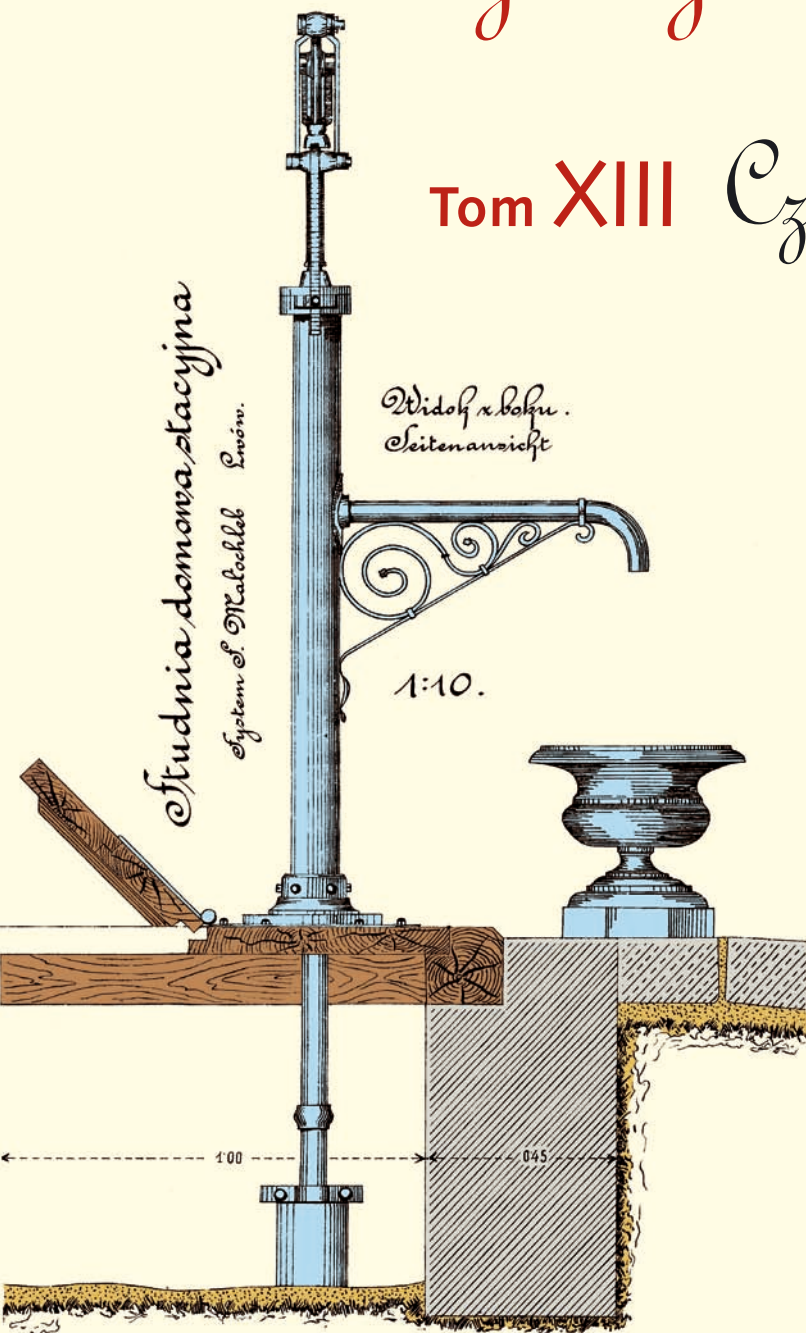


# Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 3.





Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez  
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska  
Wojciech Ciężkowski  
Józef Górski  
Andrzej Kowalczyk  
Ewa Krogulec  
Grzegorz Malina  
Jerzy Małecki  
Marek Marciniak  
Jacek Motyka  
Marek Nawalany  
Jan Przybyłek  
Andrzej Rózkowski  
Andrzej Sadurski  
Andrzej Szczepański  
Stanisław Staško  
Stanisław Witczak  
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku  
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ : pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, [www.pretext.com.pl](http://www.pretext.com.pl)

Druk: ROMA-POL, [www.romapol.pl](http://www.romapol.pl)

ISBN-13 978-83-88927-16-4

**Jacek Gurwin, Rafał Serafin**

**Numeryczny model filtracji systemu  
wodonośnego GZWP 322 Oleśnica**

**Numerical Model of Groundwater Flow System  
of MGWB 322 Oleśnica**

**Słowa kluczowe** numeryczny model filtracji, GIS, GZWP, MODFLOW/MODPATH

**Key words** numerical groundwater model, GIS, MGWB, MODFLOW/MODPATH

**Abstract** The investigations were conducted to establish a flow system, groundwater balance and a protection zone for MGWB 322 called Oleśnica using the most advanced tools for modelling: GROUNDWATER VISTAS environment integrated with MODFLOW and ArcGIS packages. Hydrogeological investigations, field work and GIS preparations let to develop a 3-D conceptual model of the complex groundwater flow system. As a result a proper hydrodynamic field in a three-dimensional space was calculated. Afterwards using MODPATH code the pathlines were obtained and the flow time of particles from outer recharge areas to the MGWB was estimated as 20–40 years that was a basis for a protection zone evaluation.

