0,972	3,692	3,797	0,088	1,092	0,916	2,553	2,788	0,58	1,786	0,560	0,804	1,436
0,029	1,029	0,971	3,657	3,765	0,089	1,093	0,915	2,542	2,779	0,59	1,804	0,554	0,791	1,426
0,030	1,030	0,970	3,623	3,734	0,090	1,094	0,914	2,531	2,769	0,60	1,822	0,549	0,777	1,417
0,031	1,031	0,969	3,591	3,704	0,091	1,095	0,913	2,520	2,760	0,61	1,840	0,543	0,765	1,407
0,032	1,032	0,968	3,559	3,675	0,092	1,096	0,912	2,509	2,751	0,62	1,859	0,538	0,752	1,398
0,033	1,034	0,967	3,528	3,647	0,093	1,097	0,911	2,499	2,742	0,63	1,878	0,533	0,740	1,389

$x$	$e^x$	$e^x K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$x$	$e^x$	$e^x K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$x$	$e^x$	$e^x K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$x$	$e^x$	$e^x K_0(x)$	$e^x K_0(x)$				
0,034	1,035	0,967	3,499	3,620	0,094	1,099	0,910	2,488	2,733	0,64	1,896	0,527	0,728	1,380	3,4	2,996(1)	3,34(-2)	2,20(-2)	0,658
0,035	1,036	0,966	3,470	3,593	0,095	1,100	0,909	2,478	2,725	0,65	1,915	0,522	0,716	1,371	3,5	3,312(1)	3,02(-2)	1,96(-2)	0,649
0,036	1,037	0,965	3,442	3,568	0,096	1,101	0,908	2,467	2,716	0,66	1,935	0,517	0,704	1,363	3,6	3,660(1)	2,73(-2)	1,75(-2)	0,640
0,037	1,038	0,964	3,414	3,543	0,097	1,102	0,908	2,457	2,707	0,67	1,954	0,512	0,693	1,354	3,7	4,045(1)	2,47(-2)	1,56(-2)	0,632
0,038	1,039	0,963	3,388	3,519	0,098	1,103	0,907	2,447	2,699	0,68	1,974	0,507	0,682	1,346	3,8	4,470(1)	2,24(-2)	1,40(-2)	0,624
0,039	1,040	0,962	3,362	3,495	0,099	1,104	0,906	2,437	2,691	0,69	1,994	0,502	0,671	1,338	3,9	4,940(1)	2,02(-2)	1,25(-2)	0,617
0,040	1,041	0,961	3,336	3,473	0,10	1,105	0,905	2,427	2,682	0,70	2,014	0,497	0,660	1,330	4,0	5,460(1)	1,83(-2)	1,12(-2)	0,609
0,041	1,042	0,960	3,312	3,450	0,11	1,116	0,896	2,333	2,605	0,71	2,034	0,492	0,650	1,322	4,1	6,034(1)	1,00(-2)	1,00(-2)	0,602
0,042	1,043	0,959	3,288	3,429	0,12	1,127	0,887	2,248	2,534	0,72	2,054	0,487	0,640	1,315	4,2	6,669(1)		8,9(-3)	0,595
0,043	1,044	0,958	3,264	3,408	0,13	1,139	0,878	1,169	2,471	0,73	2,075	0,482	0,630	1,307	4,3	7,370(1)		8,0(-3)	0,589
0,044	1,045	0,957	3,241	3,387	0,14	1,150	0,869	2,097	2,412	0,74	2,096	0,477	0,620	1,300	4,4	8,145(1)		7,1(-3)	0,582
0,045	1,046	0,956	3,219	3,367	0,15	1,162	0,861	2,030	2,358	0,75	2,117	0,472	0,611	1,293	4,5	9,002(1)		6,4(-3)	0,576
0,046	1,047	0,955	3,197	3,348	0,16	1,173	0,852	1,967	2,309	0,76	2,138	0,468	0,601	1,285	4,6	9,948(1)		5,7(-3)	0,570
0,047	1,048	0,954	3,176	3,329	0,17	1,185	0,844	1,909	2,262	0,77	2,160	0,463	0,592	1,278	4,7	1,099(2)		5,1(-3)	0,564
0,048	1,049	0,953	3,155	3,310	0,18	1,197	0,835	1,854	2,210	0,78	2,181	0,458	0,583	1,272	4,8	1,215(2)		4,6(-3)	0,559
0,049	1,050	0,952	3,134	3,292	0,19	1,209	0,827	1,802	2,179	0,79	2,203	0,454	0,574	1,265	4,9	1,343(2)		4,1(-3)	0,553
0,050	1,051	0,951	3,114	3,274	0,20	1,221	0,819	1,753	2,141	0,80	2,225	0,449	0,565	1,258	5,0	1,484(2)		3,7(-3)	0,548
0,051	1,052	0,950	3,094	3,256	0,21	1,234	0,811	1,706	2,105	0,81	2,248	0,445	0,557	1,252					
0,052	1,053	0,949	3,075	3,239	0,22	1,246	0,802	1,662	2,071	0,82	2,270	0,440	0,548	1,245					
0,053	1,054	0,948	3,056	3,223	0,23	1,259	0,794	1,620	2,039	0,83	2,293	0,436	0,540	1,239					
0,054	1,055	0,947	3,038	3,206	0,24	1,271	0,787	1,580	2,008	0,64	2,316	0,432	0,532	1,233					
0,055	1,056	0,946	3,019	3,190	0,25	1,284	0,779	1,541	1,979	0,85	2,340	0,427	0,524	1,226					
0,056	1,058	0,945	3,001	3,174	0,26	1,297	0,771	1,505	1,952	0,86	2,363	0,423	0,516	1,220					
0,057	1,059	0,945	2,984	3,159	0,27	1,310	0,763	1,470	1,925	0,87	2,387	0,419	0,509	1,214					
0,058	1,060	0,944	2,967	3,144	0,28	1,323	0,756	1,436	1,900	0,88	2,411	0,415	0,501	1,209					
0,059	1,061	0,943	2,950	3,129	0,29	1,336	0,748	1,404	1,876	0,89	2,435	0,411	0,494	1,203					

