

Andrzej RÓŹKOWSKI

## Badania przepływu wód metodą pomiarów ciśnień potencjalnych

Celem pracy było scharakteryzowanie przepływu wód w szczelinowych utworach Jury Krakowsko-Częstochowskiej w oparciu o pomiary ciśnień potencjalnych wód. Autor posłużył się nie stosowaną dotychczas w kraju metodą przedstawiania przepływu wód, dlatego też podał podstawy teoretyczne tej metody. Pomiary ciśnień potencjalnych przeprowadzone zostały przede wszystkim w otworach wiertniczych. Obszar, zakres i dokładność prowadzonych przez autora pomiarów uwarunkowane były lokalizacją, ilością i sposobem wiercenia otworów wykonywanych w związku z rozpoznawaniem geologicznym terenu. Na przyszłość projektuje się kontynuację badań krążenia wód w utworach jurajskich w oparciu o metody modelowania analogowego i prześledzenie zmian chemizmu wód w systemie przepływu.

### CHARAKTERYSTYKA BADANEGO TERENU

#### HYDROGRAFIA I MORFOLOGIA

Badany teren, stanowiący niewielki fragment Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej, obejmuje obszar zlewni rzeki R, częściowo rzeki P (fig. 1). Odwadniany on jest przez potoki o przebiegu południkowym, mające swe ujścia w rzece R. Skrajnie północną część obszaru drenażu potok będący dopływem rzeki P (fig. 1).

Podstawę drenażu opisywanego obszaru stanowią: dolina rzeki R, położona na wysokości + 231 m oraz dolina rzeki P, charakteryzująca się rzędną terenu 300 m n.p.m. Wododział między tymi zlewniami przebiega w skrajnie północnej części terenu (fig. 1). Wszystkie wspomniane potoki, z wyjątkiem rzeki R, płyną w głęboko wciętych w wapienie jurajskie dolinach, biorąc swój początek ze źródeł szczelinowo-krasowych.

W krajobrazie obszaru obserwuje się występowanie dwu podstawowych jednostek fizjograficznych: 1 — wierzchowin zbudowanych z wapieni jurajskich, 2 — płaskiej formy dolinnej rowu tektonicznego, wypełnionego marglistymi i ilastymi osadami kredy i trzeciorzędu. Wierzchowiny przecięte dolinami pochylają się w kierunku południowym. Spadek

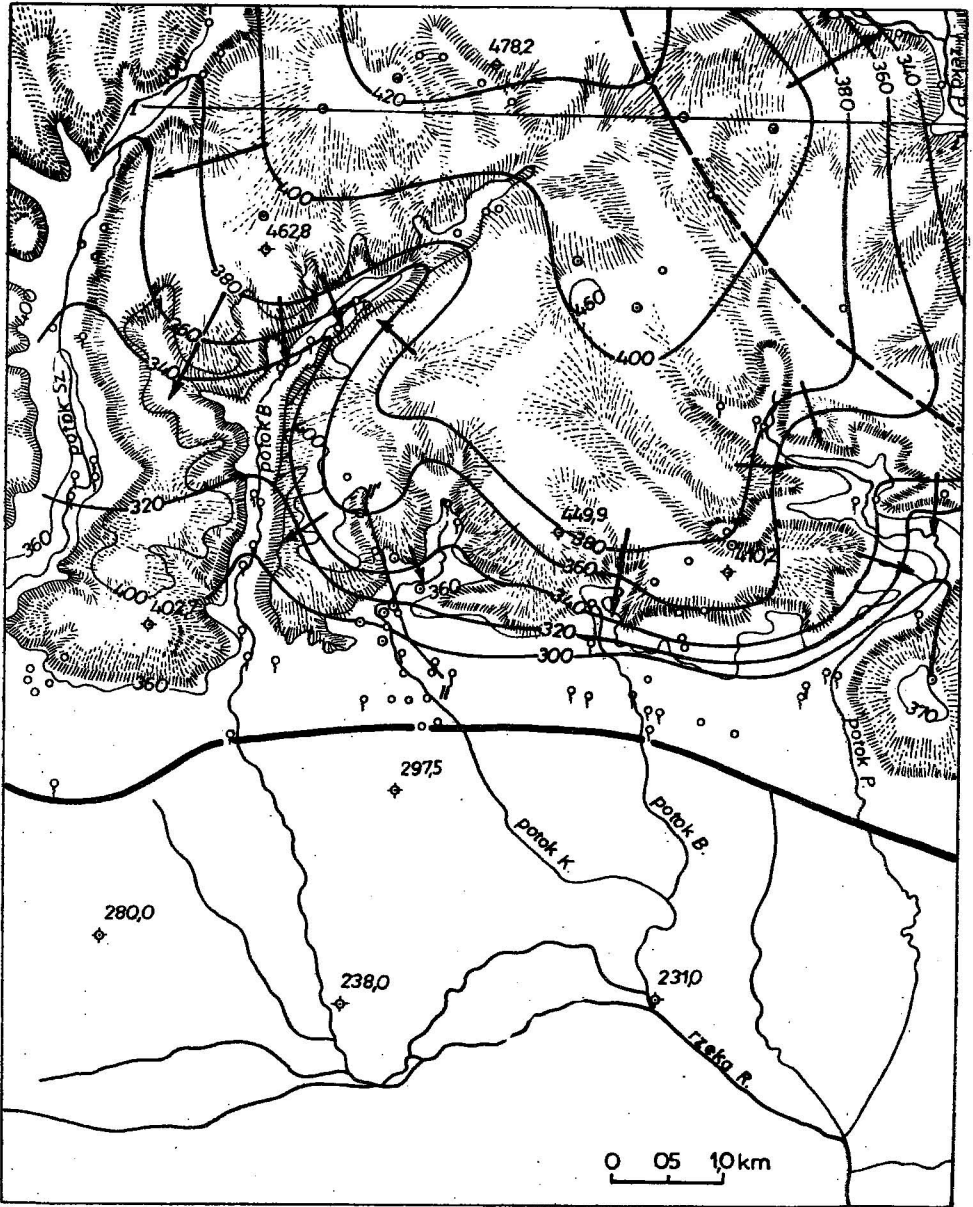


Fig. 1. Rzeźba terenu i ukształtowanie zwierciadła wód w utworach małmu  
Topography and water-table configuration

1 — warstwyce terenu; 2 — hydrotzohipsy; 3 — studnie gospodarskie; 4 — wiercenia studzienne i badawcze; 5 — źródła; 6 — wododział między zlewniami rzek P i R; 7 — podstawowy kierunek splywu wód podziemnych; 8 — granica zasięgu utworów jurajskich; 9 — linie przekrojów

1 — surface contours; 2 — groundwater contours; 3 — fanmer wells, 4 — drilled water wells and test holes; 5 — springs; 6 — surface divide between the drainage basin of the P. and R. rivers; 7 — main direction of flow; 8 — extent of Jurassic deposits; 9 — cross section lines

terenu wynosi przeciętnie 4,5‰, różnice wysokości są rzędu 160 m. Wysokości kulminacji położonych w północnej części obszaru wahają się od + 448 do + 502 m. Doliny wcięte w wierzchowiny na głębokość 50 do 110 metrów mają skaliste, strome zbocza. Są one rozgałęzione i szerokie przy ujściach. Rozgałęzienia mają charakter suchych wąwozów prowadzących wodę okresowo. Dna dolin wypełnione są stożkami usypiskowymi.

Charakterystyczne dla opisywanego obszaru są zjawiska krasowe, zarówno powierzchniowe, jak i podziemne, typowe dla utworów wapiennych jury Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Formy tych zjawisk oraz ich geneza są opisane w pracy R. Gradzińskiego (1962). Szereg spostrzeżeń na ten temat zawierają również prace S. W. Alexandrowicza i Z. Wilka (1962), S. Bukowego (1956), M. Klimaszewskiego (1958) i in. Prowadzone przez autora obserwacje rdzeni oraz ucieczek płuczki w czasie wiercenia wskazują na ograniczony co do głębokości zasięg wspomnianych zjawisk w utworach węglanowych jury.

