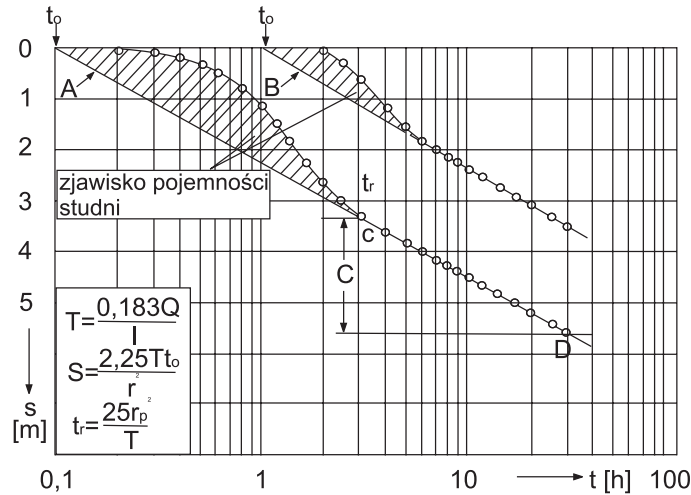


7. ZASADY INTERPRETACJI WYNIKÓW POMPOWAŃ PROWADZONYCH W POJEDYNCZYCH OTWORACH

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 m²/h i 5 m²/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 ΔH_p rozłożyć można na dwie składowe:

$$\Delta H_p = BQ + CQ^2,$$

gdzie:

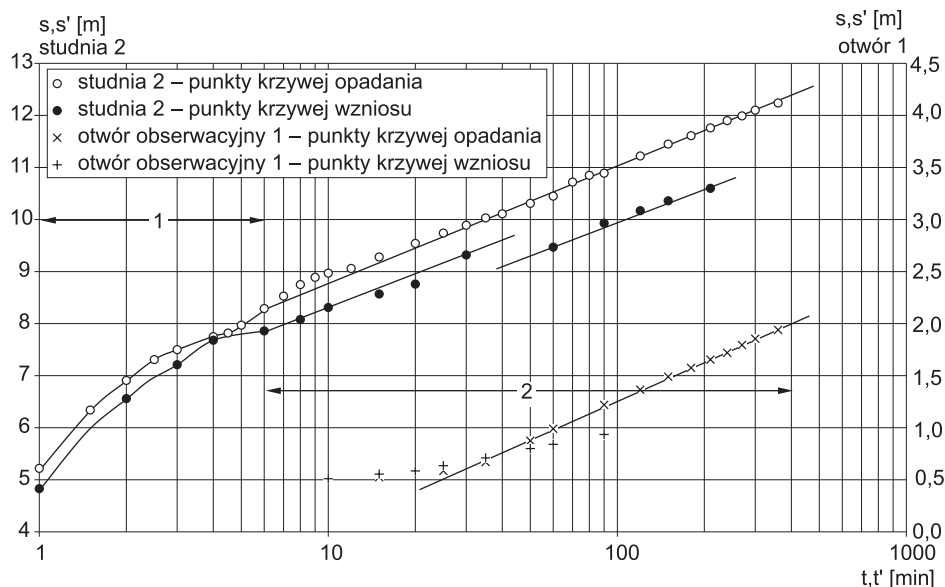
BQ – liniowe straty ciśnienia (kolmatacja filtra i strefy przyfiltrowej),

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 ΔH_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 μ_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 μ_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:

