
A N N A L E S
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN — POLONIA

VOL. LI, 17

SECTIO B

1996

Zakład Hydrografii
Instytut Nauk o Ziemi UMCS

WOJCIECH SOBOLEWSKI

*Zróżnicowanie zasobów wodnych w dorzeczu Warnow
(północno-wschodnie Niemcy) określone na podstawie analizy
krzywych wysychania*

The Spatial Differentiation of the Capacity of Groundwater Storage Determined Against the
Background of Regression Curves Analysis

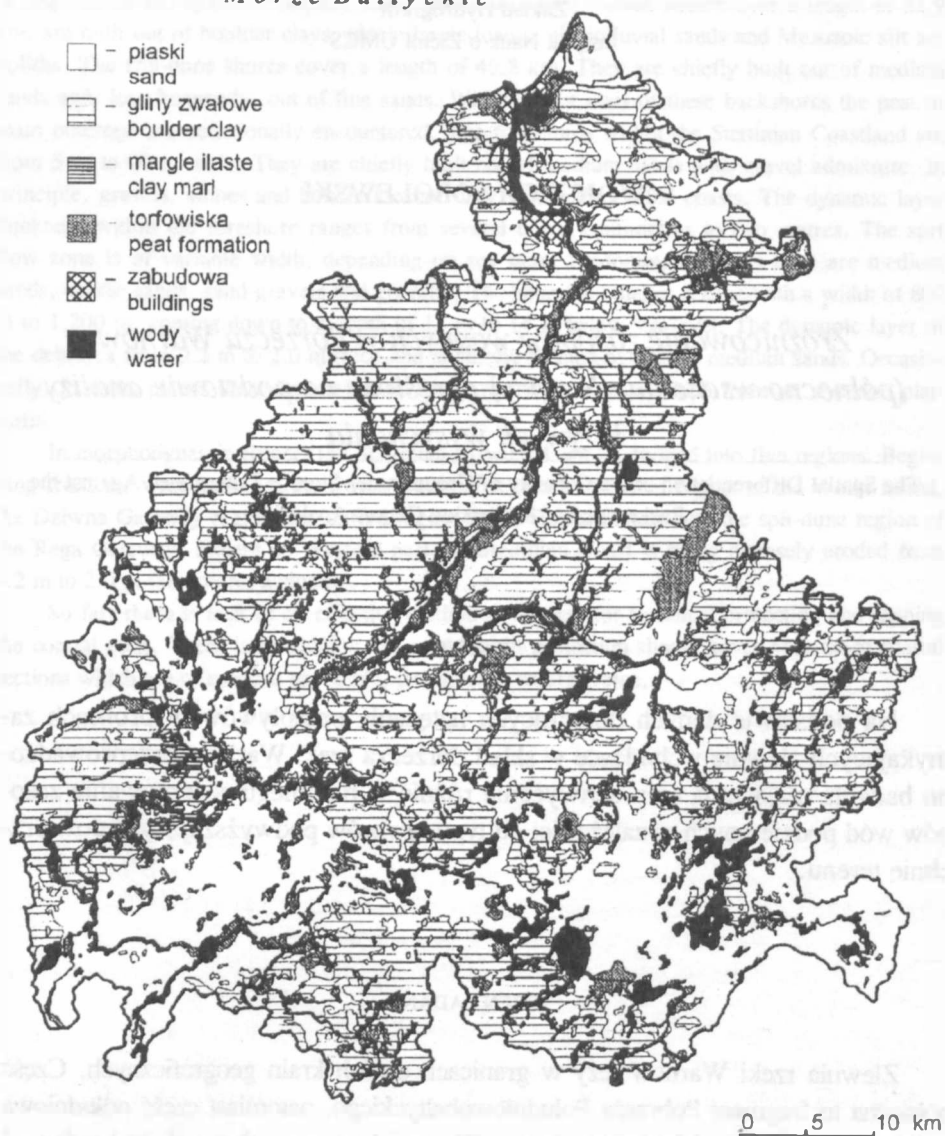
WSTĘP

Na podstawie danych dotyczących natężenia przepływów w profilach zamykających zlewnie wchodzące w skład dorzecza rzeki Warnow przeprowadzono badania mające na celu uchwycenie różnic w przebiegu szczyptywania zasobów wód podziemnych w zależności od typu utworów podwyższających powierzchnię terenu.