#### GEOLOGIA

Utwory jurajskie okolic Krakowa opisane zostały m.in. w pracach: S. Z. Różyckiego (1953), S. Dzużyńskiego (1952), S. Bukowego (1957), R. Gradzińskiego (1962), A. Siewniak (1967). W rozpatrywanym obszarze, zgodnie z badaniami J. Ślósarza (informacja ustna), są one reprezentowane przez osady liasu, doggeru i malmu.

Utwory liasu występują w formie nieregularnych soczew wypełniających nierówności paleozoicznego podłoża. Są one wykształcone w postaci ilów, gliniek, piasków, zlepieńców, margli oraz lokalnie wkładek węgla. Miąższości tych utworów wahają się od kilku do kilkudziesięciu metrów.

Utwory doggeru wykształcone są w postaci piasków i piaskowców wapnistych o miąższościach nie przekraczających zazwyczaj kilku metrów. Lokalnie obserwuje się wyklinowanie tych warstw.

Osady górnej jury (malmu) reprezentowane są przez gruby kompleks wapieni podścielonych cienką warstwą marglisto-mułowcowo-wapnistą nevizu (A. Siewniak, 1967). Miąższość tej ostatniej warstwy dochodzi maksymalnie do kilku metrów. Całkowita miąższość utworów malmu w opisywanym obszarze waha się od kilkudziesięciu do stukilkudziesięciu metrów. Węglanowe utwory malmu wykształcone są w facji wapieni skalistych i płytowych. Pierwsze ze wspomnianych dominują w badanym terenie. Według R. Gradzińskiego (1962) wapienie tego typu cechuje brak uławicenia lub uławicenie grube i niewyraźne. Posiadają one niewielką porowatość (około 1‰) i są prawie nieprzepuszczalne. Spękania ciosowe są wyraźne, lecz rzadko rozmieszczone. Wapienie płytowe są przez cytowanego wyżej autora określone jako skały dobrze uławicone o porowatości 7—9‰. Wykazują liczne spękania ciosowe oraz zawierają niewielki procent substancji ilastej.

Utwory jurajskie podścielone są utworami paleozoicznymi budującymi warwscyjską antyklinę Krakowa (S. Bukowy, 1964). Wiercenia prowadzone w latach 1960—1968 przez Oddział Górnośląski IG stwierdziły występowanie w bezpośrednim podłożu osadów jurajskich utworów: permu, karbonu, dewonu i syluru (J. Ślósarz, informacja ustna).

Utwory górnej jury przykryte są w południowej części obszaru marglistymi osadami kredy górnej oraz ilami trzeciorzędowymi, w centralnej i północnej części wyjątkowo cienką warstwą glin.

Utwory mezozoiczne pocięte są licznymi uskokami (K. Bogacz, 1959, S. Dzużyński, 1953), które doprowadziły do podziału pokrywy mezozoicznej na szereg zrębów i rowów. Uskoki posiadają kierunek głównie równoleżnikowy.

#### HYDROGEOLOGIA

W profilu hydrogeologicznym opisywanego obszaru występują 4 podstawowe piętra wodonośne: 1 — czwartorzędowe, 2 — kredowe, 3 — jurajskie, 4 — związane z różnowiekowymi utworami paleozoicznymi.

Czwartorzędowy poziom wodonośny związany z tarasami potoków i rzek obserwuje się w dolinach. Znajduje się on na ogół w związkach hydraulicznych z jurajskim piętrem wodonośnym. Lokalnie obserwuje się (na wierzchołkach) występowanie niewielkich zawodnionych soczew piasków, podścielonych glinami.

Margliste utwory kredy są słabo zawodnione, często praktycznie bezwodne. Występują w nich wody krążące systemem mikroszczelin. Podwyższoną nieco wodonośność obserwuje się w zasięgu strefy zwietrzenia. W spągu utworów kredowych występują ilaste margle glaukonitowe, stanowiące dobrą izolację opisywanego poziomu. Lokalnie, jak to wykazały prowadzone wiercenia, spągowe ogniwa kredy mogą być reprezentowane przez żwiry santonu, silnie wodonośne. Badania S. W. Alexandrowicza i Z. Wilka (1962) wykazały, że w okolicach Krakowa (generalnie biorąc) kredowe piętro wodonośne nie posiada związków hydraulicznych z poziomami wodonośnymi jury.

Jurajskie piętro wodonośne składa się z trzech podstawowych poziomów wodonośnych. Zasadniczą rolę w stosunkach wodnych rozpatrywanego obszaru odgrywa poziom wodonośny występujący w utworach węglanowych malmu. Występują tu wody szczelinowo-krasowe o swobodnym lub słabo napiętym zwierciadle. Współczynniki filtracji uzyskane z próbnych pompowań wahają się od  $1,4 \times 10^{-4}$  do  $1,28 \times 10^{-5}$  m/sek. Poza opisywanym terenem stwierdzono możliwość występowania wyższych wartości współczynników filtracji. Maksymalną wodonośność obserwuje się w górnej części profilu malmu, gdzie stopień skrasowania skał i ich spękania jest największy. Wodonośność wzrasta również w strefach dyslokacji wyznaczających często obecny przebieg dolin. Badania E. Goc (1968) oraz S. W. Alexandrowicza i Z. Wilka (1962) prowadzone w analogicznych warunkach w zlewni Prądnika wykazały, że „...szczeliny i kanały krasowe tworzą jednolity system, a wody w nich krążące są w ścisłym ze sobą związku hydraulicznym, tworząc normalne zwierciadło obniżające się jednostajnie w kierunku wypływu na powierzchnię”. Odpływ podziemny reguluje sieć rzeczna, w związku z czym w dolinach potoków i rzek obserwuje się występowanie źródeł. Brak stropowej warstwy izolującej oraz znaczna przepuszczalność utworów malmu powodują wzmożoną infiltrację wód atmosferycznych oraz redukcję spływu powierzchniowego. Badania E. Goc (1968) wykazały, że czynna infiltracja stanowi 15,4% opadów atmosferycznych w zlewni Prądnika.



Drugi z kolei poziom piętra wodonośnego jury, odizolowany od górnego marglistymi osadami newizu (X. Derdzińska, E. Goc, 1964), związany jest z piaszczystymi utworami doggeru. Charakteryzuje się on dużym zróżnicowaniem miąższości. Jest to poziom szczelinowo-warstwowy, którego współczynniki filtracji wahają się w granicach od  $7,4 \times 10^{-4}$  do  $4,6 \times 10^{-5}$  m/sek. Występują w nim wody pod ciśnieniem. Poziom wodonośny doggeru podścielony jest ilastymi osadami liasu lub też leży bezpośrednio na starszym paleozoicznym podłożu. W ostatnim przypadku, jak to wykazały badania autora, poziom wodonośny doggeru znajduje się w związku hydraulicznym z wodami utworów paleozoicznych.

Trzeci poziom wodonośny występuje w piaskach, żwirach i zlepieńcach liasu. Jest to poziom o znaczeniu lokalnym. Charakteryzuje się wodami o zwierciadle napiętym.

Wodonośność utworów paleozoicznych jest wyraźnie zróżnicowana w zależności od wykształcenia litologicznego i stopnia ich tektonicznego zaangażowania. Wody występujące w tych utworach znajdują się pod ciśnieniem, którego wielkość warunkowana jest ułożeniem i przykryciem poziomów wodonośnych. Współczynniki filtracji określone próbnymi pompowaniami kształtują się w granicach od  $1,28 \times 10^{-5}$  do  $7,8 \times 10^{-8}$  m/sek.

Utwory permio-stefańskie, reprezentowane przez porowate piaskowce, są dość silnie wodonośne. Poziom wodonośny występujący w utworach dolnego karbonu i dewonu związany jest z systemem spękań i szczelin oraz pustek w skałach węglanowych. Badania hydrogeologiczne wykazały podwyższoną przepuszczalność tych utworów w stropowych ogniwach, gdzie stopień zeszczelinowania często wyraźnie wzrasta. Wodonośność utworów syluru, badana w jednym tylko otworze, związana jest z piaskowcami.

