

## BADANIA MODELOWE WIELOWARSTWOWEGO, PASMOWEGO ZBIORNIKA WÓD PODZIEMNYCH GZWP NR 138 PRADOLINA TORUŃ–EBERSWALDE (NOTEĆ) W CELU OKREŚLENIA JEGO GRANIC, BILANSU ZASILANIA I OBSZARÓW OCHRONNYCH

### MODEL INVESTIGATIONS OF THE MULTI-LAYERED, STREAKED GROUNDWATER RESERVOIR MGWB NO. 138 TORUŃ–EBERSWALDE (NOTEĆ) ICE-MARGINAL VALLEY FOR ESTIMATING ITS BORDERS, BALANCE RECHARGE AND PROTECTION AREAS

STANISŁAW DĄBROWSKI<sup>1</sup>, WITOLD RYNARZEWSKI<sup>1</sup>,  
RENATA STRABURZYŃSKA-JANISZEWSKA<sup>1</sup>, ANDRZEJ PAWLAK<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Badania modelowe są podstawową metodą do wyznaczania granic obszarów ochronnych GZWP, określania zasobów odnawialnych, szacowania zasobów dyspozycyjnych oraz określaniu bilansu zasilania zbiornika. GZWP nr 138 Pradolina Toruń–Eberswalde jest szczególnym przykładem zbiornika pasmowego o dużej długości 140 km i szerokości od 2 do 10 km. Z uwagi na wydłużony kształt i rozprzestrzenienie zbiornika, zmienność hydrostrukturalną oraz związki hydrauliczne z sąsiednimi systemami wykonano trzy oddzielne modele: W – część zachodnia – 1190 km<sup>2</sup>, C – część środkowa – 1200 km<sup>2</sup>, E – część wschodnia – 1080 km<sup>2</sup>. Łącznie badaniami objęto obszar ok. 3470 km<sup>2</sup>, w tym obszar wydzielonego zbiornika wynosi 1863 km<sup>2</sup>. Modele sporządzono dla układu dwóch warstw wodonośnych rozdzielonych warstwą słabo przepuszczalną w warunkach filtracji ustalonej. Pierwsza warstwa reprezentowała użytkowy poziom piętra czwartorzędowego, warstwa druga – poziom mioceński neogenu. W artykule omówiono specyfikę budowy trzech modeli matematycznych dla pasmowej, skomplikowanej struktury hydrogeologicznej. Opisano także sposób łączenia modeli, sporządzania złożonych prognoz i bilansów wód podziemnych dla określenia optymalnego poboru wód przy istniejących ograniczeniach środowiska oraz sposób określenia czasu wymiany wód w zbiorniku.

**Słowa kluczowe:** metody modelowania GZWP, modele regionalne, pradolina Toruń–Eberswalde.

**Abstract.** Mathematical modelling is considered to be the basic method to define borders, balances of the groundwater circulation and borders of protected areas of major groundwater basins (MGWB) in Poland. Marginal valleys are specific because of their regional extension and drainage zones with relation to the adjacent moraine upland. The MGWB No. 138 – Toruń – Eberswalde Ice-Marginal Valley is an example of such a reservoir. It is about 140 km in length and about 2.0–10.0 km in width. The basin is extensive, elongated and connected with surrounding systems. Within the area of this MGWB, 3 separate models were performed: I – in the western part, about 1190 km<sup>2</sup> large, II – in the central area about 1200 km<sup>2</sup> large, and III – in the eastern part, about 1080 km<sup>2</sup> large. Total range of the investigated surfaces was about 3470 km<sup>2</sup>, including the area of groundwater reservoirs of approximately 1863 km<sup>2</sup>. These models consist of 2 aquifers divided by a confined bed. They were developed for the steady flow conditions. The layer I is in the Quaternary multiaquifer formation, while the layer II is in the Miocene–Neogene level. The article presents the specificity of the construction of mathematical models for filtration conditions in widespread areas with a complicated hydrogeological structure. The article also describes the way of merging these three models in order to prepare prognoses and water balances as well as to use these researches to optimize waters withdrawal at the existing environmental limitation.

**Key words:** methods of MGWB modelling, regional models, Toruń–Eberswalde Ice-Marginal Valley.

---

<sup>1</sup> Hydroconsult Sp. z o.o., ul. Smardzewska 15, 60-161 Poznań; e-mail: [poznan@hydroconsult.com.pl](mailto:poznan@hydroconsult.com.pl)

## WSTĘP

Modelowanie matematyczne jest podstawowym badaniem głównego zbiornika wód podziemnych (GZWP) dla określenia jego granic, układu krążenia wód, bilansu ze zróżnicowanych źródeł zasilania, oceny zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych oraz określenia czasu wymiany wód w zbiorniku, czasu przesączania z warstw związanych hydraulicznie i dopływu lateralnego dla wyznaczania obszarów ochronnych. Specyfika badań zbiornika wynika z umownego charakteru jego granic wynikających z kryteriów miąższości i przewodności występujących poziomów wodonośnych. Stąd są to z reguły granice o charakterze hydrodynamicznym, często o odległych strefach zasilania, co wymusza objęcie badaniami dużych obszarów sąsiednich systemów wodonośnych. Dotyczy to zwłaszcza zbiorników pasmowych pradolinnych, będących zwykle regionalnymi, strefowymi obszarami drenaży wód podziemnych, o silnych związkach z wodami rzek. W przypadku zbiornika GZWP nr 138 Pradolina Toruń–Eberswalde dotyczy to pasmowej jednostki o szerokości 2–10 km na długości ok. 140 km. Strukturę hydrogeologiczną tworzy tu wielowarstwowy układ osadów wodonośnych dolin kopalnych oraz fluwioglacjalnych, powiązanych hydraulicznie w jeden system wodonośny, drenowany w holocenijskiej dolinie Noteci. Z drugiej strony, od badań modelowych oczekuje się ilościowego określenia w sys-

temie krążenia czasu wymiany wód i czasu przepływu z poziomów nadległych. Powoduje to, że modele GZWP są modelami regionalnymi, ukierunkowanymi na rozwiązywanie problemów hydrogeologicznych określonego zbiornika o dużej szczegółowości, z uwagi na potrzeby organizacji ochrony wód przed zanieczyszczeniami. Problemy te wystąpiły przy realizacji badań modelowych dla zbiornika GZWP nr 138, których głównymi celami, zgodnie z zatwierdzonym projektem prac geologicznych, były:

- szacunkowa ocena zasobów odnawialnych wód podziemnych GZWP nr 138 według stanu średniego z odtworzenia hydrodynamicznego na 2005 r.;
- symulacja i ocena poboru równego szacunkowym zasobom dyspozycyjnym zbiornika;
- określenie czasu dopływu wody do granic zbiornika w celu ustalenia zasięgu jego obszaru ochronnego.

Badania modelowe wykonano w ramach opracowania „Dokumentacji określającej warunki hydrogeologiczne dla ustanowienia obszaru ochronnego zbiornika wód podziemnych Pradolina Toruń–Eberswalde (GZWP nr 138)”, zrealizowanej w 2005 r. w firmie Hydroconsult Sp. z o.o. w Poznaniu na zamówienie ministra środowiska, a sfinansowanej ze środków NFOŚiGW.