## 1. Wstęp

Obliczenia na numerycznym modelu filtracji miały na celu ustalenie składników bilansu wodnego, ocenę zasilania i odnawialności systemu wodonośnego, a także weryfikację zasobów oraz określenie strefy ochronnej zbiornika, który stanowi ważne źródło zaopatrzenia w wodę tego regionu. Przestrzenne odwzorowanie skomplikowanego układu hydrostrukturalnego było możliwe dzięki integracji zaawansowanego systemu GIS z najnowszą wersją programu modelującego GROUNDWATER VISTAS – MODFLOW. Kilkadziesiąt warstw informacyjnych przygotowanych w GIS było podstawą dla dokładnego odwzorowania przestrzennej struktury, warunków brzegowych i rozkładu parametrów modelu. Całość prac hydrogeologicznych została udokumentowana w opracowaniu firmy Proxima S.A. (Krawczyk i in., 2006) na zamówienie Ministerstwa Środowiska.

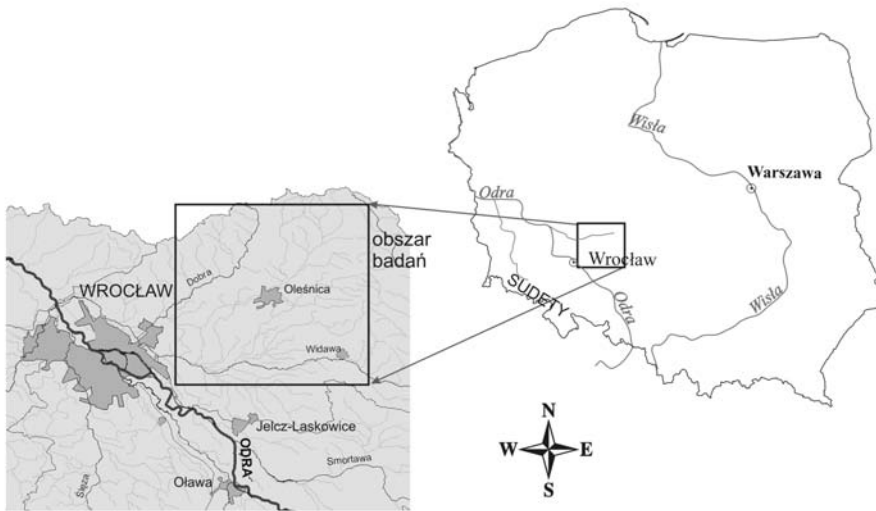
## 2. Lokalizacja i zarys warunków hydrogeologicznych zbiornika GZWP 322

Według podziału Kleczkowskiego (1990) obszar badań obejmuje czwartorzędowy zbiornik wód podziemnych Oleśnica (GZWP nr 322), który jest położony w powiecie oleśnickim, w obszarze województwa dolnośląskiego, na wschód od Wrocławia (rys. 1). Zgodnie z podziałem fizyczno-geograficznym Polski (Kondracki, 2001) zasięg zbiornika obejmuje fragmenty dwóch makroregionów: Wału Trzebnickiego i Niziny Śląskiej, zawierających część Równiny Oleśnickiej oraz Wzgórz Trzebnickich i Wzgórz Twardogórskich.

Układ hydrodynamiczny jest kształtowany głównie przez regionalną bazę drenażu, jaką stanowi dolina rzeki Odry przebiegająca na południe od badanego obszaru (rys. 1), jednak na dynamikę wód podziemnych wyznaczonego GZWP bezpośredni wpływ mają drenujące ten obszar rzeki: Widawa ze Smolną na południu, Oleśnica w centrum obszaru oraz Dobra na północy obszaru. Dominujący kierunek przepływu jest zgodny z biegiem Oleśnicy czyli NE-SW.

Obszar zbiornika nr 322 był już objęty opracowaniami dla ustalenia zasobów wód podziemnych (Krawczyk i in., 1996; Kryza i in., 2001). Granice zbiornika są bardzo nieregularne, na co wpływ ma zwłaszcza dolina kopalna występująca w SW części, która przebiega z kierunku NW na SE. Jej długość w granicach zbiornika wynosi ok. 15 km, przy szerokości ok. 1,5 km i zostało tu zlokalizowanych kilka dużych ujęć wód podziemnych (Krawczyk i in., 2006).

Układ hydrostrukturalny związany z czwartorzędowym subzbiornikiem nie stanowi układu hydraulicznie zamkniętego, toteż bardzo ważną rolę odgrywają ograniczające powierzchnie brzegowe, przez które następuje dopływ lub odpływ wód podziemnych (Margat, 1976; Szymanko, 1980).