## PODSTAWY TEORETYCZNE BADAŃ POLA CIŚNIEŃ ZLEWNI PODZIEMNEJ

### CIŚNIENIA CAŁKOWITE I ICH ZRÓŻNICOWANIE W POLU HYDRODYNAMICZNYM

Przez pole hydrodynamiczne badanych utworów jurajskich należy rozumieć trójwymiarową przestrzeń obejmującą strefę saturacji tychże utworów. Badania pola hydrodynamicznego przy zastosowaniu metody zespołów piezometrów opierają się na interpretacji zróżnicowania ciśnień potencjalnych w profilu badanych utworów. Pojęcie potencjału definiuje M. K. Hubbert (1953) jako „...ilość pracy, która jest wymagana do przetransportowania jednostki masy płynu z umownie obranego punktu położenia przy określonych warunkach do rozważanego punktu położenia i odpowiadających mu warunków”. Na całkowitą pracę wykonywaną w czasie transportu wody składa się praca pokonująca siłę ciężkości przy podnoszeniu płynu oraz praca pokonująca różnicę ciśnień występujących między wspomnianymi punktami.

Potencjał płynu w jakimkolwiek punkcie pola hydrodynamicznego wyrażony być może jako całkowite ciśnienie (P. Meyboom, 1966) przedstawione wzorem:

$$H = \frac{p}{\gamma} + z \quad (1)$$

gdzie:  $H$  — całkowite ciśnienie,  
 $p$  — ciśnienie słupa wody nad badanym punktem,  
 $\gamma$  — ciężar właściwy wody,  
 $z$  — wysokość położenia rozpatrywanego punktu.

Przedstawiony wzór (1) wykazuje, że potencjał płynu ( $H$ ) w rozważanym punkcie, czyli całkowite ciśnienie, jest sumą wysokości ciśnienia  $\frac{p}{\gamma}$  oraz ciśnienia położenia ( $z$ ) płynu (fig. 2). Wysokość ciśnienia określona jest wysokością słupa wody nad rozpatrywanym punktem ( $z$ ). Ciśnienie położenia wyrażone jest wysokością wzniesienia punktu ( $z$ ) nad dowolnym poziomem porównawczym. Ze względów praktycznych określa się je na ogół rzędną badanego punktu, przyjmując tym samym za poziom porównawczy poziom morza.

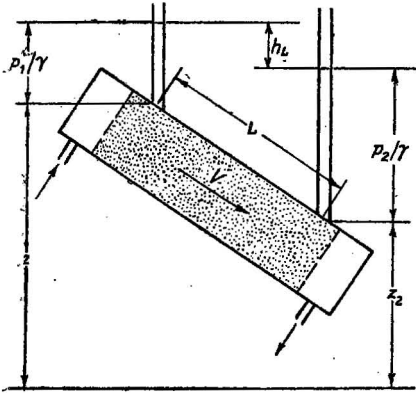


Fig. 2. Kształtowanie się ciśnień w czasie przepływu wód (wg D. K. Todda, 1966)

Pressure distribution and head loss in flow (after D. K. Todd, 1966)

$p_1$ - $p_2$  — hydrostatyczne ciśnienie;  $\gamma$  — ciężar właściwy wody;  $p_1/\gamma$  — wysokość ciśnienia;  $z_1$ ,  $z_2$  — ciśnienie położenia;  $v$  — prędkość przepływu;  $h_L$  — spadek ciśnień

$p_1$ - $p_2$  — hydrostatic pressure;  $\gamma$  — specific weight of water;  $p_1/\gamma$  — pressure head;  $z_1$ ,  $z_2$  — elevation head;  $v$  — velocity of flow;  $h_L$  — head loss

Uwzględniając sposób przedstawienia wartości opisywanych składowych równania ciśnienia całkowitego (1) można wysnuć praktyczny wniosek (P. Meyboom, 1966), że ustalone zwierciadło wody w piezometrach, wyrażone w metrach nad poziom morza, określa bezpośrednio punktową wartość potencjału wód podziemnych, kształtującą się na głębokości zglębienia piezometrów.

W trójwymiarowym polu hydrodynamicznym występuje zróżnicowanie ciśnień wskazujące (jak to ilustruje schematycznie fig. 3) na istniejący przepływ wód. Przepływ wód pociąga za sobą występowanie spadków ciśnień, które (uwzględniając fig. 2) mogą być wyrażone wzorem (D. K. Todd, 1966):

$$H_L = \left( \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) \quad (2)$$

Teoretyczne badania J. Tótha (1962) oraz R. A. Freeze'a i P. A. Witherspoona (1966), jak również terenowe badania P. Meybooma (1962, 1966) wykazały, że w obszarach zasilania, położonych zazwyczaj na kulminacjach terenu, na skutek oporów stawianych przez środowisko skalne infiltrującym wodom atmosferycznym, obserwuje się obniżenie ciśnień

wraz z głębokością. Linie ekwipotencjalne posiadają charakterystyczny półkolisty układ (fig. 3). Kierunek przepływu skierowany jest w dół. Stopień obniżania się wielkości ciśnień zaznacza się szczególnie ostro przy niskich wartościach współczynnika filtracji warstw (P. Meyboom, 1966).

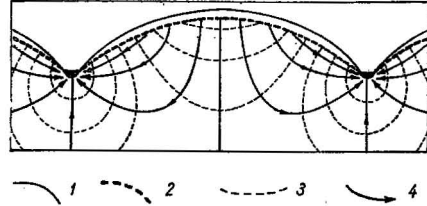
Obszary drenażu wykazują również półkolisty układ linii ciśnień. Wartości ciśnień obniżają się w kierunku ku powierzchni terenu wskazując na przepływ wód w tymże kierunku.

Fig. 3. Zróżnicowanie ciśnień i kierunków przepływu wód w polu hydrodynamicznym zlewni podziemnej (wg M. H. Hubberta, 1940)

Pattern of groundwater flow (after Hubbert, 1940)

1 — powierzchnia terenu; 2 — zwierciadło wody; 3 — linie równych ciśnień; 4 — linie przepływu wód

1 — ground surface; 2 — groundwater table; 3 — line of equal head; 4 — line of water flow



Część zlewni podziemnej, położona między obszarem zasilania i drenażu, charakteryzuje się występowaniem pionowego przebiegu linii równych ciśnień. Wspomniany przebieg linii ekwipotencjalnych wskazuje na poziomy układ torów przepływu, których kierunek regulują spadki ciśnień wzdłuż tych torów.

#### CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA ZRÓŻNICOWANIE CIŚNIEŃ W POLU HYDRODYNAMICZNYM

Badania M. K. Hubberta (1940) oraz R. A. Freeze'a i P. A. Witherspoona (1966, 1967) wykazały, że układ ciśnień w polu hydrodynamicznym zlewni podziemnej uzależniony jest głównie od zróżnicowania ukształtowania powierzchni terenu i przepuszczalności skał budujących zlewnie podziemne. Istotną rolę odgrywa również miąższość warstwy wodonośnej i stosunek tej miąższości do długości zlewni podziemnej.

Zgodnie z badaniami J. Tótha (1962), w przypadku, gdy teren jest zupełnie płaski, nie może rozwinąć się ani lokalny, ani też regionalny system przepływu. Drenaż terenu występuje na drodze parowania i transpiracji. Natomiast w przypadku, gdy lokalna rzeźba terenu jest rozwinięta nieznacznie, przy istnieniu jednakże pewnego generalnego nachylenia, obserwuje się występowanie tylko systemu regionalnego. Bogata rzeźba terenu powoduje występowanie rozwiniętego systemu lokalnego przepływu, którego głębokość zasięgu regulowana jest zróżnicowaniem wysokości terenu oraz miąższością warstwy wodonośnej. W przypadku mało urozmaiconej i nieznacznie nachylonej rzeźby powierzchni drenaż wód podziemnych ma miejsce nie tylko w dolinie rzeki, czy też lokalnej depresji, lecz również na terenach bezpośrednio przyległych.

Przecięcie przez tor strumienia wód podziemnych dwu różnych pod względem przepuszczalności warstw powoduje zmianę jego kierunku, przy czym w przypadku znacznie wyższej przepuszczalności warstw tor strumienia staje się równoległy do nieprzepuszczalnego podłoża. W przy-

padku znacznie niższej przepuszczalności jest zbliżony natomiast do prostopadłego.