## POŁOŻENIE I UWARUNKOWANIA NATURALNE

GZWP nr 138 ciągnie się pasem szerokości od 3,5 do 12 km wzdłuż pradoliny toruńsko-eberswaldzkiej ze wschodu na zachód, od rejonu Gniewkowo–Bydgoszcz aż po ujście Noteci do Warty w rejonie Santoka, na długości ok. 150 km (Kleczkowski red., 1990). Według ustaleń hydrostrukturalnych, zbiornik ten, zachowując ustalony przebieg z 1990 r., uległ zwężeniu do 2–10 km i skróceniu na wschodzie w rejonie Gniewkowa o ok. 10 km. Jego powierzchnia zmniejszyła się z 2100 do 1863 km<sup>2</sup> (fig. 1).

Obszar ten został ukształtowany w okresie zlodowacenia wisły i holocenu. Pradolina Toruńsko-Eberswaldzka uformowała się głównie w fazie recesji lądolodu fazy poznańskiej i jego postoju w fazie pomorskiej zlodowacenia wisły. Taras zalewowy powstał w fazie schyłkowej zlodowacenia i w holocenie. Obniżenie Noteci od wysoczyzn otaczających odcięte jest krawędzią erozyjną sięgającą 20 m. Plejstocenijskie tarasy erozyjno-akumulacyjne są dobrze rozwinięte we wschodniej i zachodniej części pradoliny, zaś zredukowane w części środkowej. Taras zalewowy w części wschodniej jest wyniesiony ok. 55–60 m n.p.m. i opada w kierunku zachodnim do ok. 40–42 m n.p.m. w rejonie Czarnkowa i do 20–22 m n.p.m. przy ujściu Noteci do Warty.

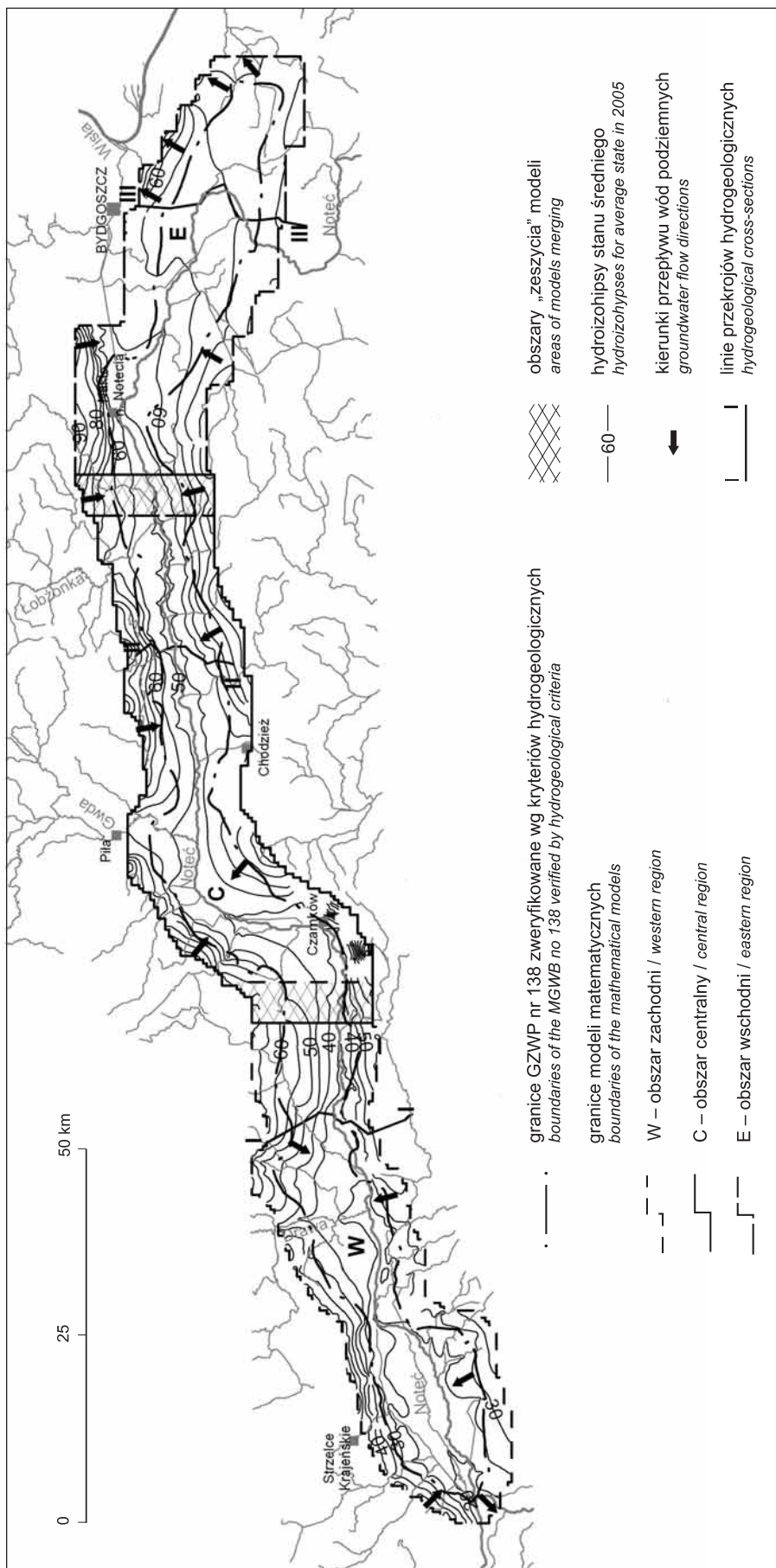
Osią hydrograficzną zbiornika jest Noteć. Na tym odcinku pradolinny sieć hydrograficzna zlewni wykazuje wyraźną asymetrię: większość jej dorzecza stanowią dopływy

z północy – głównie Gwda i Drawa, prowadzące więcej wody niż ciek główny. Ciek dopływający z południa, z wyjątkiem Gąsawki, są ciekami drobnymi, często o zanikającym przepływie w półroczu letnim.

Opady atmosferyczne są zmienne przestrzennie w czasie miesięcy i lat. Średnie sumy opadów z lat 1951–1980 w rejonie GZWP nr 138 wynosiły od 524 mm w Żninie na wschodzie do 570 mm w Drezdenku na zachodzie (Woś, 1994). Średnie sumy opadów z wielolecia 1971–2000 wg danych IMGW Oddz. Poznań, wynosiły od 546 mm w Nowej Wsi Wielkiej w części wschodniej zbiornika do 593 mm w Drezdenku w części zachodniej.

Średnie sumy parowania terenowego dla doliny Noteci, wg danych IMGW Oddz. Poznań z lat 1971–2000, wynoszą rocznie od 468 mm w zachodniej części doliny do 481 mm w części wschodniej. Parowanie jest ponad 3-krotnie większe w półroczu letnim niż w zimowym i wynosi 352–365 mm.

Ze względu na charakter pradoliny jako zatorfionego i zabagnionego głębokiego obniżenia terenowego wykorzystanego przez Noteć, a także skutek zabudowy hydrotechnicznej i zmeliorowania od połowy XIX w. jej terenów mamy do czynienia z zaburzonym i nienaturalnym przepływem cieków. W układzie dopływów do Noteci, zwłaszcza od północy, występuje infiltracja cieków do wód podziem-



**Fig. 1. Mapa lokalizacji badań modelowych**

Location map of the modelling investigation

nych w dolnych ich odcinkach, a w rejonie Żnin–Bydgoszcz mamy do czynienia z przrzutem wody do Brdy, a także licznymi nawodnieniami rolniczymi kompleksów łąk. O przepływach Noteci na tym obszarze decydują jej największe dopływy z północy, tj. Gwda i Drawa.