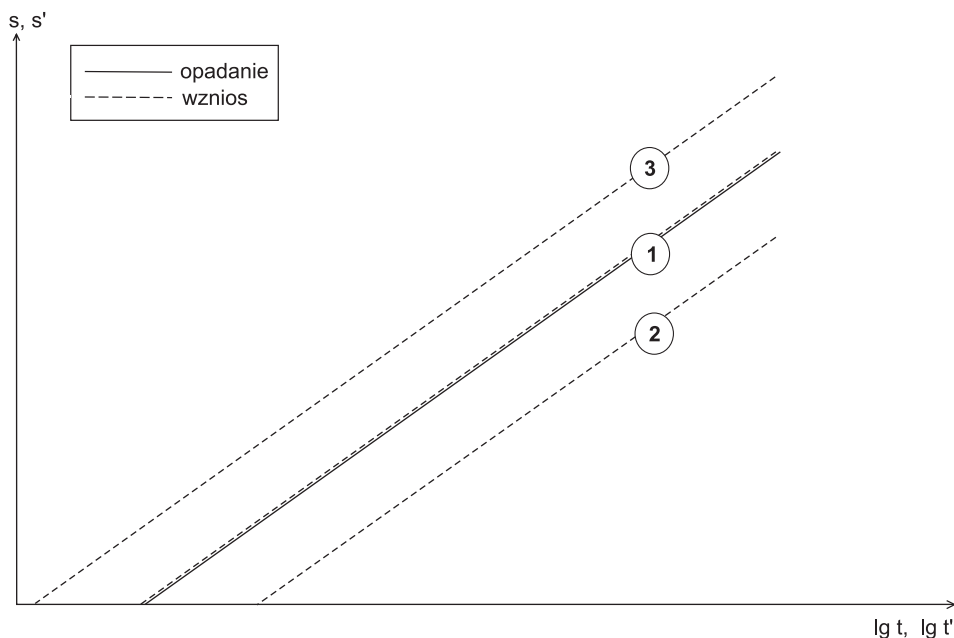
- uwidacznianie się krótkotrwałych zmian w wydatku pompowania i przerw w jego prowadzeniu, jak również mniejsza dokładność pomiarowa tych zmian,
- większe zmiany w strumieniu wokół studni na skutek wytworzenia większego zdepresjonowania,
- zmiany kierunków przepływu wody, istotnych zwłaszcza przy strumieniach 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 μ , i odsączalności μ , 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 $Q = 110 \text{ m}^3/\text{h}$ = const w dniach 25–29.02.1972

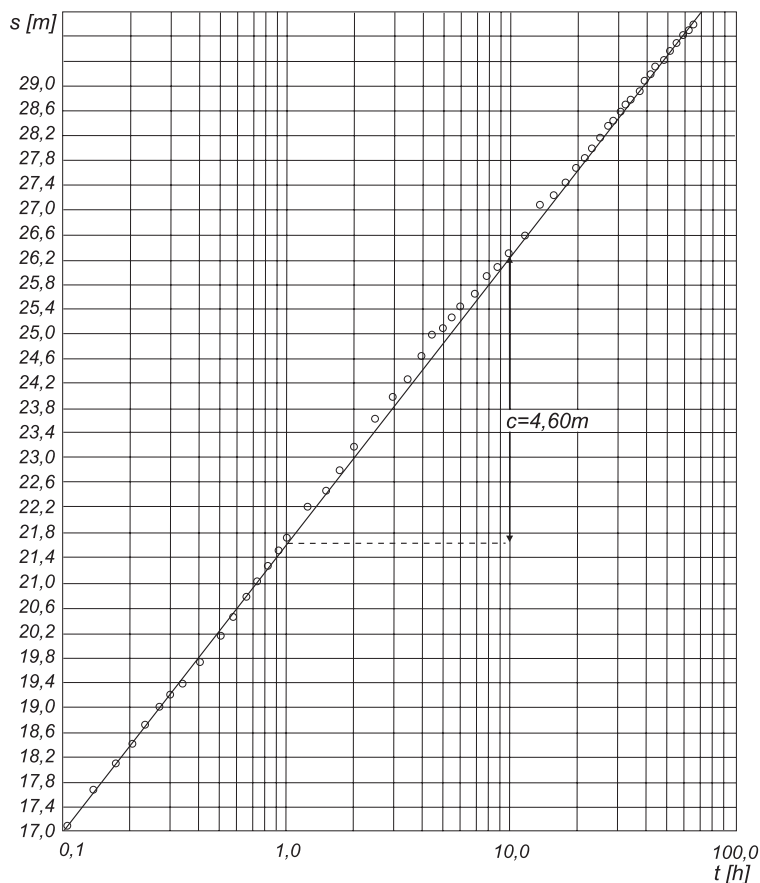
t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]	t [h]	s [m]
0,10	17,07	0,75	20,99	4,5	24,99	22	27,87	46	29,34
0,13	17,66	0,83	21,23	5,0	25,10	24	28,05	48	29,39
0,17	18,10	0,92	21,46	5,5	25,26	26	28,19	50	29,46
0,20	18,39	1,00	21,69	6,0	25,44	28	28,35	52	29,54
0,23	18,71	1,25	22,21	7,0	25,65	30	28,45	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 $Q = 110$ m³/h obliczone parametry warstwy wynoszą:

– przewodność
$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183 \cdot 110,0}{4,60} = 4,38 \text{ m}^2/\text{h},$$