Teoretyczne uzasadnienie tych podstawowych prawideł konstrukcji przekrojów hydrodynamicznych można znaleźć w pracach M. K. Hubberta (1940, 1953) oraz w podręczniku D. K. Todda (1966).

Według M. K. Hubberta (1940) tor strumienia przy przekraczaniu granicy między utworami różnej przepuszczalności ulega stycznym załamaniu, przy czym kierunek przepływu ulega zmianie. Zmiany kierunku przepływu mogą być teoretycznie rozpatrywane przy założeniu warunków ciągłości i nierozzerwalności ruchu wód w polu hydrodynamicznym i przedstawione w odniesieniu do dwu różnych pod względem przepuszczalności środowisk.

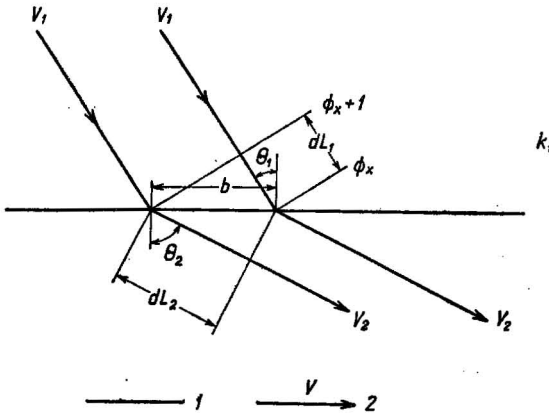


Fig. 4. Załamanie się linii przepływu wód na granicy środowisk o różnej przepuszczalności (wg D. K. Todda, 1966)

Refraction of water flow lines across the boundary between the media of different permeabilities (after D. K. Todd, 1966)

1 — granica dwóch różnych pod względem przepuszczalności środowisk  $k_1$  i  $k_2$ ; 2 — normalne prędkości przepływu

1 — boundary between the media of different permeabilities  $k_1$  and  $k_2$ ; 2 — normal velocities of flow

W warunkach ciągłości ruchu (D. K. Todd, 1966) składowe normalne przepływu w jednym i drugim środowisku (fig. 4) muszą być sobie równe. Stąd normalne wektora prędkości:

$$V_{n_1} = V_{n_2} \quad (3)$$

co daje po przekształceniu:

$$k_1 \frac{dh_1}{dL_1} \cos \theta_1 = k_2 \frac{dh_2}{dL_2} \cos \theta_2 \quad (4)$$

gdzie:  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  są kątami z prostopadłymi, a  $\frac{dh_1}{dL_1}$ ,  $\frac{dh_2}{dL_2}$  — gradientami hydraulicznymi.

W rozpatrywanych warunkach również odległość między dwoma przyległymi torami przepływu musi być ta sama z każdej strony linii granicznej. Matematycznie, w oparciu o figurę 4, odległość ta może być wyrażona:

$$b = \frac{dL_1}{\sin \theta_1} = \frac{dL_2}{\sin \theta_2} \quad (5)$$

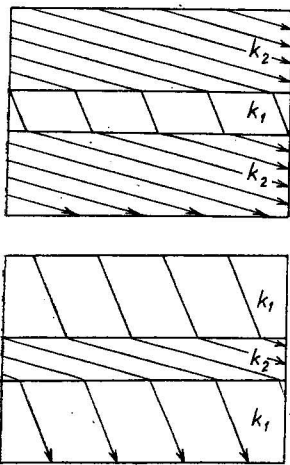
po przekształceniu:

$$dL_1 \sin \theta_2 = dL_2 \sin \theta_1 \quad (6)$$

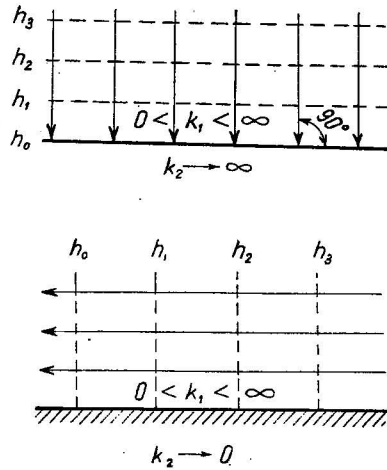
Dzieląc ostatnie równanie (6) przez równanie (4) oraz biorąc pod uwagę fakt, że  $dh_1 = dh_2$ , między dwiema liniami równych ciśnień, w wyniku uzyskamy wzór wg prawa M. K. Hubberta (1940) dotyczący stycznego załamania się torów przepływów wód na granicy środowisk o różnej przepuszczalności:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2} \quad (7)$$

Prawo to, jak ilustruje fig. 5, wskazuje na ścisłą zależność wartości kąta załamania się strumienia przepływu wód od przepuszczalności utworów.



$$\frac{k_2}{k_1} = 10$$



1  $k_1, k_2$  2

Fig. 5

h 1 - - - - - 2

Fig. 6

Fig. 5. Przepływ wód przez warstwy o różnej przepuszczalności (wg M. H. Hubberta, 1940)

Water flow across layers of different permeability (after M. H. Hubbert, 1940)

- 1 — linie przepływu wód; 2 — warstwy o przepuszczalności  $k_1$  i  $k_2$
- 1 — water flow lines; 2 — layers of  $k_1$  and  $k_2$  permeabilities

Fig. 6. Przykłady przepływów wód (wg M. H. Hubberta, 1940)

Patterns of groundwater flow (after M. H. Hubbert, 1940)

- 1 — linie równych ciśnień (h); 2 — linie przepływów wód
- 1 — lines of equal heads; 2 — flowlines

M. K. Hubbert (1940, str. 844—847) określa na drodze matematycznej kierunki załamania się torów przepływu wód przy przejściu ze środowiska o przepuszczalności  $0 < k_1 < \infty$  do środowiska  $k_2 \rightarrow \infty$ . Jak to ilustruje fig. 6, zaczerpnięta z pracy tegoż autora, w warunkach małej przepuszczalności warstw nadległych ( $k_1$ ) i dużej przepuszczalności niżejległego poziomu wodonośnego ( $k_2$ ) linie ekwipotencjalne układają się równolegle do tego ostatniego, czyli kierunek przepływu jest skierowany doń prostopadle.

W przypadku występowania nieprzepuszczalnych utworów ( $k_2 \rightarrow 0$ ) podścielających warstwę wodonośną o określonej przepuszczalności  $k_1$  (fig. 6) wyrażenie (4) przybierze formę następującą:

$$k_1 \frac{dh_1}{dL_1} \cos \Theta = 0 \quad (8)$$

Ponieważ zarówno przepuszczalność  $k_1$ , jak i gradient hydrauliczny są określone, to  $\cos \Theta = 0$ , co odpowiada  $\Theta = 90^\circ$ . Dlatego w obszarze o określonej przepuszczalności linie ekwipotencjalne przebiegają prostopadle do nieprzepuszczalnego podłoża, to znaczy przepływ wód jest skierowany doń równoległe.

#### METODY PRZEDSTAWIANIA DWUWYMIAROWEGO POLA CIŚNIEŃ

Pole ciśnień i przepływ wód w polu hydrodynamicznym mogą być przedstawione na dwuwymiarowej płaszczyźnie. W tym celu dla przedstawienia poziomego rzutu pola posługujemy się mapą, a dla pionowego rzutu — przekrojem.