Z danych o przepływach Noteci w posterunku Ujście, przed ujściem Gwdy, wynika, że obszary wschodnie GZWP nr 138 cechują się średnim niskim miesięcznym odpływem z wielolecia 1971–2000 od 1,47 do 3,29 dm<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>, średnio

2,01 dm<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup> (7,24 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>), który można utożsamiać z odpływem podziemnym z całego systemu wodonośnego (Plenzler i in., 1999; Dąbrowski i in., 2006b). Średni niski roczny odpływ z tego wielolecia 0,94 dm<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup> (3,38 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>) charakteryzuje prawdopodobnie odpływ podziemny z poziomów wodonośnych wgłębnych o regionalnym rozprzestrzenieniu, umniejszony o parowanie w holocenijskiej dolinie Noteci.

## STRUKTURA GEOLOGICZNA I HYDROGEOLOGICZNA ZBIORNIKA

Na mapie obszarów głównych zbiorników wód podziemnych w Polsce (Kleczkowski red., 1990) GZWP nr 138 został wydzielony jako zbiornik pradolinny w strukturze geomorfologicznej i geologicznej Pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej w odcinku doliny środkowej i dolnej Noteci, nazywanym również pradoliną Noteci. Przyjęto wówczas, że struktura hydrogeologiczna piaszczysto-żwirowa o miąższości od 20 do 80 m pochodzi z sedymentacji pradolinnej. Natomiast szczegółowa interpretacja geologiczna w dokumentacji wykazała, że zbiornik GZWP nr 138 tworzy kompleks osadów piaszczysto-żwirowych z całego plejstocenu, pochodzących z dolin kopalnych z interglacjałów ferdynandowskiego, mazowieckiego, eemskiego i współczesnych z okresu zlodowacenia wisły i holocenu, oraz osadów wodnolodowcowych ze zlodowaceń południowopolskich, środkowopolskich i zlodowacenia wisły (fig. 2). W wyniku intensywnej erozji w okresach interglacjałowych osady lodowcowe glin morenowych, ilów i mułków, w większości w rejonie obniżenia pradolinnego ukształtowanego od interglacjału wielkiego, były usuwane, natomiast przyrastały osady piaszczysto-żwirowe.

W części wschodniej zbiornika występują największe kompleksy osadów rzecznych i wodnolodowcowych od zlodowaceń południowopolskich po holocen, o miąższości 30–80 m. W części zachodniej utwory piaszczysto-żwirowe mają mniejszą miąższość (do 30 m) i są głównie wieku od interglacjału eemskiego po holocen, a tylko lokalnie również z interglacjału mazowieckiego.

Osady rzeczne pradoliny zostały złożone w głębokim erozyjnym obniżeniu o rozciągłości równoleżnikowej. W zakresie miąższości i przewodności nie odpowiadają one kryterium GZWP na większości jego obszaru. Miąższość osadów

stricte pradolinnych waha się od 2 do 15 m, w tym dla dolin holocenijskich od 0,5 do 10,0 m. Główne parametry obszaru zbiornika przedstawiono w tabeli 1.

GZWP nr 138 zasilany jest z trzech głównych źródeł:

- infiltracji opadów, średnio 7,1 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>,
- przesiąkania z podległego poziomu miocenijskiego, średnio 3,65 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>,
- dopływów bocznych z północy i południa, częściowo zależnych od eksploatacji tego poziomu poza zbiornikiem.

Istniejący układ krążenia wód podziemnych zbiornika uwarunkowany jest położeniem terenów zasilania na przyległych wysoczyznach i drenażem w dolinie Noteci w jego partii centralnej (fig. 1). Układ ten ma charakter zbliżony do naturalnego, gdyż wywołane eksploatacją obniżenia poziomów wód są z reguły mniejsze od 1 m i mieszczą się w przedziale naturalnych wahań wynikających z warunków hydrometeorologicznych. W wyniku tego silnego naturalnego drenażu poziomy wód w dolinie Noteci stały się w strefach krawędziowych poziomami swobodnymi. Czwartorzędowy poziom podglinowy (wgłębny) wykazuje w dolinie holocenijskiej niewielkie ciśnienie artezyjskie.

Średni moduł zasilania z infiltracji opadów tego różnowiekowego poziomu wodonośnego zbiornika w obszarze wykonanych badań modelowych wyniósł 8,3 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>.

W podłożu GZWP występuje regionalny zbiornik wód podziemnych piętra neogeńskiego – miocenu. Poziom ten budują piaski drobnoziarniste, miejscami pylaste, lokalnie ze znacznym udziałem piasków średnioziarnistych i piasków ze żwirem o miąższości od 10 do 50 m, najczęściej 20–40 m. Współczynnik filtracji warstw piasków drobnych i pylastych

Fig. 2. Przekroje hydrogeologiczne

Stratigrafia: Q – czwartorzęd; B, Ś, P – odpowiednio zlodowacenia: wisły, środkowopolskie, południowopolskie, Ee, Ma – odpowiednio interglacjały: eemski, mazowiecki; N – neogen; M<sub>3</sub> – miocen górny, M<sub>1+2</sub> – miocen dolny i środkowy; Pg – paleogen, K – kreda, J – jura; osady: gz – lodowcowe, fg – wodnolodowcowe, f – rzeczne, e – eoliczne

### Hydrogeological cross-sections

Stratigraphy: Q – Quaternary; B – Vistulian Glaciation, Ś – Middle Polish Glaciations, P – South Polish Glaciations, Ee – Eemian Interglacial, Ma – Mazovian Interglacial, N – Neogene; M<sub>3</sub> – Upper Miocene, M<sub>1+2</sub> – Lower and Middle Miocene, Pg – Paleogene, K – Cretaceous, J – Jurassic; deposits: gz – glacial deposits, fg – glaciofluvial deposits, f – fluvial deposits, e – aeolian deposits