$x$	$e^{-x}$	$e^x$	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$x$	$e^{-x}$	$e^x$	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$x$	$e^{-x}$	$e^x$	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$
0,060	1,062	0,942	2,933	3,114	0,30	1,350	0,741	1,372	1,853	0,90	2,460	0,407	0,487	1,197
0,061	1,063	0,941	2,916	3,100	0,31	1,363	0,733	1,342	1,830	0,91	2,484	0,402	0,480	1,192
0,062	1,064	0,940	2,900	3,086	0,32	1,377	0,726	1,314	1,809	0,92	2,509	0,398	0,473	1,186
0,063	1,065	0,939	2,884	3,072	0,33	1,391	0,719	1,286	1,788	0,93	2,534	0,395	0,466	1,181
0,064	1,066	0,938	2,869	3,058	0,34	1,405	0,712	1,259	1,768	0,94	2,560	0,391	0,459	1,175
0,065	1,067	0,937	2,853	3,045	0,35	1,419	0,705	1,233	1,749	0,95	2,586	0,387	0,452	1,170
0,066	1,068	0,936	2,838	3,032	0,36	1,433	0,698	1,201	1,731	0,96	2,612	0,383	0,446	1,165
0,067	1,069	0,935	2,823	3,019	0,37	1,448	0,691	1,183	1,713	0,97	2,638	0,379	0,440	1,159
0,068	1,070	0,934	2,809	3,006	0,38	1,462	0,684	1,160	1,696	0,98	2,664	0,375	0,433	1,154
0,069	1,071	0,933	2,794	2,994	0,39	1,477	0,677	1,137	1,679	0,99	2,691	0,372	0,427	1,149



Dodatek 4. Wartości funkcji  $W(u_n, r/B_1)$  i  $W(u_n, r/B_1)$  według Boultona (1963)