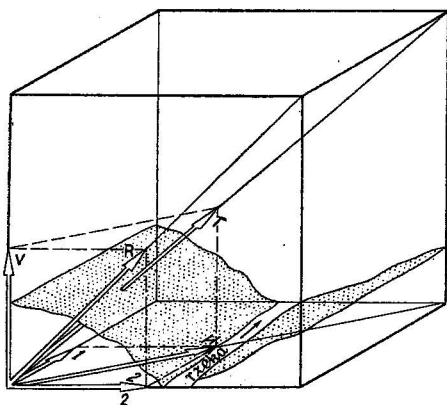


Fig. 7. Składowe przepływu wód podziemnych (wg P. Meybooma, R. O. van Everdingena, R. A. Freeze'a, 1966)

Flow components (after P. Meyboom, R. O. van Everdingen, R. A. Freeze, 1966)

1 — składowa podłużna; 2 — składowa boczna; V — składowa pionowa; R — wypadkowa pionowa; H — wypadkowa pozioma; T — ogólny wektor przepływu

1 — longitudinal component; 2 — lateral component; V — vertical component; R — flow resultant; H — horizontal component; T — total flow vector

Na fig. 7 przedstawiony jest rozkład składowych głównego wektora T kierunku przepływu wód podziemnych w zlewni podziemnej, a nazewnictwo tych składowych zaczerpnięto z pracy P. Meybooma, R. O. van Everdingena, R. A. Freeze'a (1966). Składowa kierunku przepływu w płaszczyźnie poziomej jest zwana składową poziomą (H). Jest ona rozłożona na składowe: podłużną (1) i boczną (2). Pierwsza z nich jest równoległa, druga poprzeczna do strefy drenażu lub wododziału. W ten sposób orientacja składowych poziomego kierunku przepływu jest określona orientacją strefy drenażu lub wododziału, podczas gdy kierunek składowej jest określany przez kierunek ruchu wód. Trzecia składowa wektora głównego kierunku przepływu jest zwana składową pionową (V).

Poziome i boczne składowe mogą być przedstawione na planie, natomiast boczne i pionowe składowe kierunków przepływu na przekroju. Suma dwóch ostatnich jest zwana wypadkową kierunku przepływu (R) dla każdego określonego punktu wewnątrz przekroju.



Ogólnie przyjętym sposobem przedstawienia dwuwymiarowego pola hydrodynamicznego są mapy zwierciadła wody. Są one skonstruowane przy założeniu, że pozioma składowa (H) przepływu reprezentuje podstawowy, główny wektor przepływu wód podziemnych. Jednakże w przypadku kiedy wypadkowa przepływu (R) stanowi lepsze przybliżenie głównego wektora (T) niż pozioma składowa (H), przepływ wód winien być przedstawiony raczej na przekroju pionowym aniżeli na mapie.

Autor do przedstawienia pola hydrodynamicznego utworów jurajskich posłużył się zarówno przekrojami, jak i mapą hydroizohips.

Pierwszym badaczem, który użył piezometrii do określenia przepływu wód był J. M. K. Pennik (1905, fide P. Meyboom, 1966). Połowe badania różnych części naturalnego systemu przepływu były prowadzone przez O. E. Meinzera (1927). Obecnie są one kontynuowane i rozwinęte przez P. Meybooma (1962, 1966, 1967), P. Meybooma, R. O. van Everdingena i R. A. Freeze'a (1966), J. Todda (1966) i innych.

Stosując metodę przedstawiania pola hydrodynamicznego na przekrojach, wyniki badań punktowych dokonane w piezometrach nanosi się na wspomniane przekroje. Następnie przy pomocy interpolacji wykreśla się linie równych ciśnień oraz — prostopadle do tych ostatnich — tory przepływów (P. Meyboom, 1962). W przypadku środowiska anizotropowego przebieg torów przepływu ulega odchyleniu. Do jego skorygowania można wykorzystać graficzną metodę A. C. Liakopulosa (R. A. Freeze, P. A. Witherspoon, 1967).

Przepływ wód w rozpatrywanym polu hydrodynamicznym zaznacza się zmniejszaniem wartości linii ekwipotencjalnych w kierunku ruchu wód.

Wykonywanie znacznie przewyższonych przekrojów pociąga za sobą konieczność korygowania kierunków torów przepływów, które w tym przypadku nie będą biec prostopadle do kierunku linii równych ciśnień. W celu ułatwienia tego zadania skonstruowane zostały specjalne diagramy (R. O. van Everdingen, 1963).

## WYNIKI BADAŃ POLA HYDRODYNAMICZNEGO ZLEWNI PODZIEMNYCH W UTWORACH JURAJSKICH

### POMIARY CIŚNIEŃ POTENCJALNYCH W OTWORACH, STUDNIACH I ŹRÓDŁACH

Pomiary ciśnień przeprowadzono w otworach wiertniczych, studniach gospodarskich oraz źródłach (fig. 1). Podstawową rolę w badaniach polowych odegrały małosrednicowe wiercenia strukturalne (7 otworów o głęb. od stukilkudziesięciu do ponad 300 m) prowadzone systemem obrotowym przy użyciu czystej wody zamiast płuczki. Poszczególne poziomy wodonośne zamykane były przez rurowanie. Rury stawiane były wodoszczelnie w korkach łożowych. Pomiary ciśnień w otworach prowadzono częściowo w czasie wiercenia, z równoczesnym rurowaniem otworu, jak również w czasie odcinkowej ich likwidacji, po zakończeniu wiercenia. W ostatnim przypadku badania hydrogeologiczne połączone były z opróbowaniem i określaniem wydajności poziomów wodonośnych. Ponadto pomiary ciśnień dokonano w studniach gospodarskich, dla których zmierzono całkowitą głębokość i głębokość zwierciadła wody. Do przedstawienia pola

ciśnien wykorzystano również źródła występujące w dolinach potoków. Ciśnienia źródeł określono rzędnymi punktu wycieku.

Pomiary ciśnień potencjalnych obarczone są pewnymi błędami wynikłymi z prowadzenia badań w otworach wiertniczych i studniach gospodarskich (zamiast w specjalnie przeznaczonych do tego celu piezometrach) oraz odczytywania wysokości punktów pomiarowych z mapy topograficznej. Biorąc pod uwagę wynikające stąd niedokładności, jak również uwzględniając nierównomierne, często niedostateczne ilościowo rozmieszczenie punktów pomiarowych, uzyskane wyniki pozwalają jedynie na ogólne scharakteryzowanie pola hydrodynamicznego zlewni podziemnej w badanym obszarze.

#### MODEL HYDRODYNAMICZNY OBSZARU

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań skonstruować można trójwarstwowy model hydrodynamiczny opisywanego obszaru. Górna warstwa reprezentowana jest przez węglanowe, dobrze przepuszczalne utwory malmu. Ze względu na szczelinowy charakter poziomego wodonośnego dominuje tu przepuszczalność pionowa nad przepuszczalnością poziomą.

Środkowa warstwa reprezentowana jest przez piaszczyste utwory doggeru o zbliżonej przepuszczalności do warstwy górnej. Ze względu na niewielką miąższość środkowa warstwa nie odgrywa większej roli w opisywanym modelu hydrodynamicznym.

Dolna warstwa charakteryzuje się niższą i bardzo zmienną przepuszczalnością. W zależności od wykształcenia litologicznego utworów paleozoicznych obserwuje się zróżnicowanie przepuszczalności aż do praktycznie nieprzepuszczalnych skał włącznie. Są to zazwyczaj utwory anizotropowe z dominującą przepuszczalnością pionową. Uwzględniając współczynniki filtracji uzyskane z pompowań, stosunek przepuszczalności warstwy górnej i środkowej do dolnej kształtuje się w stosunku od 10 : 1 aż do 100 : 1. W pierwszym przypadku utwory dolnej warstwy reprezentowane są przez skały dolomityczne, w drugim przypadku, skrajnym, przez skały o dużej zawartości frakcji ilastych.

Duża miąższość dolnej warstwy w stosunku do górnych nie ma, jak można sądzić z teoretycznych modeli A. R. Freeze'a i P. A. Witherspoona (1967), większego wpływu na charakter przepływu wód.

Przedstawiony model komplikuje zrębowa budowa tektoniczna obszaru oraz aktywnie zaznaczające się procesy krasowe w skałach węglanowych jury. Pierwszy z czynników pociąga za sobą duże zróżnicowanie miąższości górnej warstwy. Natomiast zjawiska krasowe, jak również tektoniczne zaszczelinowanie utworów zwiększają anizotropowość warstw.

Znaczne lokalne zróżnicowania rzeźby terenu oraz występowanie głęboko wciętych dolin powodują powstanie szeregu drugorzędnych zlewni podziemnych, zakłócających (w górnej warstwie) regionalny spływ wód.