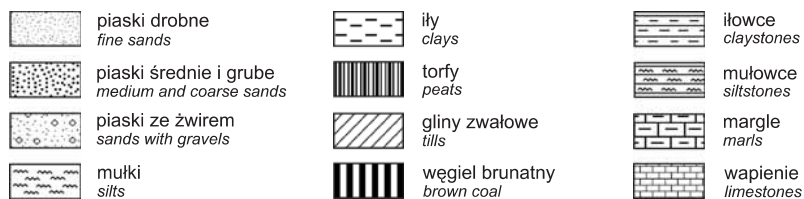
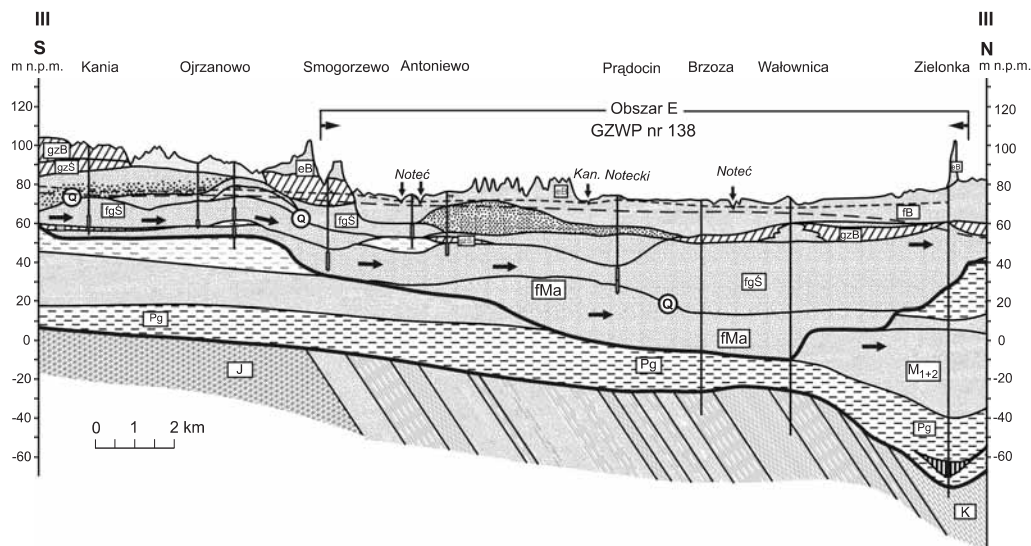
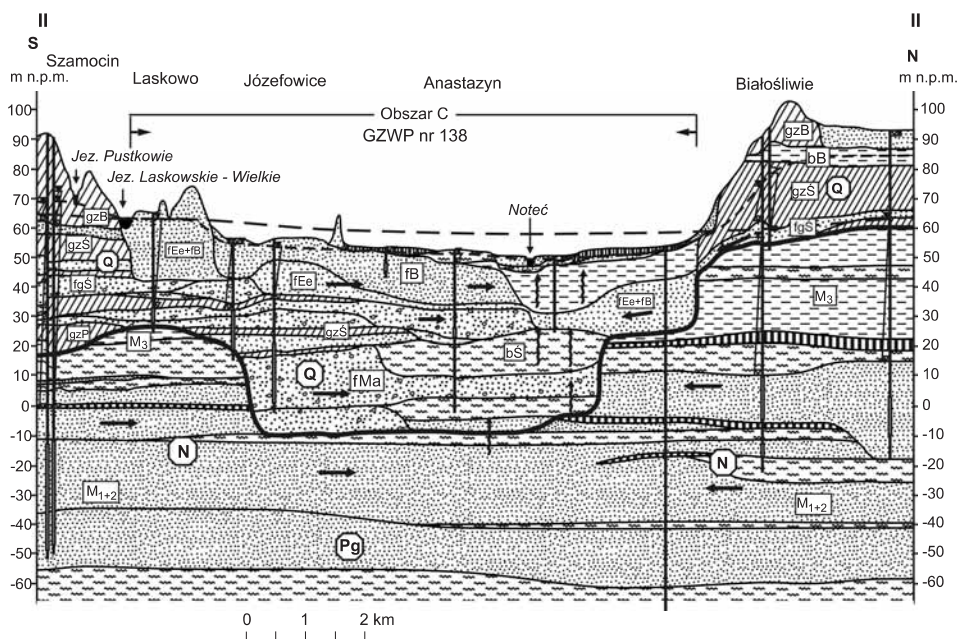
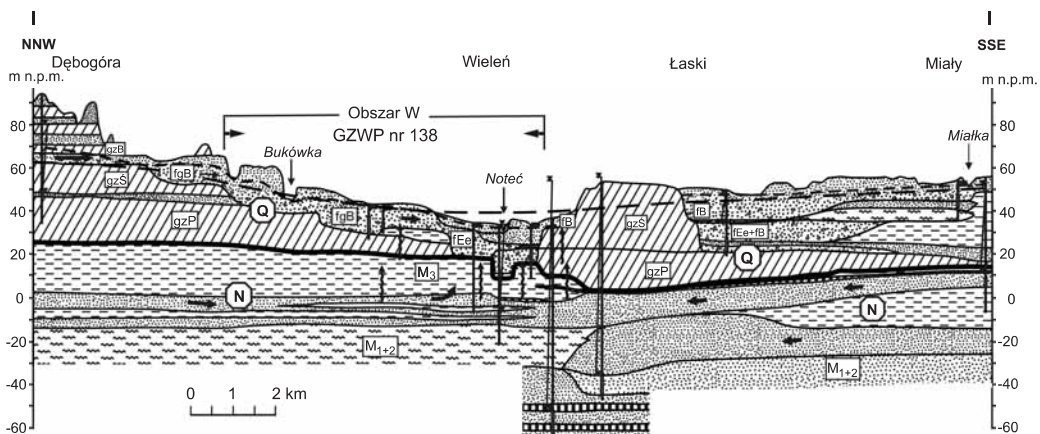


Tabela 1

**Główne parametry GZWP nr 138 Pradolina Toruń–Eberswalde (Noteć)**  
Basic parameters of MGWB No. 138 Toruń–Eberswalde (Noteć) Ice-Marginal Valley

Parametry	Część zachodnia F = 590 km <sup>2</sup>	Część środkowa F = 876,8 km <sup>2</sup>	Część wschodnia F = 396,2 km <sup>2</sup>
Położenie fizyczno-geograficzne i geomorfologiczne	pradolina i równiny sandrowe wysoczyzn od N	pradolina i przyległe wysoczyzny od N i S	pradolina
Poziomy wodonośne GZWP	gruntowy, lokalnie międzyglinowy górny i dolny	gruntowy i międzyglinowy dolny	gruntowy i międzyglinowy dolny
Rodzaj utworów wodonośnych	piaski różnoziarniste, piaski ze żwirem i żwiry	piaski ze żwirem, piaski różnoziarniste (średnie i drobne) i żwiry	żwiry, piaski ze żwirem, piaski różnoziarniste
Facje i wiek utworów	fH, fB, fEe, fMa, fgB, fgŚ, fgP	fH, fB + Ee + Ma, fgB, fgŚ	fH, fB, Ee, Ma, fgB + fgŚ
Miaższość utworów (w nawiasie najczęstsza) zbiornika	7–43, lok. 70 (20–35)	15–70 (20–60)	30–80 (30–60)
Współczynnik filtracji [m/h]	0,3–5,0 (0,5–2,0)	0,2–5,0 (0,3–2,5)	0,3–5,0 (0,3–1,5)
Przewodność [m <sup>2</sup> /h]	5–119 (20–25)	5–108 (30–40)	5–134 (35–45)
Charakter zwierciadła wody	swobodny, lokalnie naporowy	swobodno-naporowy	swobodny, lokalnie naporowy
Zasilanie w 2005 r.			
a) z infiltracji opadów [m <sup>3</sup> /h] [m <sup>3</sup> /h km <sup>2</sup> ]	426 17,22	547 56,25	350 68,85
b) z przesączania z poziomu mioceńskiego [m <sup>3</sup> /h] [m <sup>3</sup> /h km <sup>2</sup> ]	285 64,84	407 34,65	284 0,72
Eksploatacja ujęć w 2005 r. [m <sup>3</sup> /h]	149,0	246,0	142,0
Drenaż cieków i jezior [m <sup>3</sup> /s]	2,92	7,79	1,15

H – holocen, zlodowacenia: B – wisły, Ś – środkowopolskie, P – południowopolskie; interglacjalny: Ee – eemski, Ma – mazowiecki; f – osady rzeczne, fg – osady wodnolodowcowe

wynosi 0,1–0,3 m/h, zaś piasków średnioziarnistych i piasków ze żwirem 0,5–1,1 m/h. Przewodność poziomu wynosi od 0,2 do 31,2 m<sup>2</sup>/h, najczęściej 5–10 m<sup>2</sup>/h. Jest to poziom o ciśnieniu subartezyjskim i artezyjskim, o zasobności sprężystej 0,0004–0,0009.