$r/B_1 = 0,01$		$r/B_1 = 0,1$		$r/B_1 = 0,2$		$r/B_1 = 0,316$		$r/B_1 = 0,4$		$r/B_1 = 0,6$	
$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$
1(1)	1,82	1(1)	1,8	5(0)	1,19	1(0)	2,16(-1)	1(0)	2,13(-1)	1(0)	2,06(-1)
1(2)	4,04	5(1)	3,24	1(1)	1,75	2(0)	5,44(-1)	2(0)	5,34(-1)	2(0)	5,04(-1)
1(3)	6,31	1(2)	3,81	5(1)	2,95	5(0)	1,15	5(0)	1,11	5(0)	9,96(-1)
5(3)	7,82	2(2)	4,3	1(2)	3,29	1(1)	1,65	1(1)	1,56	1(1)	1,31
1(4)	8,40	5(2)	4,71	5(2)	3,50	5(1)	2,50	5(1)	2,18	2(1)	1,49
1(5)	9,42	1(3)	4,83	1(3)	3,51	1(2)	2,62	1(2)	2,22	5(1)	1,55
1(6)	9,44	1(4)	4,85			1(3)	2,65				
$r/B_1 = 0,8$		$r/B_1 = 1,0$		$r/B_1 = 1,5$		$r/B_1 = 2,0$		$r/B_1 = 2,5$		$r/B_1 = 3,0$	
$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$
5(-1)	4,60(-2)	5(-1)	4,44(-2)	5(-1)	3,94(-2)	3,33(-1)	1,00(-2)	5(-1)	2,71(-2)	5(-1)	2,10(-2)
1	1,97(-1)	1(0)	1,85(-1)	1(0)	1,51(-1)	5(-1)	3,35(-2)	1(0)	8,03(-2)	1(0)	5,34(-2)
2	4,66(-1)	2(0)	4,21(-1)	1,25(0)	1,99(-1)	1(0)	1,14(-1)	1,25(0)	9,61(-2)	1,25(0)	6,07(-2)
5	8,57(-1)	5(0)	7,15(-1)	2	3,01(-1)	1,25(0)	1,44(-1)	2(0)	1,17(-1)	2(0)	6,81(-2)
1(1)	1,05	1(1)	8,19(-1)	5	4,13(-1)	2(0)	1,94(-1)	5(0)	1,25(-1)	5(0)	6,95(-2)
2(1)	1,12	2(1)	8,41(-1)	1(1)	4,27(-1)	5(0)	2,27(-1)	1(1)	1,25(-1)	1(1)	6,95(-2)
				2(1)	4,19(-1)	1(1)	2,28(-1)				
$r/B_1 = 0,01$		$r/B_1 = 0,1$		$r/B_1 = 0,2$		$r/B_1 = 0,316$		$r/B_1 = 0,4$		$r/B_1 = 0,6$	
$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$	$1/u_n$	$W(u_n, r/B_1)$
4(2)	9,45	4(0)	4,86	4(-1)	3,51	4(-1)	2,66	1(-1)	2,23	4,44(-1)	1,59
4(3)	9,54	4(1)	4,95	4(0)	3,54	4(0)	2,74	1(0)	2,26	2,22(0)	1,71
4(4)	1,02(1)	4(2)	5,64	2(1)	3,69	4(1)	3,38	5(0)	2,4	4,44(0)	1,84
4(5)	1,23(1)	4(3)	7,72	4(1)	3,85	4(2)	5,42	1(1)	2,55	1,67(1)	2,45
4(6)	1,46(1)	4(4)	1,00(1)	1,5(2)	4,55	4(3)	7,72	3,75(1)	3,2	4,44(1)	3,26
				4(2)	5,42			1(2)	4,05		







## NOMOGRAMY



$$E\left(z, \frac{r}{B}\right) = \frac{1}{4\Pi} W\left(u, \frac{r}{B}\right)$$