#### PRZEDSTAWIENIE POLA HYDRODYNAMICZNEGO NA MAPIE

Pomiary zwierciadła hydrostatycznego wód w studniach gospodarskich i otworach wiertniczych oraz rejestracja źródeł umożliwiły konstrukcję mapy zwierciadła wody górnej warstwy wodonośnej (fig. 1).

W celu określenia zależności ułożenia zwierciadła wód od ukształtowania powierzchni terenu wykreślono hydroizohipsy na plan warstwico-  
wy. Tak skonstruowana mapa pozwala prześledzić występowanie ścisłej,  
lecz nieco złagodzonej zależności konfiguracji powierzchni zwierciadła  
wody od rzeźby terenu.

Generalny spadek zwierciadła wody, wynoszący około 2,4‰, jest zgod-  
ny z nachyleniem wierzchowin w kierunku dolin stanowiących podstawę  
drenażu terenu. Podziemny dział wodny pokrywa się z działem powierz-  
chniowym (fig. 1). W obszarze wododziałowym zwierciadło wody jest  
ułożone niemal płasko.

Regionalny spływ zakłócony jest drenującym wpływem dolin potoków.  
Doliny te są obszarami drenażu lokalnych zlewni podziemnych górnej  
warstwy wodonośnej. Obszarami zasilania i działami wodnymi tych zlewni  
są wierzchowiny położone między poszczególnymi dolinami.

Doliny powodują występowanie stromych gradientów hydraulicznych  
w zasięgu swego drenującego wpływu. Układ hydroizohips jest nieregu-  
larny, wydłużony w kierunku do przebiegu dolin. Zasięg drenującego  
wpływu dolin, jak to wynika z przebiegu hydroizohips, jest ograniczony  
ze względu na południkowy przebieg dolin, równoległy do kierunku re-  
gionalnego spływu wód w górnej warstwie.

Strome, kilkunastoprocentowe spadki zwierciadła wody zaznaczają się  
w zasięgu równoleżnikowo przebiegającej kuesty jurajskiej, ograniczają-  
cej dolinę rzeki R. Na kontakcie utworów jurajskich i kredowych wystę-  
pują liczne źródła wskazujące na występowanie obszaru drenażu górnej  
warstwy wodonośnej.

#### PRZEDSTAWIENIE POLA HYDRODYNAMICZNEGO NA PRZEKROJACH

Przekrój I (fig. 8) przebiega w poprzek działu wodnego terenu, na  
przestrzeni od doliny lokalnego potoku na zachodzie do doliny rzeki P na  
wschodzie (fig. 1). Dolina P ma strome zbocza i jest głęboko wcięta  
w podłoże, natomiast poprzednia dolina w górnym swym odcinku jest  
płytka i posiada łagodnie pochylone zbocza.

Miąszości górnej warstwy wodonośnej, wapieni malmu, są zmienne  
w granicach od kilkudziesięciu do ponad 140 m. Pomiary ciśnień potencjal-  
nych wykonane zostały w otworach studziennych i studniach gospodar-  
skich, znajdujących się w ograniczonej ilości w zasięgu linii przekrojowej.  
Do konstrukcji pola ciśnień wykorzystane zostały również źródła. Brak  
pomiarów ciśnień w profilu pionowym górnej warstwy utrudniał inter-  
pretację pola ciśnień. Konstrukcja analogowego modelu elektrodyna-  
micznego umożliwiła określenie wypadkowego kierunku spadku ciśnień  
i ułatwiła tym samym konstrukcję pola ciśnień na przekroju (fig. 8). Tym  
niemniej niewielka ilość punktów pomiarowych pozwala jedynie na sche-  
matyczne przedstawienie pola hydrodynamicznego.

Zwierciadło wody jest złagodzoną odbiciem rzeźby terenu. Łagodne  
nachylenie zwierciadła w obszarach kulminacji i strome w dolinach rzek  
świadczy o niewielkich spadkach hydraulicznych w pierwszym i ich wy-  
raźnym wzroście — w drugim przypadku.

Rozkład ciśnień wskazuje, że woda płynie z obszaru zasilania, którym  
jest kulminacja terenu, w kierunku dolin, które są obszarami drenażu.

W obszarach kulminacji i na ich zboczach obok podstawowego przepływu bocznego występuje również przepływ pionowy — w dół — wskazujący na zasilanie górnej warstwy wzdłuż drogi przepływu.

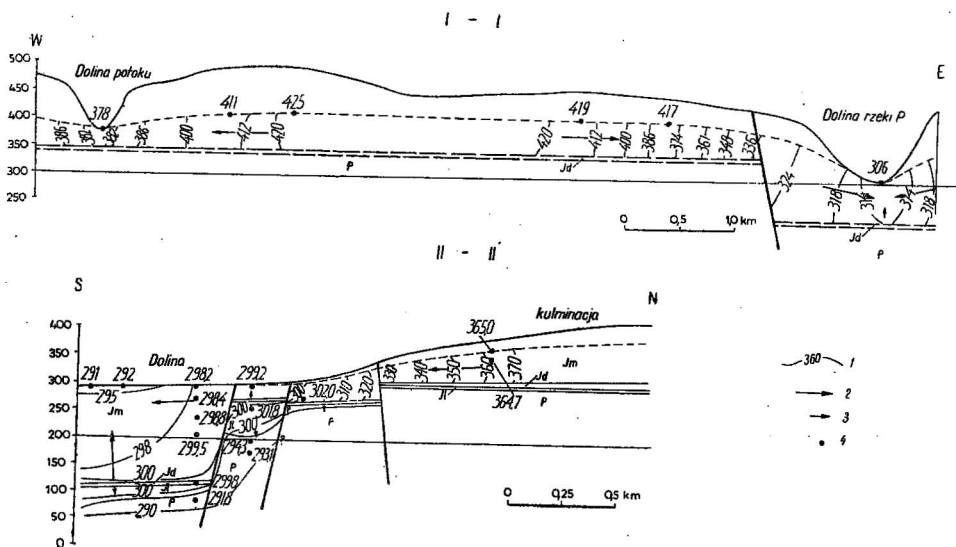


Fig. 8. Przekroje I—I' i III—III'

Cross sections I—I', II—II'

1 — linie równych ciśnień; 2 — podstawowy kierunek przepływu wód; 3 — lokalny kierunek przepływu wód; 4 — punkt stwierdzenia i pomierzona wielkość ciśnienia: Jm — jura — malm (pierwsza warstwa wodonośna); Jd — jura — dogger (druga warstwa wodonośna); Jl — jura — lias; P — paleozoik (trzecia warstwa wodonośna)

1 — lines of equal heads in metres; 2 — main direction of flow; 3 — local direction of flow; 4 — measurement point with the value of total head in metres above sea level; Jm — Jurassic — Malm (first water-bearing layer); Jd — Jurassic — Dogger (second water-bearing layer); Jl — Jurassic — Lias; P — Palaeozoic (third water-bearing layer)

Obniżanie się ciśnień wzdłuż toru przepływu jest rzędu 0,02. Duże odległości między liniami ekwipotencjalnymi świadczą o dobrej przepuszczalności górnej warstwy wodonośnej.

W dolinach układ linii ciśnień jest sferyczny. Wartości ciśnień rosną z głębokością. Przedstawiony na przekroju przybliżony przebieg linii ekwipotencjalnych w dolinie rzeki P wskazuje na głęboki, całkowity drenaż warstwy wodonośnej, oraz możliwy częściowy drenaż niższych warstw. Wynika z tego, że podstawa drenażu sięga poniżej dna doliny. Układ linii ciśnień w dolinie lokalnego potoku jest również sferyczny. Zróżnicowanie rzeźby terenu nie jest tak znaczne, by spowodować układ potencjałów pozwalający na głęboki drenaż warstw wodonośnych.