TEREN BADAŃ

Zlewnia rzeki Warnow leży w granicach dwóch krain geograficznych. Część północna to fragment Pobrzeża Południowobałtyckiego, natomiast część południowa należy do Pojezierza Meklemburskiego. Zlewnię budują osadowe skały kredowe i trzeciorzędowe pokryte utworami akumulacji lodowcowej zlodowacenia bałtyckiego.

Obszar Pobrzeża to równina polodowcowa ograniczona od strony morza wyrzeżem, które na odcinku sąsiadującym ze zlewnią rzeki Warnow ma wyrównany przebieg bez zalewów i zatok. Występują tu natomiast liczne obszary podmokłe i jeziora reliktowe. Środkowa część dorzecza charakteryzuje się mło-

Morze Bałtyckie

Ryc. 1. Mapa utworów powierzchniowych dorzecza rzeki Warnow
Surface deposits map of Warnow river drainage area

doglacialnym krajobrazem równinno-morenowym przechodzącym na południowy zachód w pagórkowaty krajobraz pojezierny, a na południowy wschód w krajobraz sandrowo-pojezierny. Północną i środkową część zlewni pokrywają w większości gliny zwałowe (ryc. 1). Jedynie w sąsiedztwie wybrzeża występują większe powierzchnie pokryte piaskami. Południowa część zlewni oddzielona jest od części północnej widocznymi w krajobrazie wzniesieniami moreny czołowej. Na południe od wałów morenowych rozciąga się obszar, na którym odbywała się akumulacja utworów wodno-lodowcowych w postaci piasków sandrowych. Na terenie całej zlewni występują obszary torfowiskowe.

ZLEWNIE WYTYPOWANE DO BADAŃ

Z obszaru dorzecza Warnow wybrano do badań sześć zlewni o powierzchniach od 108 km² do 541 km².

Decydującymi kryteriami przy typowaniu zlewni do badań była powierzchnia zlewni oraz dostępność danych w formie wieloletnich ciągów wartości przepływów notowanych w profilu zamykającym zlewnię. Zlewnie powinny mieć porównywalne powierzchnie rzędu kilkuset kilometrów kwadratowych. Badania przeprowadzono dla następujących zlewni: Beke po profil Bröbberow – powierzchnia 312 km², Brüeler Bach po profil Sülten – powierzchnia 314 km², Hohensprenzer Mühlbach po profil Lüssow – powierzchnia 108 km², Lössnitz po profil Kluess – powierzchnia 182 km², Mildenitz po profil Sternberger Burg – powierzchnia 541 km², Nebel po profil Ahrensahen – powierzchnia 198 km².

Wybrane zlewnie leżą zarówno w obszarze występowania pokrywy glin zwałowych, jak i piasków sandrowych, co pozwala na uchwycenie różnic w przebiegu szczyptywania zasobów wód podziemnych w zależności od typu utworów pokrywających zlewnię.

Dla zlewni zgromadzono dane dotyczące codziennych wartości przepływów notowanych w zamykających je profilach. Dane obejmowały lata hydrologiczne 1988–1992. Z uwagi na różny charakter procesu szczyptywania zasobów wód podziemnych zlewni w okresach letnim i zimowym badanie ograniczono jedynie do półroczy letnich. Postępowanie takie zaleca Jokiel (1987) stwierdzając, że na hydrogramie przepływów odcinki recesji odpływu pojawiają się najczęściej w okresie wczesnoletnim i letnim, prędkość recesji jest wtedy największa, a rzędne odpływu osiągają minima, co pozwala wyznaczyć minimalne zasoby wodne zlewni w badanym okresie.