Poziom ten jest zasilany na drodze przesączania się wód z poziomów czwartorzędowych w obrębie wysoczyzn przy-

ległych od północy i południa do pradoliny, zaś drenowany w obrębie pradoliny, a głównie we współczesnej dolinie Noteci.

Według badań modelowych zasilanie infiltracyjne w formie modułowej wynosi 1,33 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup> dla całego obszaru badań, najniższe jest w części zachodniej (0,65–1,11 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>), najwyższe w części wschodniej (2,34 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>).

## MODEL MATEMATYCZNY OBSZARU ZBIORNIKA

Ze względu na odrębność warunków hydrostrukturalnych, zmienność układów krążenia, wykorzystanie wód i związki z systemami sąsiednimi, a także przestrzenną rozciągłość obszaru i specyfikę topograficzną obszar badań podzielono na trzy części – podsystemy wodonośne (fig. 1):

- W – część zachodnia o powierzchni ok. 1190 km<sup>2</sup>,
- C – część środkowa o powierzchni ok. 1200 km<sup>2</sup>,
- E – część wschodnia o powierzchni ok. 1080 km<sup>2</sup>.

W sumie badaniami modelowymi objęto obszar ok. 3470 km<sup>2</sup>, przekraczając prawie dwukrotnie obszar GZWP, z uwagi na konieczność oddalenia granic zbiornika odwzorowanych warunkami I rodzaju. Przyjęto schemat modelu

matematycznego zbiornika i jego otoczenia w układzie dwóch warstw wodonośnych rozdzielonych warstwą słabo przepuszczalną, powiązanych hydraulicznie z wodami powierzchniowymi:

- I warstwa wodonośna – poziom gruntowy i międzyglinowy dolny w pradolinie oraz międzyglinowy dolny i podglinowy w obszarach przyległych,
- II warstwa słabo przepuszczalna – gliny, muły i ropy różnowiekowe,
- III warstwa wodonośna – poziom mioceński neogenu.

Warstwa I ma charakter swobodno-naporowy, zaś warstwa III – naporowy.

Granice modelowanych warstw na brzegach modelu były umowne i przyjęte na strumieniach wód podziemnych odpływających lub dopływających, gdzie zadano warunki brzegowe I rodzaju. Badania modelowe wykonano dla warunków filtracji ustalonej.

Wyróżnione warstwy wodonośne zostały opisane przez następujące parametry hydrogeologiczne: I warstwa – współczynnik filtracji, strop warstwy, spąg warstwy, ciśnienie  $H$ , wydatki wody  $Q$ , III warstwa – przewodność, ciśnienie  $H$ , wydatki wody  $Q$ , a warstwa II słabo przepuszczalna – przewodność pionowa  $k'/m'$  ( $k'$  – współczynnik filtracji,  $m'$  – miąższość warstwy). Powyższe dane przedstawiono w postaci map i modelu hydrogeologicznego dla każdej części zbiornika.

Modele matematyczne dla poszczególnych podsystemów wodonośnych W, C i E zbudowano za pomocą programu obliczeniowego z biblioteki HYDRYLIB, blok programowy SW2H, dla kwadratowej siatki dyskretyzacyjnej ( $\Delta x = \Delta y = 500$  m), dla warunków ustalonego przepływu wód podziemnych (Szymanko i in., 1981). Program ten pozwala rozwiązać zagadnienie filtracji wód w układzie dwóch warstw wodonośnych (I i III) w warunkach stacjonarnych.

Warunki brzegowe rozwiązań modelowych były następujące:

I rodzaju –  $H = \text{const}$  – zadawane na granicy dopływów, odpływów na strumieniach wód podziemnych,

II rodzaju (typ 2) – odwzorowujące wielkości infiltracji efektywnej opadów lub parowania, (typ 22) – wielkości eksploatacji wód podziemnych,

III rodzaju – odwzorowujące związki cieków z warstwą wodonośną.

Przykład zadanych warunków brzegowych w modelach matematycznych dla warstwy I przedstawiono na figurze 3.

Za warunki początkowe rozwiązań modelowych przyjęto stany wód uśrednione na 2005 r., stwierdzone pomiarami zwierciadła wody i z danych archiwalnych z wielolecia, od lat 70. XX wieku. Traktowano je umownie jako stacjonarne, choć ulegają one zmianom naturalnym w cyklach zasilania rocznego i wieloletniego o amplitudzie do 0,9–1,2 m (dane z obserwacji stacjonarnych PIG Warszawa) oraz zmianom wywołanym przez eksploatację.

Kalibracja modelu została przeprowadzona drogą kolejnych przybliżeń, tzw. metodą prób i błędów, na stany wód odwzorowane mapami hydroizohips, przy wykorzystaniu wybranych otworów jako tzw. punktów reperowych. Kryterium poprawności uzyskiwanych wyników były:

- uzyskanie zgodności modelu matematycznego i hydrogeologicznego w zakresie powierzchni piezometrycznej warstw wodonośnych dla przyjętej dokładności ich odwzorowania,  $\pm 1,0$  m, tj. wielkości naturalnej amplitudy wahań zwierciadła wód badanych poziomów z wielolecia;

- porównanie określonych przepływów podziemnych cieków z badań hydrologicznych dla Noteci i jej dopływów (ocena IMGW w Poznaniu) z uzyskanymi na modelu;

- porównanie wyników oceny infiltracji z badań modelowych i ich odniesienie do wyników badań sąsiednich systemów wodonośnych i w rejonie systemu (Dąbrowski i in., 1999, 2006a, b).

Wiarygodna ocena wpływu eksploatacji wód podsystemów (modeli) E i W na model centralny C i odwrotnie wymagała objęcia badaniami modelowymi dużych sąsiednich obszarów i przyjęcia granicy bilansowej. Zastosowano tzw. zszywanie modeli, polegające na badaniu wielkości wpływu jednego modelu na drugi (tu na odległości ok. 5,5 km) dla oceny oddziaływania podsystemów (modeli) na siebie i ustalenia bilansów w obszarach ich granic. Praktycznie następowało to poprzez określenie wielkości ciśnienia na granicach modeli odwzorowywanych warunkami I rodzaju. Uzyskano je metodą przybliżeń w kolejnych symulacjach uwzględniających zmiany wielkości  $H$  w poszczególnych modelach. W obszarach „zszywania” określone położenie zwierciadła wody z rozwiązania modelowego na jednym z modeli, w oddaleniu od warunków brzegowych I rodzaju, a w miejscu zachowania warunków brzegowych I rodzaju drugiego modelu stawało się dla niego ciśnieniem wyjściowym przy kolejnej symulacji i na odwrót. Operację wiązania wyników dokonywano metodą kolejnych przybliżeń przez wykonywanie symulacji eksploatacji ze zmianami położenia zwierciadła wody w warstwach wodonośnych modelu. W efekcie otrzymano wyniki dla granic poszczególnych modeli różniące się dla zwierciadeł wody poniżej  $\pm 0,5$  m, przy dodatkowych 5–6 symulacjach. W sumie operacja dała wynik podobny do tego, jaki można uzyskać wykonując jeden model matematyczny dla całego systemu.

#### MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU KRĄŻENIA WÓD ODNIESIONY DO STANU Z 2005 R.

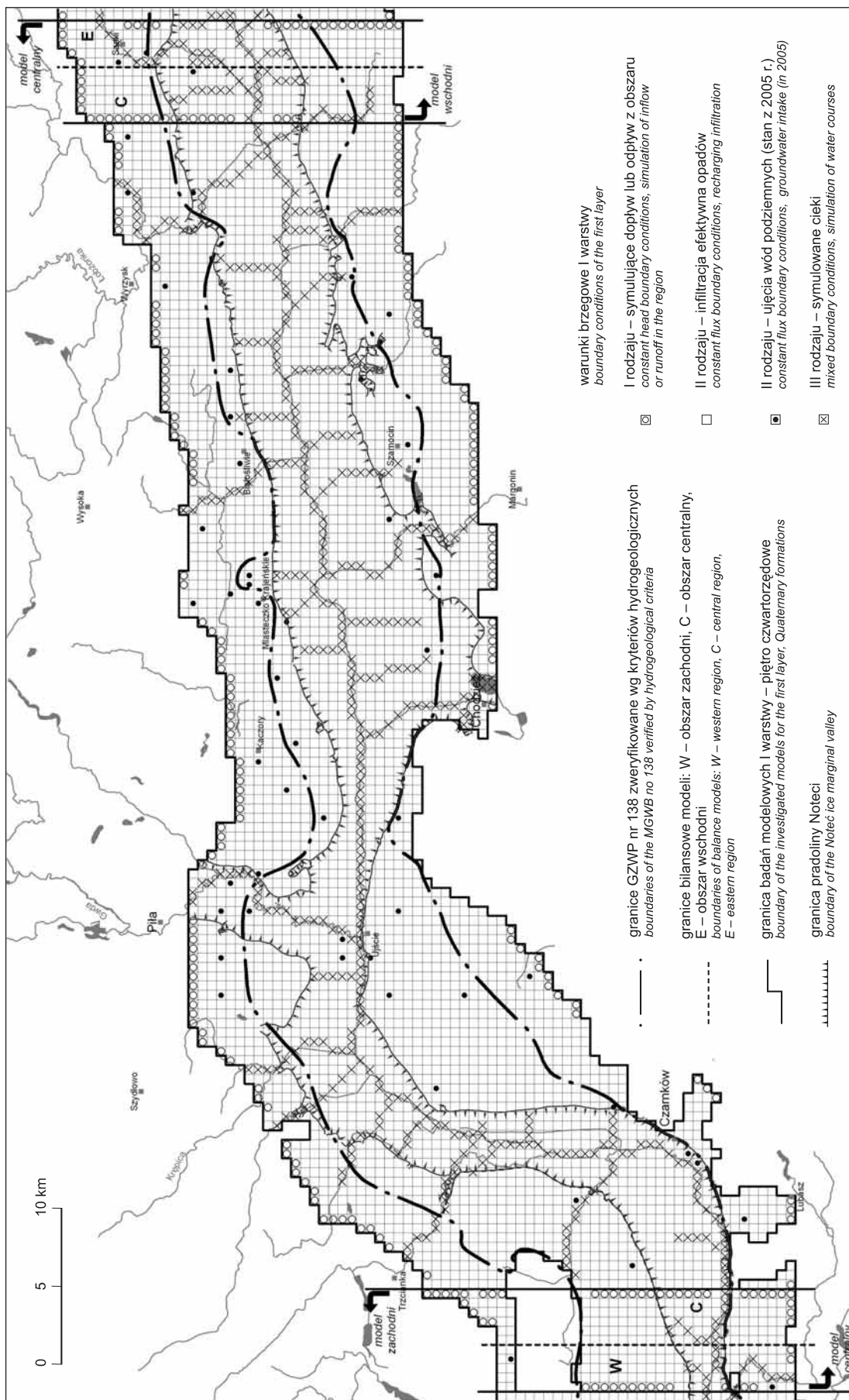
Model ten, uzyskany w procesie identyfikacji i tarowania, odzwierciedlają parametry:

- współczynnik filtracji I warstwy: 0,3–5,5 m/h, najczęściej 0,5–2,1 m/h;
- warstwa II słabo przepuszczalna:  $k'/m'$  od  $7,5 \cdot 10^{-7}$  do  $1,8 \cdot 10^{-3}$  1/h;
- przewodność III warstwy: 0,2–31,1  $\text{m}^2/\text{h}$ , najczęściej 8,0–10,0  $\text{m}^2/\text{h}$ .

Wytarowane wielkości oporów filtracyjnych między ciekami a I warstwą wodonośną zawarte są w przedziałach od  $110^{-5}$  do  $710^{-3}$  1/h. Średnia wartość infiltracji efektywnej opadów uzyskana na modelu wynosi  $7,49 \text{ m}^3/\text{h km}^2$  dla całego obszaru, w tym  $7,1 \text{ m}^3/\text{h km}^2$  dla obszaru GZWP nr 138, a bez bloków warunków I i III rodzaju  $8,6 \text{ m}^3/\text{h km}^2$ . Bilans krążenia wód dla całego modelowanego obszaru przedstawiono na figurze 4.

W obrębie zbiornika GZWP nr 138 Pradolina Toruń–Eberswalde (Noteć) pobór wód podziemnych z utworów czwartorzędowych stanowi 3%, a z poziomu mioceńskiego 8% odnawialności zasobów zbiornika. W całym rejonie przeważają małe, rozproszone ujęcia o pobore do  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ .





**Fig. 3. Mapa warunków brzegowych modelu matematycznego obszaru centralnego GZWP nr 138 Pradolina Toruń–Eberswalde (Notec) z fragmentami „zszycia” z modelami obszarów zachodniego i wschodniego**

Boundary conditions map for the mathematical model in the central area of MGWB no 138 Toruń-Eberswalde (Noteć) Ice-Marginal Valley with examples of connections between the western and eastern areas



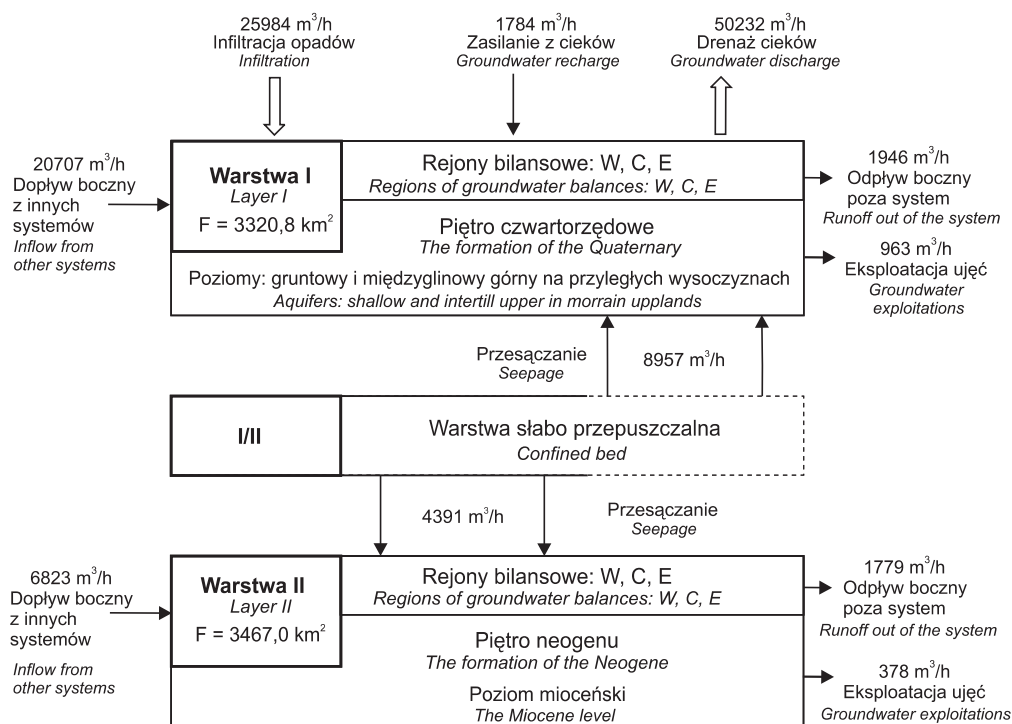


Fig. 4. Schemat modelu matematycznego GZWP nr 138 Pradolina Toruń–Eberswalde (Notec) wraz z bilansem przepływów wód wg stanu średniego z 2005 r.