Granica między przepływem wód w dół i przepływem bocznym, charakterystycznym w przypadku rozpatrywanej zlewni dla obszaru zasilania, a przepływem wód w górę, typowym dla obszaru drenażu, jest trudna do jednoznacznego określenia. Można jednak z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że w przypadku doliny rzeki P przebiega ona na skłonie

zboczy tejże doliny. Wskazywałoby to, że obszar drenażu jest nieduży w stosunku do obszaru zasilania. Wynosi on w przybliżeniu 10% obszaru zlewni. Taki obszar drenażu i jego stosunek do obszaru zasilania jest charakterystyczny (uwzględniając wyniki badań R. A. Freeze'a i P. A. Witherspoona, 1967) dla drenażu zlewni podziemnej przez głęboką dolinę rzeczną.

Niekorzystny stosunek miąższości górnej warstwy wodonośnej do długości zlewni podziemnej powoduje występowanie na przedstawionym przekroju przepływu bocznego. Duże zróżnicowanie wysokości rzeźby terenu w rozpatrywanym obszarze powoduje istnienie dogodnych warunków do powstania lokalnych zlewni podziemnych, zakłócających regionalny przepływ wód w górnej warstwie wodonośnej. Przykładem tego jest lokalna zlewnia przedstawiona na przekroju. Zlewnia ta leży w zasięgu obszaru drenażu rzeki R.

Przekrój II (fig. 8) przedstawia kształtowanie się ciśnień potencjalnych w lokalnej zlewni górnej warstwy wodonośnej. Obszarem zasilania są wzgórza, obszar drenażu stanowi dolina.

Budowa geologiczna obszaru jest dobrze rozpoznana. Uskokii o równoleżnikowym przebiegu tną opisywaną strukturę na szereg bloków obniżających się schodkowo w kierunku południowym. Pierwsza warstwa wodonośna jest zróżnicowana w swej miąższości w granicach od 35÷185 m. Zróżnicowanie to obserwuje się w zasięgu poszczególnych bloków. Utwory malmu i kilkumetrowej miąższości utwory doggeru podścielone są nieprzepuszczalnymi (ogólnie biorąc) osadami liasu. W podłożu utworów jurajskich występują dolomity, wapienie i piaskowce paleozoiczne, reprezentujące dolną warstwę wodonośną.

Pomiary ciśnień potencjalnych przeprowadzono we wszystkich wykonanych tu wierceniach (fig. 1). Do konstrukcji przekroju wykorzystano wyniki pomiarów ciśnień z 4 wierceń oraz kilku studni gospodarskich i źródeł położonych w zasięgu doliny. W oparciu o opisywany przekrój wynika, że spadek zwierciadła wody w kierunku doliny wynosi 7,0%. Kierunek spadku zwierciadła wody oraz układ linii ekwipotencjalnych wskazuje na wyraźny przepływ wód w górnej warstwie wodonośnej — od obszaru morfologicznej kulminacji do doliny. Poniżej dna doliny występuje typowy sferyczny układ linii ciśnień. Wartości ciśnień rosną z głębokością aż do stropu utworów liasu. Poniżej utworów liasu ciśnienia ponownie zmniejszają się z głębokością.

Przedstawiony układ ciśnień wskazuje na występowanie w rozpatrywanym polu hydrodynamicznym trzech niezależnych systemów przepływu. Pierwszy z nich związany jest z górną warstwą wodonośną, drugi ze środkową, a trzeci z dolną warstwą. Głębokość zasięgu poszczególnych systemów jest regulowana układem linii ekwipotencjalnych, warunkowanym przepuszczalnością warstw i morfologicznym zróżnicowaniem terenu.

W górnej warstwie wodonośnej, w obszarze bocznego przepływu, obniżenie się ciśnień wzdłuż toru przepływu wynosi 0,07 m/m. Gradient hydrauliczny i układ linii ciśnień wskazują na dobrą przepuszczalność wapieni malmu.

Obszar drenażu opisywanej lokalnej zlewni, uwzględniając przebieg hydroizohips (fig. 1) oraz układ linii ekwipotencjalnych (fig. 8), zajmuje



około 20÷30% jej powierzchni. Drenaż obejmuje całkowicie górną warstwę wodonośną. Wzrost ciśnień jest nieznaczny, rzędu 0,01 m/m. Granica między obszarem zasilania i drenażu przebiega wzdłuż zboczy doliny.

Obszar zasilania rozpatrywanej lokalnej zlewni nie jest całkowicie drenowany przez dolinę. Wskazuje na to omówiony uprzednio układ linii ciśnień oraz zróżnicowany gradient ciśnień obszaru zasilania i drenażu. Gradient ten kształtuje się w stosunku 7:1. Ponieważ obszar zasilania jest parokrotnie większy od obszaru drenażu, to przyczyn różnicy w ilości drenowanych i infiltrujących wód należy szukać: 1) w zróżnicowanym przekroju przepływu wód, 2) większej przepuszczalności górnej warstwy w zdyslokowanym obszarze drenażu, 3) w zasilaniu regionalnego systemu przepływu górnej warstwy wodonośnej. Biorąc pod uwagę fakt, że zmiany powierzchni przekroju czynnego przepływu mogą być rekompensowane zwiększonym obszarem zasilania w stosunku do obszaru drenażu, zasadniczych przyczyn zróżnicowania gradientów ciśnień należy szukać w zwiększonej przepuszczalności i dodatkowym odwadnianiu obszaru zasilania. Przepuszczalność górnej warstwy w obszarze drenażu, aczkolwiek wyższa od przeciętnej, mieści się w granicach typowych dla poziomu wodonośnego malmu. Należy stąd wnioskować, że jedną z przyczyn dysproporcji między ilością wód drenowanych i infiltrujących jest udział lokalnych zlewni w zasilaniu regionalnego systemu przepływu górnej warstwy wodonośnej.

#### WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania pozwalają przedstawić, w uproszczeniu, opisywany obszar w postaci trójwarstwowego modelu hydrodynamicznego. Górna warstwa modelu jest reprezentowana głównie przez szczelinowy poziom wodonośny malmu, a środkowa przez piaskowce doggeru. Dolna warstwa wodonośna związana jest z poziomem wodonośnym występującym w szczelinowo-warstwowych utworach paleozoiku. Przepuszczalność warstwy górnej i środkowej do dolnej kształtuje się w stosunku jak 10:1 i wyżej. Obserwacje pola ciśnień w badanym obszarze wykazały niezależność systemów przepływu w opisywanych warstwach wodonośnych.

2. Istnieje ścisła zależność między ułożeniem zwierciadła wody w pierwszej warstwie wodonośnej a ukształtowaniem rzeźby terenu. Zwierciadło wody jest zlagodzonym odbiciem topografii terenu.

3. Niewielki stosunek miąższości górnej warstwy wodonośnej do długości zlewni powoduje dominację w zlewniach przepływu bocznego nad przepływem pionowym.

4. W górnej warstwie wodonośnej występują dwa systemy przepływu wód: regionalny i lokalny. Występowanie lokalnych zlewni podziemnych związane jest z dużym zróżnicowaniem rzeźby powierzchni terenu oraz występowaniem głębokich dolin.

5. Obszarami zasilania zlewni są kulminacje terenu i ich zbocza.

6. Podstawą drenażu regionalnego systemu przepływu górnej warstwy wodonośnej są doliny rzek R i P. Obszarami drenażu lokalnych systemów przepływu są doliny potoków stanowiących dopływy wspomnianych rzek.



7. W oparciu o przedstawione na przekrojach pola ciśnień potencjalnych można wnioskować, że dolina rzeki P drenuje całkowicie górną warstwę wodonośną. Istnieje jednak możliwość drenażu niższych warstw (nie sprawdzona badaniami polowymi). Zasięg drenażu jest ograniczony do obszaru doliny. Doliny potoków drenują również, lecz w sposób ograniczony górną warstwę wodonośną w zasięgu lokalnych zlewni.

8. Skonstruowane przekroje hydrodynamiczne pozwalają przyjąć złożony sposób odwadniania obszarów zasilania górnej warstwy wodonośnej. Obszary te są bowiem odwadniane przez lokalny drenaż oraz biorą udział w zasilaniu regionalnego systemu przepływu.

9. Przeprowadzone badania wykazały celowość stosowania przekrojów hydrodynamicznych do przedstawiania pola ciśnień zlewni podziemnych w szczelinowych utworach malmu. Do pełnego udokumentowania tego pola konieczne są planowano rozmieszczone piezometry.