**Rysunek 1.** Lokalizacja obszaru objętego modelem  
**Figure 1.** Location of the model area

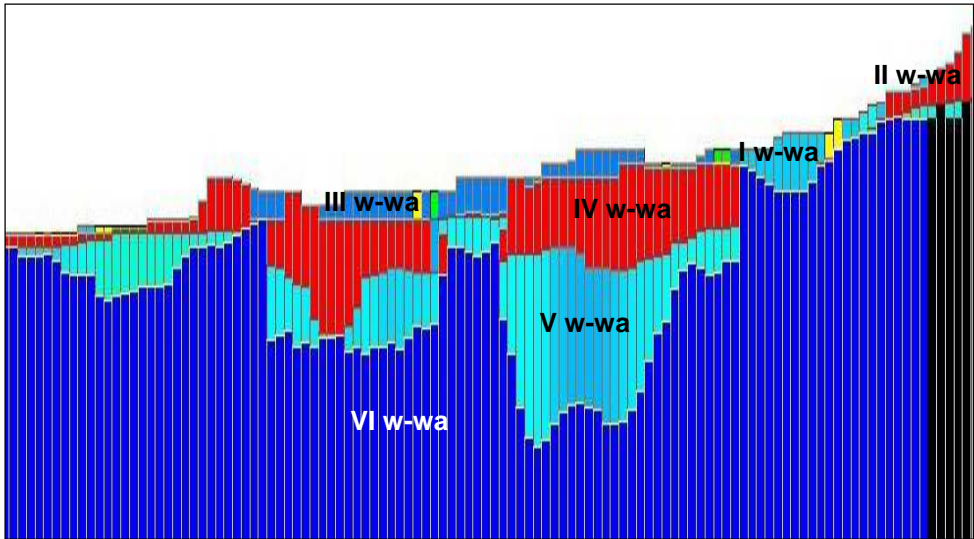
Ponieważ na większości granic sam zbiornik nie ma jednoznacznie zdefiniowanych granic strukturalnych, w związku z tym powiększono obszar badań i przesunięto granice modelu tak, aby ich przebieg był zgodny z ciekami powierzchniowym, wododziałem lub siatką hydrodynamiczną strumienia filtracyjnego. Obszar modelu został rozszerzony w stosunku do granic zbiornika szczególnie na południu i na zachodzie. Także na północy i wschodzie oddalono granice modelu do stref zasilania systemu wodonośnego. W ten sposób możliwe było lepsze odwzorowanie i wykorzystanie układu strumieni filtracyjnych oraz właściwe i pewne przyjęcie zewnętrznych powierzchni brzegowych.

### 3. Numeryczny model filtracji wód podziemnych

Metoda modelowania matematycznego, jako najbardziej wartościowe narzędzie przy podejmowaniu decyzji dotyczących bilansowania wód podziemnych w wielowarstwowym układzie hydrostrukturalnym (Anderson i Woessner, 1992; Darr, 1979; Hamilton, 1982; Macioszczyk, 1993, 1997), została wykorzystana z pomocą sprawdzonego w regionalnych opracowaniach pakietu MODFLOW (Mc Donald i Harbaugh, 1988) w najnowszej konfiguracji systemu GROUNDWATER VISTAS v. 4.1. Jest on bardzo dobrze zintegrowany ze środowiskiem ArcGIS.

Na modelu wydzielono 6 warstw decydujących o zasobności wodnej obszaru, przy czym IV i V warstwa mają zasięg ograniczony jedynie do przebiegu doliny kopalnej na SW krańcu GZWP. Poziomy wodonośne współdziałają ze sobą za pośrednictwem kontaktów hydraulicznych poprzez warstwy rozdzielające najczęściej w postaci serii glin zwałowych. W wyniku dokładnej analizy w systemie GIS wykształcenia powierzchni granicznych kolej-

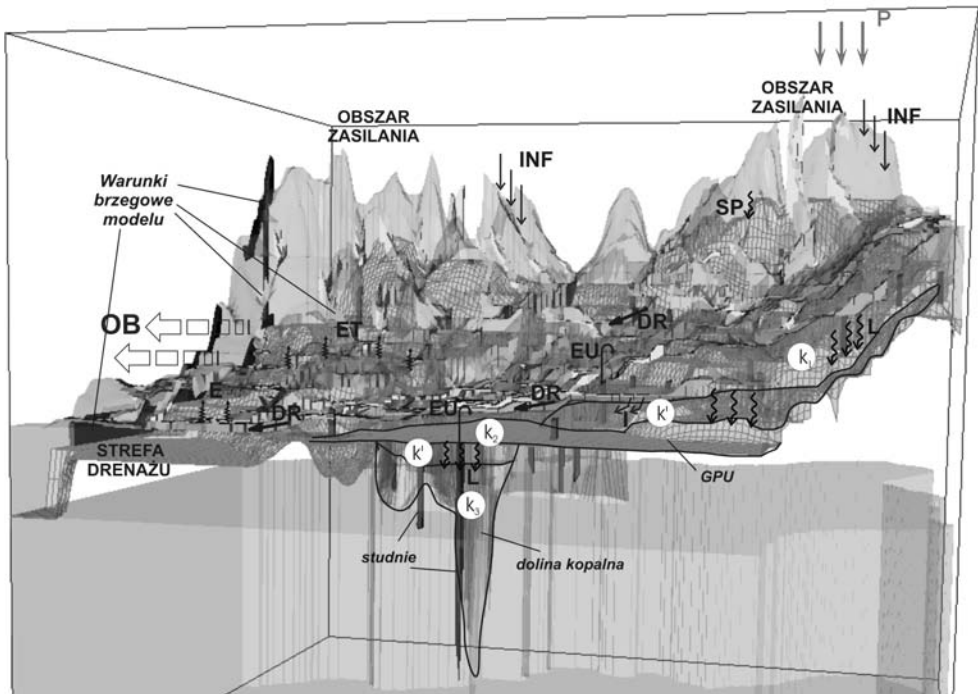
nych warstw (profile, przekroje, mapy robocze powierzchni granicznych, archiwalne badania geofizyczne) udało się na modelu odwzorować przestrzenną trójwymiarową zmienność warstw ujętych w schemacie hydrogeologicznym dla potrzeb modelu (rys. 2, 3). Duży wpływ na jakość przestrzennego odwzorowania geometrii miało wykonanie dokładnego cyfrowego modelu terenu DTM (rys. 3). Poziomy wodonośne związane są przede wszystkim z młodoplejstoceniowym i współczesnym systemem sieci rzecznej, m.in. doliny Widawy i Oleśnicy, a także z wodonościami w utworach fluwioglacjalnych o charakterze pokrywowym.