– współczynnik filtracji
$$k = \frac{T}{m} = \frac{4,38}{46,0} = 0,095 \text{ m/h}.$$



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:

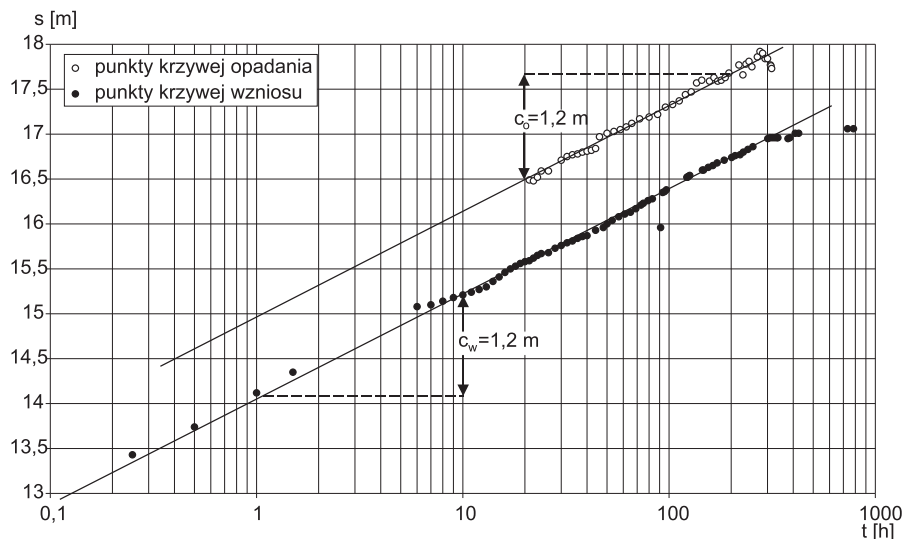
$Q = 253 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$, $c = 1,20 \text{ m}$ (opadanie i wznios), $m = 22,0 \text{ m}$.

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–Wilkowyi

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.

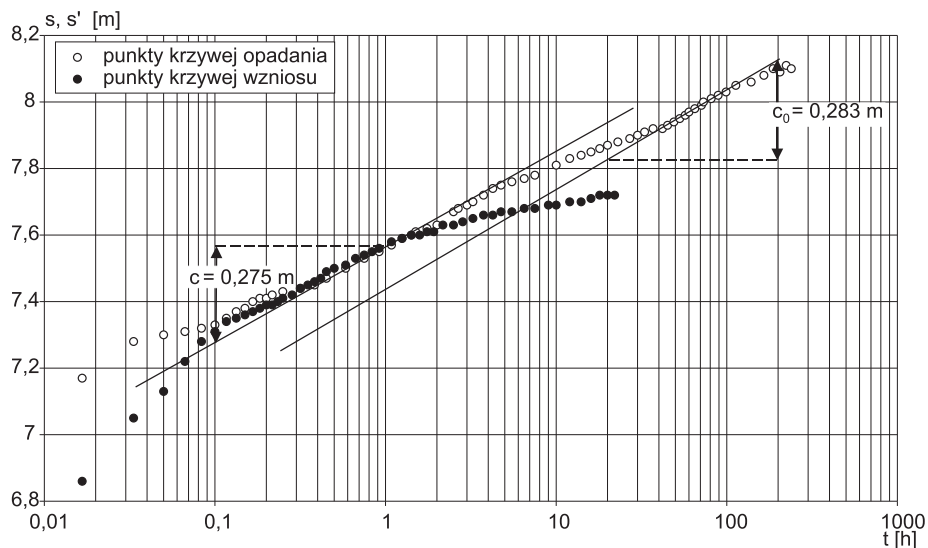
Krzywe opadania i wzniosu zachowują generalnie podobny charakter, przy czym krzywa wzniosu układa się poniżej krzywej opadania, co jest charakterystyczne dla warstwy niezupełnie swobodnej. Krzywe te wykazują 3 charakterystyczne odcinki, których interpretację przedstawiono w rozdziale 7.2.1. Z tej obserwacji 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 plejstocénskiego 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: $c_w = 0,58 \text{ m}$