10. Niewielka ilość punktów pomiarowych, jakimi dysponował autor, oraz brak specjalnie przystosowanych do pomiarów ciśnień piezometrów pozwoliły jedynie na schematyczne przedstawienie w niniejszej pracy pola hydrodynamicznego górnej warstwy wodonośnej.

Oddział Górnośląski Instytutu Geologicznego  
Sosnowiec, ul. Białego 5  
Nadesłano dnia 28 stycznia 1969 r.

#### PIŚMIENNICTWO

- ALEXANDROWICZ S. W., WILK Z. (1962) — Budowa geologiczna i źródła doliny Prądnika w Ojcowskim Parku Narodowym. *Ochrona Przyr.*, **28**, p. 187—210. Kraków.
- BOGACZ K. (1959) — New data on the geological structure of the Krzeszowice Graben. *Biull. Ac. Pol. Sc.*, **7**, p. 183—190, nr 2. Kraków.
- BUKOWY S. (1956) — Geologia obszaru między Krakowem a Korzkwią. *Biul. Inst. Geol.*, **108**, p. 17—74. Warszawa.
- BUKOWY S. (1957) — Nowe dane o kimerydzie okolic Krakowa. *Prz. geol.*, **5**, p. 90—91, nr 2. Warszawa.
- BUKOWY S. (1964) — Nowe poglądy na budowę północno-wschodniego obrzeżenia Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Biul. Inst. Geol.*, **184**, p. 16—34. Warszawa.
- DERDZIŃSKA X., GOC E. (1964) — Zawodnienie utworów mezozoicznych okolic Krasinca i Cianowic w świetle nowych badań hydrogeologicznych. *Prz. geol.*, **12**, p. 316—318, nr 7—8. Warszawa.
- DŻUŁYŃSKI S. (1952) — Powstanie wapieni skalistych jury krakowskiej. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, **21**, p. 125—180, nr 2. Warszawa.
- DŻUŁYŃSKI S. (1953) — Tektonika południowej części Wyżyny Krakowskiej. *Acta geol. pol.*, **3**, p. 325—440, nr 3. Warszawa.
- EVERDINGEN V. R. O. (1963) — Groundwater flow diagrams in sections with exaggerated vertical scale. *Paper Geol. Surv.*, **63**, nr 27. Ottawa.
- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A. (1966) — Theoretical analysis of regional groundwater flow. *Water Resour. Res.*, **2**, p. 641—656, nr 4. U.S.A.

- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A. (1967) — Effect of water — table configuration and subsurface permeability. *Water Resour. Res.*, 3, p. 623—634, nr 2. U.S.A.
- GOC E. (1968) — Metodyka określenia bilansu hydrogeologicznego na przykładzie dorzecza Prądnika. II Naukowo-Techniczna Konferencja, Hydrogeologia i Geologia Inżynierska, Gdańsk, p. 146—156. Warszawa.
- GRADZIŃSKI R. (1962) — Rozwój podziemnych form krasowych w południowej części Wyżyny Krakowskiej. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 32, p. 429—492, nr 4. Kraków.
- HUBBERT M. K. (1940) — Theory of groundwater motion. *Jour. Geol.*, 48, p. 785—944. U.S.A.
- HUBBERT M. K. (1959) — Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists*, 37, p. 1954—2026. U.S.A.
- KLIMASZEWSKI M. (1958) — Nowy pogląd na rozwój rzeźby krasowej. *Prz. geogr.* 30, p. 421—438, nr 3. Warszawa.
- MEINZER O. E. (1927) — Plants as indicators of groundwater. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Papers*, 577. Washington.
- MEYBOOM P. (1962) — Patterns of groundwater flow in the prairie profile. *Proc. of Hydrology Symposium*, 3, N.R.C. Ottawa.
- MEYBOOM P. (1966) — Groundwater flow studies in the Assiniboine River drainage basin. *Bull. Geol. Surv. Canada*, 139. Ottawa.
- MEYBOOM P. (1967) — Current trends in hydrogeology. *Earth — Sci. Rev.*, 2, p. 345—364. Amsterdam.
- MEYBOOM P., EBERDINGEN V. R. O., FREEZE R. A. (1966) — Patterns of groundwater flow in seven discharge areas in Saskatchewan and Manitoba. *Bull. Geol. Surv. Canada*, 147, Ottawa.
- RÓŻYCKI S. Z. (1953) — Górny dogger i dolny malm Jury Krakowsko-Częstochowskiej. *Pr. Inst. Geol.*, 17, Warszawa.
- SIEWNIAK A. (1967) — Stratygrafia i sedimentacja jury między Krakowem a Skałą. *Biul. Inst. Geol.*, 204, p. 97—122. Warszawa.
- TODD D. K. (1966) — Groundwater Hydrology. John Wiley and Sons. Inc., Publ. New York.
- TOTH J. (1962) — A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Proc. of Hydrology Symposium*, 3, N.R.C. Ottawa.

Андрей РУЖКОВСКИ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИПЛЫВА ВОД  
МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Резюме

В статье автор на основании полевых измерений потенциальных давлений охарактеризовал условия циркуляции вод в юрских отложениях окрестностей Кракова.

Измерения давлений проводились главным образом в буровых скважинах, а также в колодцах и источниках.

Проведенные исследования дали возможность создать модель описываемой территории. Эта модель в разрезе содержит три водоносных пласта, характеризующихся разной проницаемостью. Хорошо проницаемый верхний пласт, состоящий из известняков мальма, перекрыт четвертичными глинами небольшой мощности. Средний пласт представлен песчаниками доггера, а нижний палеозойскими известняками, доломитами и песчаниками. Наблюдается большая дифференцированность проницаемости палеозойских отложений. Описываемые водоносные горизонты разделены мергелистыми отложениями визея, а также глинами лейаса.

Результаты полевых исследований дали возможность представить на карте и двух разрезах системы течения подземных вод исследованного водосборного бассейна.

Расположение линий равных давлений, представленное на разрезах, показывает, что в пределах описываемой территории имеются отдельные системы циркуляции вод, связанные с 3-мя основными водоносными горизонтами.

Условия циркуляции вод лучше всего были изучены в верхнем водоносном горизонте. Здесь, в основном, имеются боковые течения. Вертикальное течение, направленное вверх, наблюдается только в границах долин рек и потоков. Упомянутые долины являются областью дренажа верхнего водоносного пласта.

Большая дифференцированность рельефа поверхности и наличие глубоких долин является причиной существования в описываемом подземном водосборном бассейне как региональных, так и локальных систем течений. Водосборные бассейны локально дренируются долинами потоков. Зато долины рек являются территориями регионального дренажа.

Andrzej RÓŻKOWSKI

## RESEARCH OF GROUNDWATER FLOW USING A METHOD OF POTENTIAL HEAD MEASUREMENTS

### Summary

In the present paper the author explains groundwater flow conditions in the Jurassic deposits in the vicinity of Cracow, based on the total head field measurements.

The measurements have been made mainly in bore holes, partly also in water wells and springs.

The study enabled the present author to construct a model of the area. The model includes three water-bearing layers of various permeability. The well-permeable upper layer consists of Malm limestones overlain with Pleistocene till of small thickness. The middle layer is represented by Dogger sandstones, and the lower one — by Palaeozoic limestones, dolomites and sandstones. A great variety in permeability has been observed to appear in the Palaeozoic deposits. The aquifers mentioned above are separated from each other with impermeable marly Neuvizyan deposits and with Liassic clays.

The field measurements resulted in the establishment of some groundwater flow systems of the basin in study, presented then on the map and on two cross sections.

The distribution of equipotential lines on the sections shows that within the area considered several separate flow systems occur, related to the three main aquifers.

Best recognized are the groundwater flow conditions of the upper aquifer, where mainly lateral flow occurs. Vertical upward flow is observed to appear within the river and stream valleys only. These latter are drainage areas of the upper aquifer.

Due to the well-defined topography and deep valleys, both regional and local flow systems originate in the groundwater basin examined. Local sub-basins are drained by stream valleys. On the other hand, river valleys are the area of regional discharge.