OPIS METODY BADAŃ

Metoda opiera się na założeniu, że w okresie suchym przepływ notowany w profilu zamykającym zlewnię jest w całości efektem opróżniania zbiornika wód podziemnych tej zlewni. Jest to możliwe wtedy, gdy rzeki nie są zasilane przez opady atmosferyczne i przez wody pochodzące ze spływu powierzchniowego, a więc w czasie trwania dłuższych okresów bezopadowych. Przy zachowaniu tego warunku zgodnie z tezą postawioną przez Mailleta między przepływami notowanymi w profilach zamykających zlewnie (Q) i objętością wód zgromadzonych w zbiornikach podziemnych zlewni (V) zachodzi związek funkcyjny:

$$V = f[Q]$$

Zmiana objętości (ubytek) zasobów wód podziemnych w czasie dt wynosi $dV = -Q (dt)$. Jeżeli przyjmiemy stały krok czasowy $\Delta t = t_i - t_0$ ubytek wydajności stanie się funkcją wydajności zbiornika wód podziemnych zlewni, czyli funkcją przepływu notowanego w chwili t_0 w profilu zamykającym zlewnię. Założenie to jest podstawą metody konstruowania krzywych wysychania określających prędkość szczyptywania zasobów wód podziemnych zlewni opisywanej w wielu publikacjach (Natermann 1958; Dyck 1980; Jokiel 1987).

Ponieważ w naszej strefie klimatycznej obserwacja pełnej krzywej wysychania na hydrogramie przepływów jest niemożliwa, konstruuje się krzywą na podstawie wybranych kilkudniowych odcinków recesji odpływu uznanych za fragmenty krzywej wysychania. Wybór ten ma charakter subiektywny, ponieważ trudno sprecyzować ściśle kryteria, którym powinny odpowiadać fragmenty krzywych wysychania w poszczególnych zlewniach. Należy tu kierować się zasadą, że odcinki recesji odpływu powinny pochodzić z okresów bezopadowych, a ich długości powinny być wzajemnie porównywalne i zbliżone do długości przyjętego miarodajnego kroku czasowego. Natermann (1958) i Jokiel (1987) przyjmują 5-dniowy krok czasowy jako miarodajny dla zlewni o powierzchni kilkuset kilometrów kwadratowych.

Na podstawie wybranych n -dniowych fragmentów hydrogramu obliczono pięciodniowe ubytki odpływu:

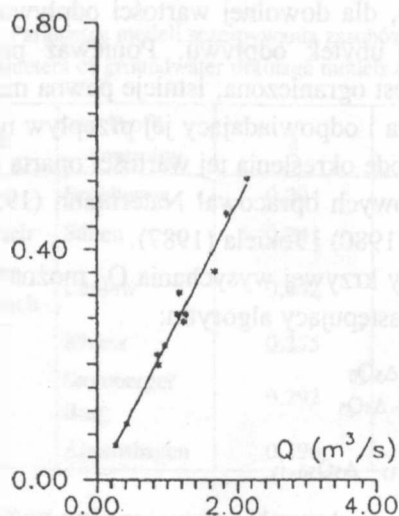
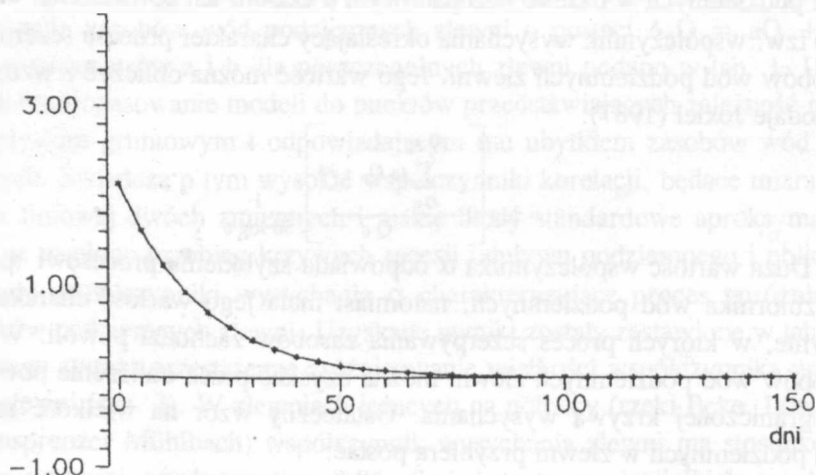
$$\Delta_5 Q = 5 \frac{\Delta_n Q}{n}$$

gdzie: $\Delta_5 Q$ – 5-dniowy ubytek odpływu

$\Delta_n Q$ – n -dniowy ubytek odpływu ($\Delta_n Q = Q_{\text{pocz.}} - Q_{\text{konc.}}$)

n – długość (liczba dni) odcinka wybranego z hydrogramu przepływu.

