

PODATNOŚĆ WÓD PODZIEMNYCH W WARUNKACH SUSZY HYDROGEOLOGICZNEJ W PŁYTKICH SYSTEMACH HYDROGEOLOGICZNYCH

GROUNDWATER VULNERABILITY IN HYDROGEOLOGICAL DROUGHT CONDITIONS IN SHALLOW AQUIFERS

EWA KROGULEC¹, KATARZYNA SAWICKA¹, SEBASTIAN ZABŁOCKI¹

Abstrakt. Badania podatności wód podziemnych przeprowadzono w dolinie Wisły, na obszarze płytkiego występowania wód podziemnych. Wykonano analizę zmian stanów wód podziemnych w celu identyfikacji wartości średnich oraz wartości najniższych w wieloletnim okresie 1999–2013. Na modelu hydrodynamicznym określono wartości zasilania infiltracyjnego odpowiadające stanom średnim w wieloletnim okresie oraz stanom najniższym w warunkach suszy hydrogeologicznej. Przeprowadzono wariantową ocenę podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia przy zastosowaniu metody DRASTIC, przyjmując do obliczeń średnie i najniższe stany wód podziemnych i odpowiadające im wartości zasilania infiltracyjnego. Mapy podatności dla obu wariantów podatności: podatności średniej (A) oraz w warunkach suszy hydrogeologicznej (B), przedstawiają zróżnicowanie przestrzenne występowania poszczególnych klas podatności. W wariantcie A największą powierzchnię zajmuje średniowysoka i średnia klasa podatności. W okresie suszy hydrogeologicznej największą powierzchnię zajmuje średnia klasa podatności. Wyniki badań potwierdzają potrzebę wariantowej oceny podatności, szczególnie w płytkich systemach hydrogeologicznych, w których objęte są ochroną zróżnicowane ekosystemy, w tym ekosystemy zależne od wód podziemnych.

Słowa kluczowe: podatność wód podziemnych, DRASTIC, głębokość do zwierciadła wód, susza hydrogeologiczna.

Abstract. The study of groundwater vulnerability was carried out in the Vistula river valley, in the area of shallow groundwater occurrence. An analysis of groundwater level changes was performed to identify average values and the lowest values in the period of 1999–2013. On the hydrodynamic model, infiltration rate was determined corresponding to average groundwater levels and the lowest levels representing hydrogeological drought. A variant evaluation of groundwater vulnerability to pollutions was done using the DRASTIC method, assuming the average and the lowest groundwater levels and the corresponding infiltration rates for the calculation. The vulnerability maps for both vulnerability options: medium (A) and hydrogeological drought conditions (B), show the spatial diversity of individual vulnerability classes. In Variant A, the medium and medium high classes occupy the largest area. During the hydrogeological drought the medium class is the largest area. The research results support the need for a variant susceptibility assessment, especially in shallow hydrogeological systems in which diverse ecosystems are protected, including groundwater-dependent ecosystems.

Key words: groundwater vulnerability, DRASTIC, groundwater table depth, hydrogeological drought.

WSTĘP

Mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia przedstawiają ryzyko migracji zanieczyszczeń z powierzchni terenu do warstwy wodonośnej. Są podstawowym narzędziem w planowaniu przestrzennym oraz prognozowaniu możliwości zanieczyszczenia warstwy wodonośnej. Przyjmowane do obliczeń podatności parametry i dane, w zasa-

dzie we wszystkich stosowanych metodach i procedurach oceny, są wartościami średnimi, dlatego w konsekwencji charakteryzują „średnią” podatność wód podziemnych na zanieczyszczenia. Szczególne znaczenie ma to w przypadku parametrów podatności wód podziemnych, dynamicznie zmieniających się w czasie, do których możemy zaliczyć głębokość do zwierciadła wód podziemnych i zasilanie infiltracyjne.

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: Ewa.Krogulec@uw.edu.pl, Sawicka@uw.edu.pl, s.zablocki@uw.edu.pl.

Celem przeprowadzonych badań była wariantowa ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia z uwzględnieniem średnich wartości położenia zwierciadła wody oraz wartości najniższych, charakteryzujących okresy występowania suszy hydrogeologicznej. Badania przeprowadzono na obszarze płytko występującego zwierciadła wód podziemnych, w którym stany wód podziemnych są kluczowym elementem oceny podatności, a jednocześnie charakteryzują się dużą dynamiką zmian w czasie. Przeprowadzono identyfikację średnich z wielolecia 1999–2013 stanów wód podziemnych, stanów w warunkach suszy hydrogeologicznej oraz średniej wartości zasilania infiltracyjnego w wieloleciu i w okresie suszy hydrogeologicznej. Określenie podatności wód podziemnych w warunkach suszy hydrogeologicznej jest szczególnie ważne w systemach hydrogeologicznych, w których zwierciadło wód podziemnych występuje płytko, a ochronie podlegają ekosystemy zależne od wód podziemnych.