A scheme of mathematical model for the MGWB no. 138 Toruń–Eberswalde (Notec) Ice-Marginal Valley with balance of groundwater flow for average state in 2005

#### PROGNOZY MODELOWE SZACUNKOWEJ WIELKOŚCI ZASOBÓW DYSPOZYCYJNYCH

Celem tych prognoz była ocena optymalnego wykorzystania zasobów odnawialnych zbiornika dla potrzeb gospodarczych, przy uwzględnieniu ograniczeń ich wykorzystania, tj. ocena zasobów dyspozycyjnych w obszarze wydzielonych rejonów bilansowych w częściach W – zachodniej i E – wschodniej. Prognozy te wykonano na bazie modelu stanu eksploatacji z 2005 r. Przyjęto następujące kryteria optymalizacji tej eksploatacji:

- wielkość odnawialności wód podziemnych zbiornika wg stanu na 2005 r.,
- zachowanie przepływu nienaruszalnego w Noteci – 0,5 NNQ (Ujście – 10,45 m<sup>3</sup>/s, Nowe Dresdenko – 20,35 m<sup>3</sup>/s),
- kryterium hydrogeologiczne – ograniczenie wielkości depresji do 1/3 H w przypadku warstwy swobodnej i 0,5 H dla warstwy napiętej,
- kryterium środowiskowe, związane z obszarami Natura 2000 i łąkami – wielkość obniżenia zwierciadła wody do 1 m, tj. wielkość wahań naturalnych.

Symulowano eksploatację istniejących ujęć w wielkości poboru z 2005 r. oraz dodatkowo eksploatację dla 37 dużych ujęć o łącznym poborze 5030 m<sup>3</sup>/h – część zachodnia i 3000 m<sup>3</sup>/h – część wschodnia. Przy symulacji zasobów wzięto pod uwagę, aby ujęcia występowały w rejonach o przewodności powyżej 20 m<sup>2</sup>/h, spełniających wymogi do budowy średnich i dużych ujęć wód podziemnych.

Przy wielkości eksploatacji jak wyżej, rozłożonej przestrzennie, depresje rejonowe względem stanu eksploatacji z 2005 r. wyniosły od 1,6 do 5,2 m w części zachodniej zbiornika i od 1,4 do 5,1 m w części wschodniej i nie przekraczały przyjętych ograniczeń na obszarach Natura 2000. Nastąpi zmniejszenie przepływów cieków (głównie Noteci i jej kanałów) i zwiększenie zasilania do 3721 m<sup>3</sup>/h.

#### Obliczenie czasu wymiany wód i określenie 25-letniego czasu dopływu wody do zbiornika z otoczenia

Do tego celu wykorzystano program DRSW z biblioteki HYDRYLIB. Algorytm liczenia czasu wymiany wód w bloku modelowym jest następujący:

$$t = \frac{V \cdot n}{Q_{wp}}$$

gdzie:

- $V$  – objętość bloku =  $Fm$ , [m<sup>3</sup>],
- $F$  – powierzchnia bloku, [m<sup>2</sup>],  $m$  – miąższość, [m],
- $n$  – porowatość efektywna, [-],
- $Q_{wp}$  – wydajność dopływu wody do bloku z sąsiednich 1–4 liczona jest w blokach, w których nie ma studni ani warunku III rodzaju, według następującego schematu, [m<sup>2</sup>/T]:  
jeżeli  $h_i > h_{i-1}$  kol wtedy  $Q_{1i} = t_{\text{średnie}} \cdot (h_i - h_{i-1 \text{ kol}}) / 2$   
jeżeli  $h_i > h_{i-1}$  wtedy  $Q_{2i} = t_{\text{średnie}} \cdot (h_i - h_{i-1}) / 2$

$$\begin{aligned} \text{jeżeli } h_i > h_{i+1} \text{ wtedy } Q_{3i} &= t_{\text{średnie}} \cdot (h_i - h_{i+1})/2 \\ \text{jeżeli } h_i > h_{i+1\text{kol}} \text{ wtedy } Q_{4i} &= t_{\text{średnie}} \cdot (h_i - h_{i+1\text{kol}})/2 \\ Q_{\text{wpi}} &= Q_{1i} + Q_{2i} + Q_{3i} + Q_{4i} \end{aligned}$$

W przypadku układów wielowarstwowych dochodzą jeszcze opcjonalnie przepływy z góry ( $Q_{g\downarrow}$ ) i dołu ( $Q_{d\downarrow}$ ).

Analiza czasu wymiany wód na liniach prądu do określonych granic pozwala określić czas pionowego dopływu do nich.

## OCENA WIARYGODNOŚCI MODELU I JEGO WYKORZYSTANIA DLA POTRZEB OCHRONY ZBIORNIKA

Stopień rozpoznania geologicznego i hydrogeologicznego zbiornika GZWP nr 138 nie jest równomierny. Część wschodnia zbiornika jest lepiej rozpoznana (bardziej rozwinięte osadnictwo, większe uprzemysłowienie), część zachodnia rozpoznana jest słabo (przewaga lasów). Obszar zbiornika jest zróżnicowany i niejednorodny pod względem budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych. Dokładność rozpoznania warunków naturalnych w zakresie układu krążenia wód zbiornika utrudnia uregulowanie Noteci, która jest osią jego drenażu na większości obszaru. Rzeka jest skanalizowana na całym odcinku, a tereny objęte melioracją występują w prawie całym jej biegu. Stwarza to trudności w bilansowaniu i ocenie zasobów wód podziemnych w powiązaniu z zasobami wód powierzchniowych.

Uzyskane w badaniach modelowych dla GZWP nr 138 wyniki wielkości odnawialności zasobów są w dużym stopniu zbieżne z wynikami uzyskanymi dla badanych rejonów przyległych, a także z wynikami odnawialności określonej z odpływu podziemnego Noteci. Świadczą one o dużej wiarygodności modelu, mimo że dotyczy on specyficznej strefy obejmującej w większości obszary regionalnego drenażu wód podziemnych w obniżeniu doliny – pradoliny na długości ok. 140 km.

Realizacja powyższego wymagała przygotowania dodatkowych tablic parametrów: porowatość efektywna warstwy wodonośnej i miąższość warstwy wodonośnej dla poszczególnych modeli warstwy I. Wynik obliczeń stanowi tablica „tw” – czasu wymiany wód. Określono czas dopływu wody do granic zbiornika dla wyznaczenia obszarów ochronnych.