Wybierając możliwie wiele fragmentów krzywej recesji odpływu i wykonując dla każdego powyższe obliczenie otrzymujemy pary punktów (Q , $\Delta_5 Q$).

Brüeler Bach – Suelten – 314 km²a) $\Delta_5 Q$ (m³/s)b) Q (m³/s)

Ryc. 2. Związek między odpływem początkowym i 5-dniowym ubytkiem odpływu w zlewni rzeki Brüeler Bach

The correlation interconnection between the groundwater flow and 5-day's output in Brüeler Bach river drainage area

Według Natermanna (1958) między wartościami Q i $\Delta_5 Q$ istnieje prostoliniowy związek (ryc. 2a), który można zapisać równaniem:

$$\Delta_5 Q = aQ + b$$

Znając parametry tego równania, dla dowolnej wartości odpływu podziemnego można ustalić pięciodniowy ubytek odpływu. Ponieważ pojemność zbiornika wód podziemnych zlewni jest ograniczona, istnieje pewna maksymalna wielkość wydajności tego zbiornika i odpowiadający jej przepływ notowany w profilu zamykającym zlewnię. Metodę określenia tej wartości opartą na analizie krzywych opadania fal wezbraniowych opracował Natermann (1958). Jest ona również opisywana przez Dycka (1980) i Jokiela (1987).

Mając ustalony punkt początkowy krzywej wysychania Q_0 można obliczyć jej kolejne punkty węzłowe stosując następujący algorytm:

$$Q_5 = Q_0 - \Delta_5 Q_0$$

$$Q_{10} = Q_5 - \Delta_5 Q_5$$

...

$$Q_{5t} = Q_{5(t-1)} - \Delta_5 Q_{5(t-1)}$$

Na podstawie położenia punktów węzłowych krzywej można wytyczyć jej przebieg (ryc. 2b) oraz ustalić jej równanie w postaci:

$$Q_t = Q_0 \cdot \exp(-\alpha t)$$

Jest to równanie Mailleta opisujące związek między wydatkiem zbiorników wód podziemnych w okresie bezopadowym a czasem ich opróżniania. Parametr α to tzw. współczynnik wysychania określający charakter procesu szczyptywania zasobów wód podziemnych zlewni. Jego wartość można obliczyć z wzoru, który podaje Jokieli (1987):

$$a = \log \left[1 - \frac{\sum_{Q_0}^{Q_{30}} (a Q_p + b)}{Q_0} \right] \frac{1}{30 \log e}$$

Duża wartość współczynnika α odpowiada szybkiemu procesowi opróżniania zbiornika wód podziemnych, natomiast mała jego wartość charakteryzuje zlewnie, w których proces szczyptywania zasobów zachodzi powoli. Wielkość zasobów wód podziemnych zlewni można uzyskać przez obliczenie powierzchni ograniczonej krzywą wysychania. Ostateczny wzór na wielkość zasobów wód podziemnych w zlewni przybiera postać:

$$W = \frac{Q \cdot 86\,400}{\alpha} [\text{m}^3]$$

Dla określenia zasobów wód podziemnych przypadających na jednostkę powierzchni zlewni Jokieli (1987) wprowadza pojęcie „jednostkowy potencjał zasobności”:

$$w = \frac{W}{A} [\text{m}^3/\text{km}^2] \text{ lub } w = \frac{W}{A \cdot 10^3} [\text{mm}]$$

gdzie: A – powierzchnia zlewni [km^2].