$$T_w = \frac{0,183 \cdot 61,8}{0,58} = 19,5 \text{ m}^2/\text{h},$$

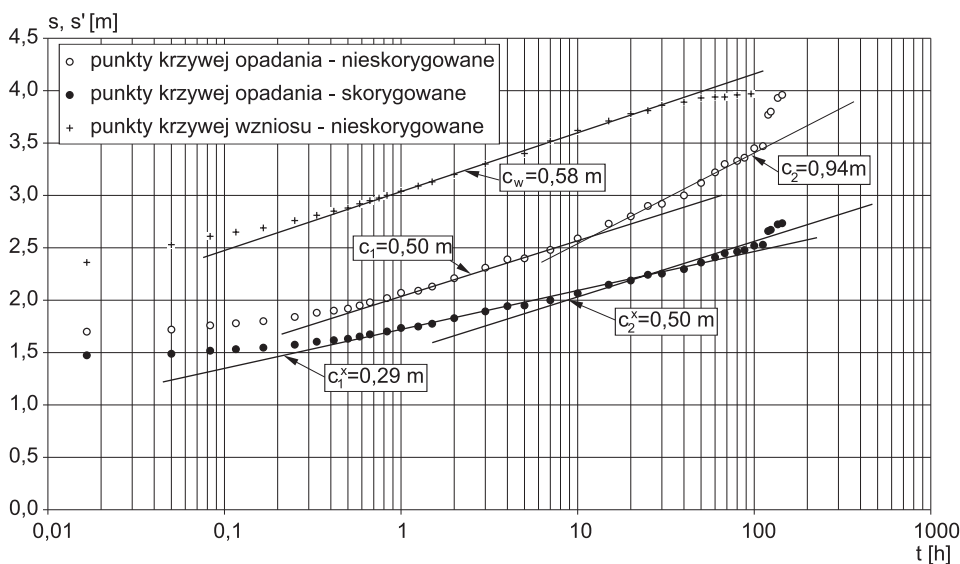
$$k_w = \frac{T_w}{H} = \frac{19,5}{6,3} = 3,1 \text{ m/h.}$$

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		

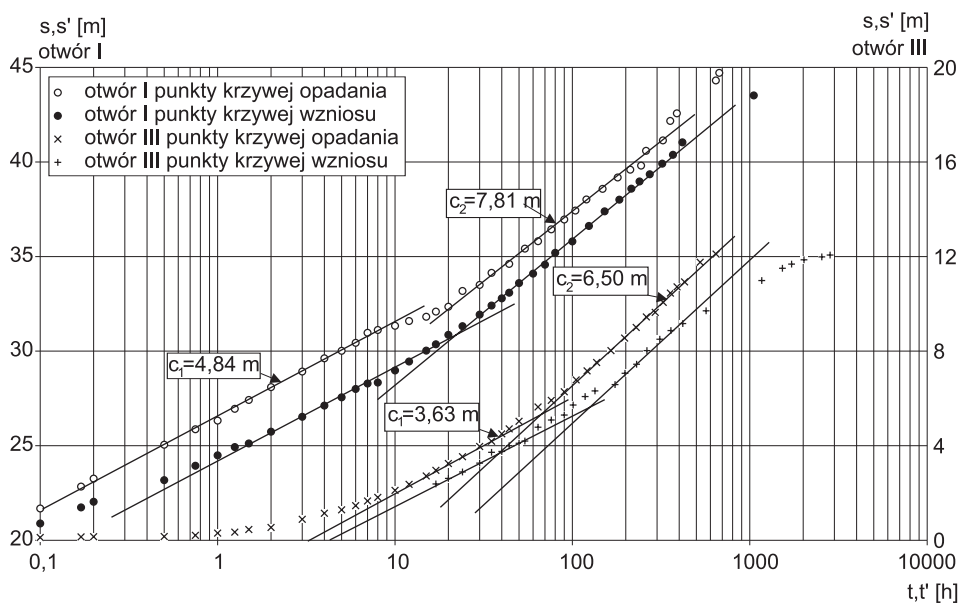
Rys. 7.8. Wykresy $s = f(lgt)$ i $s' = f(lgt')$ dla otworu pompowanego nr I i obserwacyjnego nr III znajdującego się w odległości 650 m przy $Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$, Wieluń – warstwa piaskowców kościeliskich

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:

$$\text{Otwór III: } R_t = 1,5\sqrt{47124 \cdot 45} = 2184 \text{ m}$$

$$\text{Otwór I: } R_t = 1,5\sqrt{47124 \cdot 20} = 1456 \text{ m}$$

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. $\approx 2100 \text{ m}$.