Określona w badaniach modelowych odnawialność zasobów, traktowana jako infiltracja opadów i przesączanie z poziomu mioceńskiego, dla wydzielonych części GZWP nr 138 wynosi: część zachodnia – 2,09 m<sup>3</sup>/s (12,72 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>), część wschodnia – 1,12 m<sup>3</sup>/s (10,21 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>). Dla poziomu mioceńskiego w rejonie zbiornika moduł odnawialności (infiltracja opadów + przesączanie z piętra czwartorzędowego) wynosi 1,33 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup>. Uzyskane moduły odnawialności są zbliżone do modułów odnawialności w badaniach modelowych dla rejonów przyległych lub obejmujących częściowo GZWP nr 138, gdzie wynoszą:

- rejon Bydgoszczy: 9,83 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup> poziomy czwartorzędowe, 1,46 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup> poziom mioceński;
- rejon Piły: 11,31 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup> poziomy czwartorzędowe, 1,44 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup> poziom mioceński;
- rejon Nakła: 10,5 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup> poziomy czwartorzędowe, 2,5 m<sup>3</sup>/h km<sup>2</sup> poziom mioceński.

Sporządzony model numeryczny może służyć do celów gospodarowania zasobami wód podziemnych w obszarze pradoliny, a także być przydatny przy ustalaniu stref ochronnych ujęć, jak również rozstrzygać kwestie ochrony zbiornika przy dalszym, bardziej szczegółowym jego rozpoznaniu.

## LITERATURA

- DĄBROWSKI S. i in., 1999 – Aneks nr 1 do dokumentacji p.t. „Optymalizacja zasobów wód podziemnych ujęcia komunalnego na tle ujęć w rejonie miasta Bydgoszczy oraz ustalenie stref ochronnych ujęcia „Las Gdański“, zawierający ustalenie zasobów wód podziemnych z utworów czwartorzędowych, trzeciorzędowych i kredowych. Arch. Hydroconsult Sp. z o.o., Oddział w Poznaniu.
- DĄBROWSKI S. i in., 2006a – Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów eksploatacyjnych komunalnego ujęcia wód podziemnych „Bielawy” z utworów czwartorzędowych dla m. Nakła nad Notecią. Arch. Hydroconsult Sp. z o.o., Poznań.
- DĄBROWSKI S. i in., 2006b – Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne dla ustanowienia obszaru ochronnego zbiornika wód podziemnych Pradolina Toruń–Eberswalde (GZWP nr 138). Arch. Hydroconsult Sp. z o.o., Poznań.
- HERBICHP., DĄBROWSKI S., NOWAKOWSKI C., 2003 – Ustalenie zasobów perspektywicznych wód podziemnych w obszarach działalności Regionalnych Zarządów Gospodarki Wodnej. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.), 1990 – Mapa Obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony, skala 1:500 000. AGH, Kraków.
- PLENZLER W. i in., 1999 – Bilans wód powierzchniowych wraz z określeniem zasobów dyspozycyjnych dla dorzecza Górnej Noteci. Arch. IMiGW, Oddz. w Poznaniu.
- SZYMANKO J. i in., 1981 – Zastosowanie modelowania matematycznego do badań bilansu wód podziemnych. Blok programowy SWW2. Wyd. Geol. Warszawa.
- WOŚ A., 1994 – Klimat Niziny Wielkopolskiej. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.

## SUMMARY

The paper has been prepared within the framework of the project "Documentation defining hydrogeological conditions for the delimitation of the protected area of the groundwater reservoir MGWB No. 138 Toruń–Eberswalde (Noteć) Ice-Marginal Valley", conducted by Hydroconsult Sp. z o.o. in Poznań in 2005. The project was ordered by the Minister of the Environment and financed by NFOŚiGW.

This groundwater reservoir was defined on the map of the critical protection areas of the major groundwater basin (MGWB) in Poland by Kleczkowski (1990). This MGWB is located in the central and lower parts of Noteć River valley, called the Noteć Ice-Marginal Valley. It is supposed that the hydrogeological structure originated from ice-marginal valley deposition. The hydrogeological structure is composed of sand and gravel, about 20 to 80 metres in thickness.

Detailed geological research showed that the MGWB is an extensive groundwater reservoir. It is about 2.0–10.0 km in width and about 140 km in length. It is a multilayer hydrogeological reservoir consisting of buried and glaciofluvial valleys. These layers are connected to form a single hydrogeological system which is drained by the Holocene valley of Noteć River. The actual groundwater circulation system is dependent on the area of groundwater recharge situated in purlieu of moraine uplands and it drains the central part of the Noteć valley (Fig. 1). The average effective infiltration coefficient for this groundwater reservoir is  $8.3 \text{ m}^3/\text{h km}^2$  in the study area. Three models have been developed for the MGWB no 138 Toruń–Eberswalde (Noteć) Ice-Marginal Valley because of separate hydrostructural conditions, variability of the groundwater circulation systems, different groundwater exploitation, connections with other systems, and a widespread shape of the groundwater reservoir and its specific topography. These are the following models:

- I. W – western part – area about  $1190 \text{ km}^2$
- II. C – central part – area about  $1201 \text{ km}^2$
- III. E – eastern part – area about  $1076 \text{ km}^2$

The area of model investigations covers about  $3467 \text{ km}^2$ . It is almost twice as large as the area of the MGWB no 138 because constant-head boundary conditions are far away from the borders of the groundwater reservoir.

The scheme of mathematical model for the basin and its surroundings consists of two aquifers divided by a confined bed and connected with surface water.

– I layer – unconfined and confined aquifer, it is a Quaternary shallow and inter-till aquifer,

– II layer – confined Miocene aquifer.

Borders of the model's layers are conventional and follow inflow or runoff groundwater flows. The constant-head boundary conditions are presented in Fig. 3.

Mathematical models for the W, C and E aquifer systems were developed using the computational program HYDRYLIB, bucket SW2H for the square digitalization ( $x = y = 500 \text{ m}$ ) net and for standing flow conditions.

The initial conditions for the mathematic models were assumed as average groundwater levels in 2005. The groundwater levels were measured, and archival data from 70 years of the 20th century were gathered. These conditions were treated conventionally as stationary, though the groundwater levels show natural changes in a year or several years cycles of the amplitude up to 0.9–1.2 m.

Three models were used in this project, subsequently merging them. Further investigations included research on the influence of one model on another and measurements of the reaction between the subsystems (models) to assess the balance in individual areas.

It was performed by defining amplitudes of the pressure on borders of the models using a constant-head boundary conditions and a method of approximation for sequential simulations of the change of the amplitude H in each model.

The model prognoses for calculation of estimated disposable resources were made on the basis of the exploitation state from 2005. The following criteria have been taken: the quantity of groundwater renewal, maintenance of the inviolable flow in the Noteć River, depression of the groundwater level and environmental conditions related to the Natura 2000 areas and meadow lands.

For the calculation of the time of water exchange and of 25-year water inflow from the environment to the MGWB no 138 Toruń–Eberswalde (Noteć) Ice-Marginal Valley, the computer program DRSW from the library HYDRYLIB was used. It requires preparation of extra boards of parameters to continue the investigations: effective porosity and aquifer thickness data for each layer.

The results of the groundwater renewal for the MGWB no 138 Toruń–Eberswalde (Noteć) Ice-Marginal Valley is similar to other results of groundwater renewals for other nearby regions. They are also comparable with groundwater renewal determined from the underground outflow of the Noteć River. These arguments indicate that the models are reliable.