**Rysunek 2.** Numeryczne warstwy modelu (przekrój N-S)  
**Figure 2.** Numerical layers of the model (cross-section N-S)

W koncepcji regionalnego modelu przyjęto układ wielowarstwowy złożony z warstw wodonośnych budujących plejstoceniowe użytkowe poziomy wodonośne (III i V warstwa). Analiza wielowarstwowego układu hydrostrukturalnego pozwoliła na odwzorowanie ciągłego poziomu użytkowego oraz na dokładne poprowadzenie granic struktury doliny kopalnej, którą symulowano IV i V warstwą modelu. Odtworzono także przestrzenny rozkład rozdzielających warstw słabo przepuszczalnych (rys. 3). Zasilanie poziomu użytkowego zachodzi głównie wskutek przesączania z warstwy pierwszej poprzez warstwę II, a w rejonach, gdzie przypowierzchniowy poziom wodonośny nie występuje, wprowadzono na modelu infiltrację opadu bezpośrednio do najwyższej aktywnej warstwy, czyli warstwy II modelu.

Dyskretyzacja obszaru filtracji została wykonana przy pomocy siatki prostokątnej o orientacji NS - EW z zastosowaniem odwzorowania modelu zgodnego z systemem GIS. Układ taki dopasowuje się dobrze do sieci rzecznej i pozwala na import przygotowanych danych bezpośrednio ze środowiska ArcGIS i Geomedia, dzięki czemu główne cieki odwzorowano optymalną wielkością i ustawieniem bloków obliczeniowych.



**Rysunek 3.** Odzworowanie systemu krążenia wód podziemnych na przestrzennym modelu filtracji.

Objaśnienia: P — opad, ET — ewapotranspiracja, E — ewaporacja, INF — infiltracja efektywna, SP — spływ powierzchniowy, DR — drenaż rzek, I — zasilenie z rzek, Q — odpływ podziemny, L — przesączanie przez utwory słaboprzepuszczalne, OB — odpływ boczny, EU — eksploatacja ujęć,  $k_i$  — wsp. filtracji kolejnej w-wy,  $k'$  — wsp. filtracji pionowej

**Figure 3.** Interpretation of groundwater flow system on 3-D numerical model

Explanation: P — precipitation, ET — evapotranspiration, E — evaporation, INF — infiltration, SP — surface runoff, DR — river drainage, I — river infiltration, Q — underground runoff, L — leakage, OB — lateral outflow, EU — groundwater exploitation,  $k_i$  — hydraulic conductivity of the  $i$ -th layer,  $k'$  — vertical hydraulic conductivity

Wyznaczona za pomocą 160 wierszy i 175 kolumn siatka ma 28 000 bloków, przy czym na bloki aktywne przypada w warstwach od I do III ok. 70%, natomiast w przypadku warstwy IV i V jedynie ok. 10%. Szerokość  $x$  i długość  $y$  poszczególnych bloków jest identyczna i wynosi 200 m. Warunki początkowe wysokości hydraulicznej zadano zgodnie z zanotowanymi pomiarami w otworach i mapami hydroizohips (Krawczyk i in., 2006) oraz określono warunki brzegowe I-go, II-go i III-go rodzaju (Bear i Verruijt, 1994; Macioszczyk i Szestakow, 1983; Walton, 1992; Wang i Anderson, 1982).

Warunki brzegowe I-go rodzaju ( $H = \text{const}$ ) - przyjęto zgodnie z rozpoznanymi warunkami hydrogeologicznymi jedynie na odpływie wód podziemnych z systemu wodonośnego. Dla