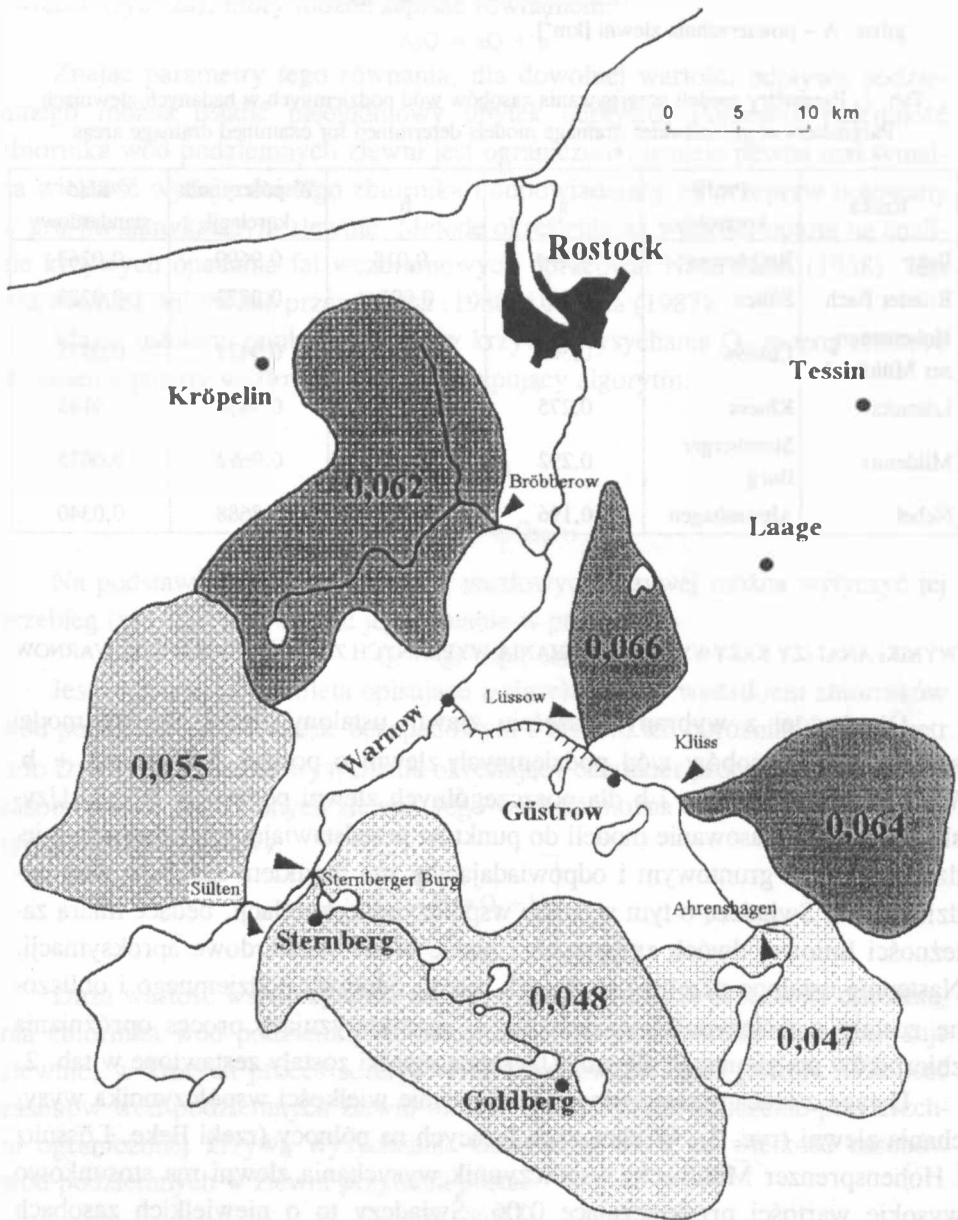
Tab. 1. Parametry modeli szczyptywania zasobów wód podziemnych w badanych zlewniach
Parameters of groundwater drainage models determined for examined drainage areas

Rzeka	Profil kontrolny	a	b	Współczynnik korelacji	Błąd standardowy
Beke	Bröbberow	0,294	-0,018	0,9699	0,0263
Brüeler Bach	Sülten	0,241	0,001	0,9872	0,0223
Hohenspren- zer Mühlbach	Lüssow	0,342	-0,015	0,9421	0,0275
Lössnitz	Kluess	0,275	0	0,9830	0,0143
Mildenitz	Sternberger Burg	0,292	-0,144	0,9692	0,0633
Nebel	Ahrenshagen	0,196	0,012	0,8688	0,0340