wszystkich warstw modelu są to pewne fragmenty granicy zachodniej. Warunek brzegowy typu  $Q = 0$  zadano na niektórych fragmentach zewnętrznych granic. Infiltrację efektywną opadów atmosferycznych odwzorowano warunkiem brzegowym II-go rodzaju  $Q = \text{const}$  w postaci stałego zasilania powierzchniowego. Dane opracowano w środowisku GIS w oparciu o interpretację mapy użytkowania terenu i mapy wykształcenia litologicznego utworów przypowierzchniowych oraz wykorzystując dane o średnich rocznych sumach opadów, które mieszczą się w przedziale 570-620 mm. W modelu uwzględniono wszystkie ujęcia wód podziemnych, których łączna eksploatacja według stanu z 2006 r. wynosiła 10 176 m<sup>3</sup>d. Warunki brzegowe III-go rodzaju  $Q = f(H)$  - wewnętrzne zastosowano w celu odwzorowania wpływu zwierciadła wody w rzece na poziom wód podziemnych. W trakcie weryfikacji modelu wprowadzono dodatkowo mniejsze ciekły w obszarach, gdzie uzyskanie choćby dostatecznej zgodności z notowanymi wysokościami hydraulicznymi wynikało z zdecydowanie z wcześniejszego pominięcia tych cieków w modelu koncepcyjnym. W ten sposób uzyskano bardzo gęste odwzorowanie sieci rzecznej na modelu, co było zadaniem skomplikowanym, zrealizowanym dzięki integracji modelu VISTAS z systemem geoinformatycznym ArcGIS i Geomedia. Warunki brzegowe III rodzaju (typu GHB) zadano na granicy związanej z dopływem/odpływem strumienia wód podziemnych na zachodzie obszaru, tam gdzie nie wprowadzono warunku  $H = \text{const}$ . Ze względu na regionalny charakter modelu, stopień rozpoznania oraz cel, przyjęto ustalony model filtracji w systemie wodonośnym.

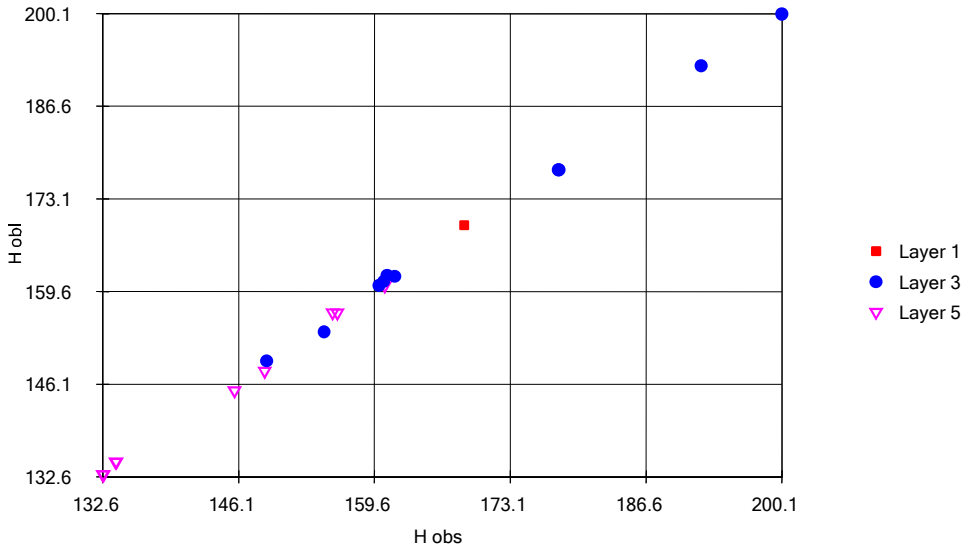
Schematyzację parametrów filtracyjnych oparto na przygotowanych mapach przestrzennego rozkładu, które po przetworzeniu na postać cyfrową wprowadzono do matryc modelu. Użyte oprogramowanie pozwoliło prawidłowo odwzorować przebiegi linii intersekcyjnych, wynikających z wzajemnego przenikania stropów i spągów kolejnych warstw w przestrzeni 3-D i tym samym uzyskać miąższości poszczególnych warstw modelu (rys. 3).

#### 4. Kalibracja i weryfikacja modelu

Kalibrację i weryfikację numerycznego modelu filtracji (Konikow, 1978) obszaru GZWP 322 wykonano zgodnie ze stanem hydrodynamicznym, wynikającym z rzędnej zwierciadła wód podziemnych w otworach hydrogeologicznych według stanu z 2004 r. W trakcie kalibracji wykonano ok. 250 realizacji obliczeniowych tzw. metodą prób i błędów.

Różnice między położeniem zwierciadła wód podziemnych w otworze hydrogeologicznym a wartościami uzyskanymi w oparciu o badania modelowe mieszczą się w przypadku wszystkich poziomów wodonośnych w granicach 1 metra (rys. 4). Tarowaniu poddane zostały zasadniczo: wielkość efektywnego zasilania i współczynnik poziomej i pionowej filtracji wszystkich warstw, przy czym rozkład współczynnika filtracji warstwy III (jako głównego poziomu użytkowego), a także  $V$  generalnie utrzymano zgodnie z wcześniej opracowanym rozkładem danych wejściowych.





**Rysunek 4.** Zależność obserwowanych ( $H_{obs}$ ) i obliczonych ( $H_{obi}$ ) wartości wysokości hydraulicznej (w m n.p.m.)

**Figure 4.** Relation between observed and calculated values of hydraulic head (in m a.s.l.)

W wyniku kalibracji modelu zmieniono dość znacznie przyjęte początkowo wartości zasilania jako wynik infiltracji i ewapotranspiracji. Jest to obszar o dość niekorzystnych warunkach zasilania, na co wpływ mają: niskie opady, gęsta sieć rzeczna, wysoka ewapotranspiracja, lokalizacja blisko regionalnej strefy drenażu. Ostatecznie uzyskano wartości od  $1 \times 10^{-5}$  do  $2,8 \times 10^{-4}$  m/d. Przy czym średnią wartość utrzymano na poziomie wyjściowym tzn.  $1,6 \times 10^{-5}$  -  $1,2 \times 10^{-4}$  m/d (ok. 6 - 45 mm/a). W strefach alimentacji wartości zasilania osiągają najczęściej wartość  $1-2 \times 10^{-4}$  m/d (~30 - 70 mm/a)

Dla III warstwy modelu, odwzorowującej użytkowy czwartorzędowy poziom międzymorenowy, w wyniku modelowania geostatystycznego uzyskano optymalny rozkład współczynnika filtracji w siatce bloków modelu, który generalnie utrzymano w toku kalibracji. Wartości zmieniają się od 2,4 m/d do 72,6 m/d. Średnia wartość wynosi 14,7 m/d, a odchylenie standardowe 9,38 m/d przy populacji 17 677 danych z bloków obliczeniowych.

## 5. Analiza krążenia i bilans wód podziemnych według numerycznego modelu filtracji

Mapa hydroizohips czwartorzędowych poziomów wodonośnych wykazuje dużą poprawność w odzwierciedleniu strumieni wód podziemnych tego poziomu i jest zgodna z mapą opracowaną na podstawie pomiarów (Krawczyk i in., 2006). Przepływ następuje z N i NE do granicy S/SW obszaru zgodnie z kierunkami cieków powierzchniowych. Przepływ wód podziemnych jest kształtowany przez różnice wysokości hydraulicznej od wartości 209,5 - 192 m n.p.m. na N i NE do 127 - 119,5 m n.p.m. na N/NW obszaru (rys. 5). Wszystkie

główne rzeki wykazują charakter drenujący. W ten sposób został odzwierciedlony na modelu naturalny układ, w którym w strefach drenażu woda z drugiej warstwy ascenzyjnie przesiąka ku warstwie pierwszej, po czym jest drenowana przez ciek. Generalnie odmienny proces występuje w strefach zasilania, tzn. w obszarach wysoczyznowych, gdzie wody infiltrujące poprzez poziom przypowierzchniowy zasilają poziom użytkowy.

Wyznaczony obszar bilansowy GZWP 322 ma powierzchnię 262 km<sup>2</sup>, natomiast obszar modelu obejmuje, ze względu na przyjęte warunki brzegowe, znacznie większą powierzchnię systemu wodonośnego równą 1120 km<sup>2</sup>. Zgodnie z definicją zasoby odnawialne zależą od stopnia odnawialności tj. dopływu z obszarów zasilania, a z drugiej strony od ubytku na skutek naturalnego drenażu do cieków i jezior oraz drenażu sztucznego (ujęcia wód podziemnych) (tab. 1). Średnie zasilanie efektywne w drodze kalibracji modelu określono na  $6,4 \times 10^{-5}$  m/d (~23 mm/rok), co stanowi ok. 3-4% rocznej sumy opadów (570 - 620 mm).

**Tabela 1.** Bilans przepływów wód podziemnych w systemie wodonośnym zbiornika GZWP 322 według badań modelowych dla warunków eksploatacji 2006 r.

**Table 1.** Groundwater balance components within the MGWB 322 according to modeling for exploitation conditions in 2006

Lp.	Składniki bilansu strumienia filtracyjnego	Wyniki modelu [m <sup>3</sup> /d]
1.	Efektywna infiltracja opadów	+16 754
2.	Dopływ/odpływ z zewnętrznych granic obszaru w tym: (poziom użytkowy - warstwa III): - dopływ głównie od N i NE - odpływ głównie ku S i W  (pozostałe warstwy): - dopływ głównie od N i NE - odpływ głównie ku S i W	+15 969,5 / -8 971,7  +11 432,4 -4 638,0  +4 537,1 -4 333,7
3.	Zasilanie/drenaż przez cieki powierzchniowe	+9 163,8 / -16 700,3
4.	Drenaż przez małe cieki, rowy i dreny	-6 039,7
5.	Pobór z ujęć wód podziemnych	-10 176
6.	SUMA +/-	+41 887,3 / - 41887,7
7.	Przesączanie między poziomami (w dół/w górę do w-wy III)	+21 876,8 / -19431,7
8.	Różnica bilansowa (dopływ-odpływ)	-0,4

Obliczony na podstawie symulacji dla warunków ustalonych całkowity moduł odnawialności dla obszaru bilansowego wynosi 1,85 l/s km<sup>2</sup> (6,6 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>). Zasoby odnawialne GZWB 322 jako suma wszystkich dopływów wynoszą 41 887 m<sup>3</sup>/d. Wielkość tych zasobów zależy od infiltracji efektywnej, która stanowi 40% całkowitej odnawialności wód podziemnych, jak też od dopływów bocznych, na które składają się dopływy od wschodu i

od północy. Udział infiltracji wód powierzchniowych jest rzędu 22% ogólnej sumy dodatnich składników bilansu.