WYNIKI ANALIZY KRZYWYCH WYSYCHANIA WYBRANYCH ZLEWNI Z DORZECZA WARNOV

Dla każdej z wybranych sześciu zlewni ustalony został liniowy model szczyptywania zasobów wód podziemnych zlewni o postaci $\Delta_5 Q = aQ + b$. Wartości parametrów a i b dla poszczególnych zlewni podano w tab. 1. Użytkano dobre dopasowanie modeli do punktów przedstawiających zależność między odpływem gruntowym i odpowiadającym mu ubytkiem zasobów wód podziemnych. Świadczą o tym wysokie współczynniki korelacji, będące miarą zależności liniowej dwóch zmiennych i niskie błędy standardowe aproksymacji. Następnie ustalono przebieg krzywych recesji odpływu podziemnego i obliczone zostały współczynniki wysychania α charakteryzujące proces opróżniania zbiorników podziemnych zlewni. Uzyskane wyniki zostały zestawione w tab. 2.

Uwagę zwraca przestrzenne zróżnicowanie wielkości współczynnika wysychania zlewni (ryc. 3). W zlewniach leżących na północy (rzeki Beke, Lössnitz i Hohensprenzer Mühlbach) współczynnik wysychania zlewni ma stosunkowo wysokie wartości przekraczające 0,06. Świadczy to o niewielkich zasobach wodnych zlewni i szybko zachodzącym procesie ich szczyptywania. Dla zlewni rzek Mildenitz i Nebel leżących w południowej części badanego obszaru współczynnik α jest relatywnie niski (poniżej 0,05), co oznacza, że tempo opróżniania zbiorników podziemnych jest tu mniejsze, a zasoby wodne są większe.



Ryc. 3. Współczynniki wysychania badanych zlewni z obszaru dorzecza rzeki Warnow
Regression coefficients in Warnow river drainage area

Tab. 2. Wartości współczynników wysychania i wielkość zasobów wód podziemnych w badanych zlewniach

The regression coefficients and the capacities of groundwater storage determined for examined drainage areas

Rzeka	Profil kontrolny	Powie-rzchnia	α	Q_{\max}	W_{\max}	w_{\max}	Q_{\min}	W_{\min}	w_{\min}
		km ²		m ³ /s	mln m ³	m ³ /km ²	m ³ /s	mln m ³	m ³ /km ²
Lössnitz	Kluess	186	0,064	1,09	1,46	7851,5	0,023	0,031	165,7
Beke	Bröbberow	312	0,062	1,65	2,308	7397,4	0,14	0,196	627,7
Hohen-sprenzer Mühlbach	Lüssow	108	0,066	0,67	0,885	8197,4	0,01	0,013	122,1
Mildenitz	Sternberger Burg	541	0,048	3,97	7,108	13138,1	0,87	1,558	2879,1
Brüeler Bach	Sülten	314	0,055	2,14	3,342	10643,3	0,173	0,27	860,4
Nebel	Ahrensha-gen	198	0,047	1,49	2,727	13775,0	0,26	0,481	2429,5

Skonstruowane krzywe wykorzystano do wyznaczenia wielkości szczyptywalnych zasobów wód podziemnych zlewni, a więc tych zasobów, które mogą samoczynnie wypływać ze zbiorników podziemnych do koryt rzecznych (tab. 2). Ustalono wielkość zasobów dla wartości przepływu będącej początkiem krzywej wysychania, która jest jednocześnie najwyższym odpływem podziemnym Q_{\max} zanotowanym w profilu zamykającym zlewnię w badanym okresie, oraz dla najniższej wartości przepływu Q_{\min} . W ten sposób oszacowano wielkość maksymalnych (W_{\max}), jak i minimalnych (W_{\min}) zasobów zgromadzonych w poszczególnych zlewniach w badanym pięcioleciu.

Obliczenia dobitnie wskazują na zróżnicowanie przestrzenne zasobów wód gromadzonych w zbiornikach podziemnych w dorzeczu Warnow. Zlewnie leżące na południu charakteryzują się znacznie większymi zasobami maksymalnymi niż zlewnie położone na północy. Najwyższe zasoby stwierdzono w zlewniach rzek Nebel (13 775 m³/km²) i Mildenitz (13 138,1 m³/km²). W ich przypadku różnica wielkości zasobów w stosunku do rzek Lössnitz (7397,4 m³/km²) i Beke (7851,5 m³/km²) wynosi około 80%. Zróżnicowanie wielkości zasobów jest jeszcze większe w przypadku zasobów minimalnych. Najwyższe zasoby minimalne ma zlewnia rzeki Mildenitz (2879,1 m³/km²), a najniższe zlewnia rzeki Hohensprenzer Mühlbach (122,1 m³/km²). Tak więc różnice przekraczają tu 2000%.