### 5.1. Analiza tempa przepływu wód podziemnych w systemie wodonośnym

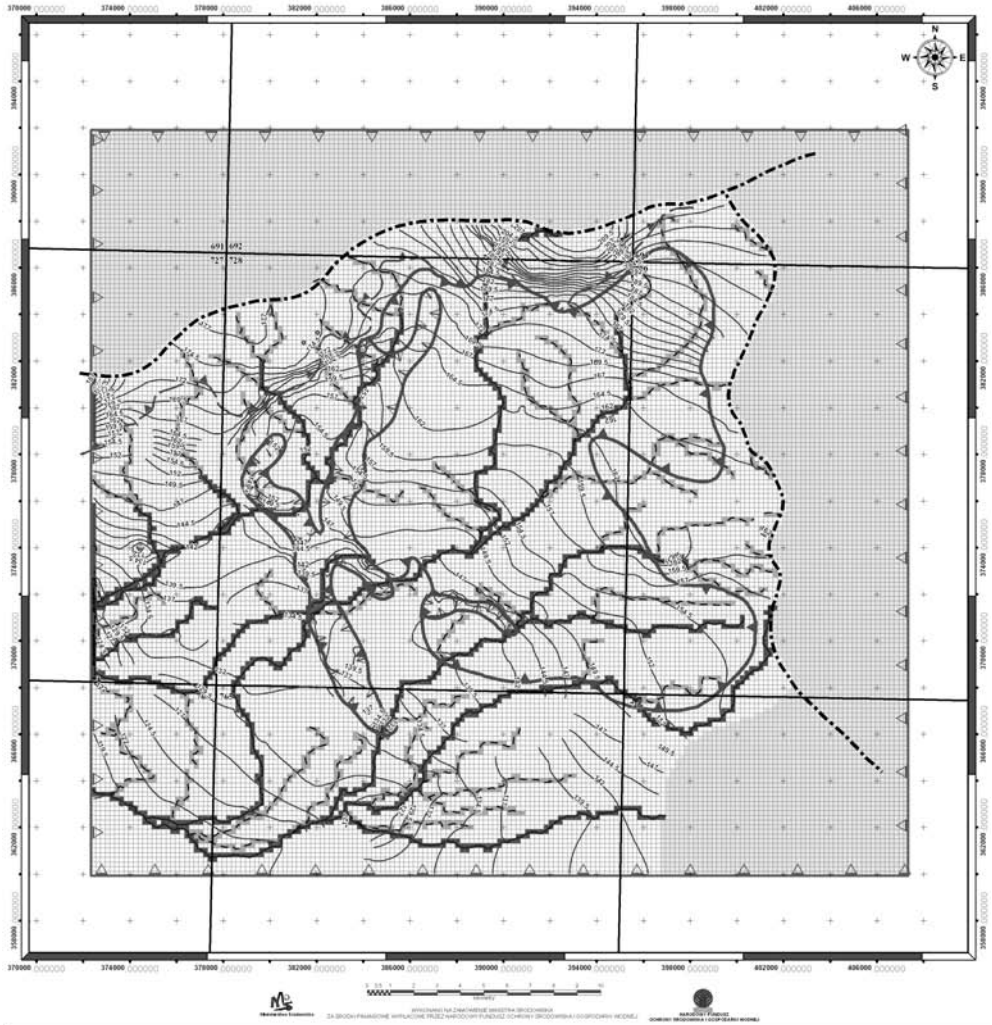
Na wykonanym numerycznym modelu filtracji przeprowadzono także analizę tempa przemieszczania się cząstek obliczeniowych w strumieniu wód podziemnych. W tym celu wykorzystano semi-analityczną metodę śledzenia cząstek na modelu MODPATH (Pollock, 1988, 1994). Wyznaczono 138 cząstek obliczeniowych w rejonie kształtowania się zasobów na N-NE oraz na wschodniej granicy zbiornika. Tory przepływu poszczególnych cząstek są obliczane w kolejnych krokach czasowych (10 lat) i na tej podstawie można określić tempo odnawialności od stref zasilania do stref drenażu, co pozwoliło zweryfikować zasięg proponowanej granicy obszaru ochronnego GZWP nr 322 Oleśnica.

W naturalnych warunkach hydrodynamicznych czas dopływu do wschodniej granicy zbiornika wynosi ok. 20-40 lat natomiast do północnej granicy zbiornika ok. 15-30 lat. W strefie tranzytu, w obrębie użytkowego poziomu wodonośnego (warstwa V) transport konwekcyjny w rejon ujęć w rynnice erozyjnej zajmuje ok. 100-150 lat.

## 6. Podsumowanie badań modelowych









Numeryczny model układu hydrostrukturalnego GZWP 322 jest próbą odtworzenia rzeczywistych warunków przepływu i krążenia wód podziemnych w tym obszarze. Przy aktualnym rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych model uznano za zasadny dla rozwiązania bilansu przepływów wód podziemnych, ochrony zbiornika, a także interpretacji ilościowej zasobów. Schematyzacja warunków hydrogeologicznych dla potrzeb modelu oparta została na wykonanym modelu hydrogeologicznym, ilustrowanym mapami i przekrojami. Dzięki integracji numerycznego modelu z systemem GIS najnowszej generacji możliwe było bardzo dokładne odwzorowanie przestrzennego układu hydrostrukturalnego oraz optymalnych rozkładów parametrów hydrogeologicznych, dzięki czemu w toku kalibracji dokonano jedynie niewielkich korekt współczynników filtracji, decydujących o tempie przepływu wód podziemnych.

Na drodze schematyzacji uzyskano prototyp modelu przestrzennego, trójwymiarowego, 6-cio warstwowego, złożonego z 3 warstw wodonośnych, 2 rozdzielających i podłoża. Wyznaczone w bilansie dopływy lateralne do GZWP 322 wynoszą  $15\,969,5\text{ m}^3/\text{d}$ , a efektywna infiltracja  $16\,754\text{ m}^3/\text{d}$ . Stosunkowo niska wartość wynika z faktu, że większa część obszaru leży w strefie słabo przepuszczalnych glin zwałowych, przy wysokiej ewapotranspiracji. Obliczona wartość odpływu podziemnego, równoznaczna z całkowitą odnawialnością systemu wodonośnego, wynosi  $1,85\text{ l/s km}^2$ .










**OBJAŚNIENIA:**

**WARUNKI BRZEGOWE**

-  siatka dyskretyzacyjna o kroku 200 x 200 m
-  nieaktywna część modelu, Q=0
-  GHB, warunek brzegowy III-go rodzaju
-  Q = const, warunek brzegowy II-go rodzaju
-  RIVERS, Q=f(H) - warunek brzegowy III-go rodzaju
-  DRAINS, Q=f(H) - warunek brzegowy III-go rodzaju
-  rzeki
-  drenaż

**ELEMENTY HYDROSTRUKTURALNE**

-  granica obszaru zaburzeń glaciektonicznych Wzgórz Trzebnickich
  -  zasięg rynien subglacialnych
  -  wododział wód podziemnych
  -  hydroizohipsy
- INNE ELEMENTY**
-  granica i numer arkusza wg Banku Hydro
  -  granica GZWP nr 322 Oleśnica przyjęta w przedmiotowym opracowaniu
  -  granica badań modelowych

**Rysunek 5.** Mapa hydroizohips i warunków brzegowych modelu  
**Figure 5.** Head contour map and boundary conditions of the model

## Literatura

- Anderson M., Woessner W., 1992: *Applied Groundwater Modeling*. Academic Press, Inc., London
- Bear J., Verruijt A., 1994: *Modeling Groundwater Flow And Pollution*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht
- Darr R.E., 1979: *Ground-Water Computer Models - Practical Tools*. Ground Water 17 (2), s. 174-176
- Dąbrowski S., Przybyłek J., 1980: *Metodyka próbnych pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych*. Wyd. Geol., Warszawa
- Hamilton D.A., 1982: *Groundwater Modeling: Selection, Testing and Use*. Vol. 1, Michigan Dept. of National Resources
- Kleczkowski A.S., (red.), 1990: *Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony 1:500 000*. Akademia Górniczo - Hutnicza, Kraków
- Kondracki J., 2001: *Geografia regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa
- Konikow L.F., 1978: *Calibration Of Ground-Water Models. In : Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering*. American Society of Civil Engineers, N.Y., s. 87-93
- Krawczyk J. i in., 1996: Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów wód podziemnych w utworach czwartorzędu, trzeciorzęd i triasu rejonu niecki wrocławskiej z uwzględnieniem GZWP. Arch. P.G. Proxima S.A., Wrocław
- Krawczyk J., Gurwin J., Jednoróg A., Serafin R., Śliwka R., 2006: Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne dla ustanowienia obszaru ochronnego zbiornika wód podziemnych Oleśnica (GZWP nr 322). Arch. P.G. „Proxima” S.A., Wrocław
- Kryza J., Poprawski L., Sachanbiński M., Staško S., Gurwin J., Kryza H., Szponar A., 2001: Dokumentacja hydrogeologiczna: *Analiza aktualnego stanu rozpoznania warunków hydrogeologicznych regionu wrocławskiego oraz wytypowanie zbiorników wód podziemnych i struktur wodonośnych dla alternatywnego zaopatrzenia w wodę miasta Wrocławia*. Arch. ING U. Wr., Wrocław
- Macioszczyk T., 1993: *Oczekiwania a praktyka modelowania bilansów i zasobów wód podziemnych*. ref. z Komisji Dok. Hydrogeol.
- Macioszczyk T., 1997: *Rola przypowierzchniowych poziomów wodonośnych w formowaniu i modelowaniu zasobów wielowarstwowych systemów hydrogeologicznych*. [w:] Współczesne problemy hydrogeologii. T. VIII, Kiekrz k/Poznań, Wyd. WIND-Wrocław, s. 91-94
- Macioszczyk T., Szestakow M., 1983: *Dynamika wód podziemnych – metody obliczeń*. Wyd. Geol. Warszawa
- Margat J., 1976: *Analyse des systemes aquiferes et evaluation des ressources en eau souterraine*. Rapp. BRGM 76 GN 532 AME, Orleans
- McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988: *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, U.S. Geological Survey Open-File Report, Washington.
- Pollock D.W., 1988: *Semianalytical computation of path lines for finite difference models*. Ground Water (26)-6: 743-750

- Pollock D.W., 1994: *User's guide for MODPATH, version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW the U.S. Geological Survey finite-difference groundwater flow model.* Reston, VA. U.S. Geological Survey
- Szymanko J., 1980: *Koncepcje systemu wodonośnego.* Wyd. Geol., Warszawa
- Walton W. C., 1992: *Groundwater Modeling Utilities.* Lewis Publ. Inc., Chelsea
- Wang H.F., Anderson M.P., 1982: *Introduction to Groundwater Modeling.* W.H. Freeman and Co., San Francisco