Powodem występowania przestrzennego zróżnicowania wielkości współczynnika recesji odpływu i wielkości zasobów wód podziemnych jest prawdo-

podobnie niska wodoprzewodność występującej w północnej części dorzecza pokrywy glin zwałowych (ryc. 1). Wody z opadów atmosferycznych słabo infiltrują w głąb warstwy wodonośnej, co jest bezpośrednią przyczyną ubogich zasobów wód podziemnych w zlewniach rzek Beke, Lössnitz i Hohensprenzer Mühlbach. Zlewnie rzek Mildenitz, Nebel i Brüeler Bach leżących w południowej części badanego obszaru to tereny pokryte warstwą piaszczystą, charakteryzującą się dużą przepuszczalnością sprzyjającą szybkiej infiltracji wód opadowych i zasilaniu zbiorników podziemnych zlewni. Dodatkowy, pozytywny wpływ na wielkość zasobów wodnych zlewni Mildenitz i Nebel może mieć duża lesistość tych terenów.

Na obszarze dorzecza rzeki Warnow tempo szczyptywania zasobów wód podziemnych uzależnione jest przede wszystkim od budowy geologicznej. Szczególne znaczenie ma rodzaj warstwy skalnej występującej na powierzchni terenu, gdyż ona decyduje o możliwości zasilania zbiorników podziemnych zlewni wodami opadowymi. W zlewniach pokrytych utworami słabo przepuszczalnymi wody opadowe w większym stopniu uczestniczą w odpływie powierzchniowym powodując intensywne wezbrania. Natomiast w okresach bezopadowych zasoby wód podziemnych ulegają szybkiemu wyczerpaniu, a rzeki prowadzą w swoich korytach niewiele wody.

LITERATURA

- Dyck S. 1980; *Angewandte Hydrologie*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Jokiel P. 1987; Proces wysychania zlewni i jego fizjograficzne uwarunkowania. *Acta Geographica Lodziensia*, nr 56, Łódź.
- Natermann E. 1958; *Der Wasserhaushalt des oberen Emsgebietes nach dem Au-Linien-Verfahren*. Düsseldorf.
- Sobolewski W. 1994; Trockenwetterganglinien. [W:] *Untersuchung des Wasserhaushaltes der Warnow im Bereich Bützow-Rostock*. Universität Rostock, s. 126–134.

SUMMARY

This paper presents the nature of the groundwater drainage process and the capacities of groundwater storage for six sub-watersheds in Warnow river drainage area (Fig. 1) (NE Germany). Hydrologically active zone of the drainage area groundwater constitutes a kind of the reservoir. If there is a lack of precipitation, the resources are exhausted by drainage according to the internal regime of the reservoir. This process is illustrated by the so-called regression curve. The

UNIVERSITÄT MARIA CURIE SKŁODOWSKA

regression curves have been constructed on the basis of the set of short-term regression intervals extracted from the period of 5 years (1988–1992) (Fig. 2). The Maillet's formula is used in the approximation of the curve. The analysis of the regression curve equations enabled to see how the exhaustion process is going on. The regression curve equations determined for the examined drainage areas allowed the evaluation of their regression coefficients (Fig. 3) and capacities for groundwater storage. The capacities have been evaluated for the maximum (Q_{\max}) and minimum (Q_{\min}) observed groundwater runoff (Tab. 2). The analysis of their values allowed to indicate the areas and reservoirs of high capacity of water retention (Nebel river and Mildnitz river drainage areas) in the south part of Warnow river basin and the areas of low capacity of water retention (Lössnitz river, Beke river and Hohensprenzer Mühlbach river drainage areas) in the north part of examined watershed. Their spatial distribution essentially corresponds to the zonal pattern of geological conditions (Fig. 1).