OBSZAR BADAŃ, CHARAKTERYSTYKA STANÓW WÓD PODZIEMNYCH

Do przeprowadzenia analizy oceny podatności w założonych wariantach wybrano dobrze rozpoznany obszar, zlokalizowany w Dolinie Środkowej Wisły. Obszar podlega ochronie prawnej od 1959 r. jako Kampinoski Park Narodowy, Biosphere Reservoir (UNESCO MaB; od 2000 r.) i Natura

2000 – Puszcza Kampinoska, głównie ze względu na występowanie cennych zbiorowisk roślinnych, których istnienie zapewnia płytko położone zwierciadło wód podziemnych w dolinie Wisły, warunkujące występowanie obszarów sklasyfikowanych jako ekosystemy zależne od wód podziemnych (GDE) na ok. 62% powierzchni parku w dwóch równoleżnikowych hydrostrefach, określanych jako pasy bagienne. Między nimi znajdują się pasy wydmy, a od północy teren jest ograniczony przez taras zalewowy Wisły (Krogulec, 2004; Krogulec i in., 2016; fig. 1).

Dolina Wisły to obszar płytkiego występowania wód podziemnych. Stany wód podziemnych są regularnie obserwowane od 1999 r. w dwutygodniowych interwałach w 56 piezometrach tworzących sieć monitoringową. Analiza zmian położenia zwierciadła wód podziemnych dostarczyła wielu informacji dotyczących stanu ilościowego wód podziemnych, w tym określenia: trendu zmian w wieloleciu (Krogulec i in., 2009), zmian sezonowych zasobów (Krogulec, Zabłocki, 2015); wielkości zmian zasobów w okresie wegetacyjnym i wskazania okresów i miejsc możliwego niedoboru wilgoci w obszarach GDE (Krogulec i in., 2016), długości trwania i głębokości występowania zwierciadła podczas suszy hydrogeologicznej (Krogulec, 2018).

Suszę hydrogeologiczną określono na podstawie analizy stanów wód podziemnych w wieloleciu 1999–2013 w nawiązaniu do wartości statystycznych (Fendekowa, Fendek, 2012; Gurwin, 2014) oraz na podstawie analizy statystycznej minimalnych rocznych stanów (Strzebońska-Ratomska,

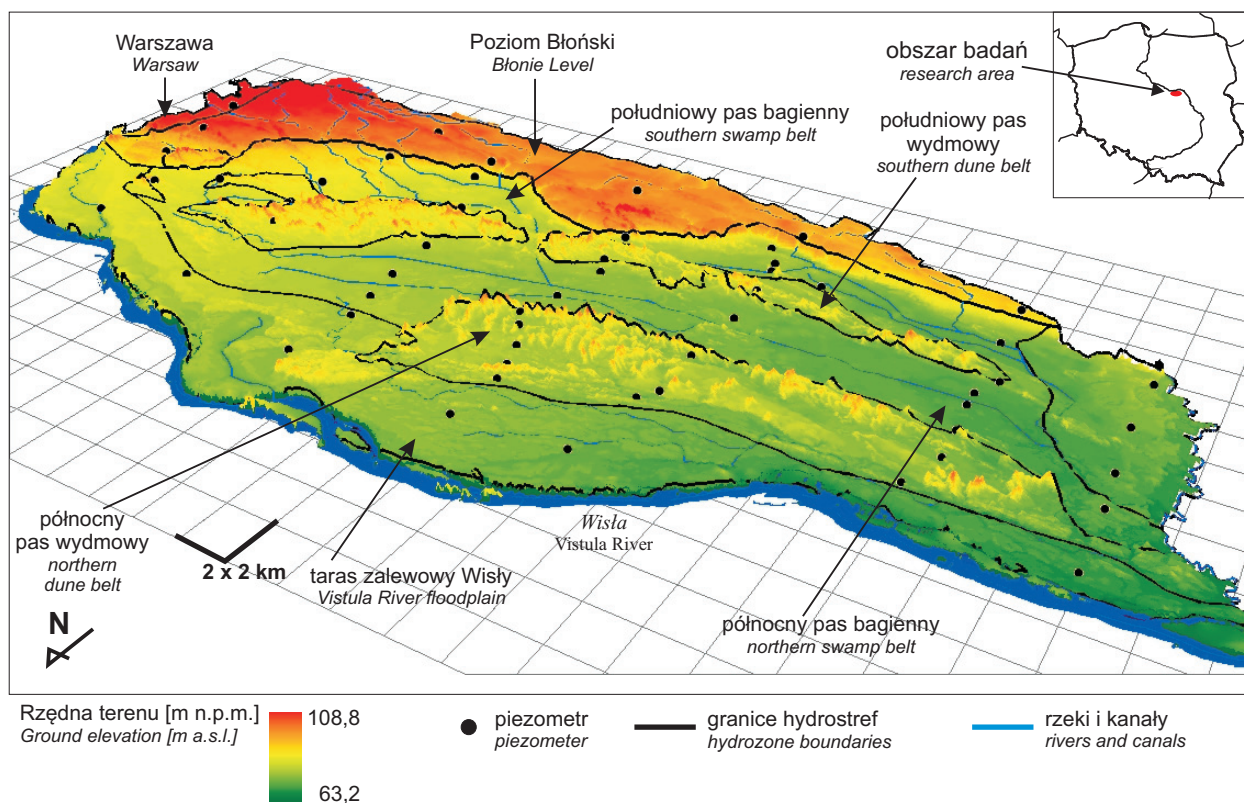


Fig. 1. Widok 3D na obszar badań od północnego zachodu (pionowe przewyższenie 7,0)

3D view on the study area from the north-west (vertical exaggeration 7.0)

1994; Shahid, Hazarika, 2010). Przyjęto następującą klasyfikację stanów wód podziemnych, odnosząc ją do suszy hydrogeologicznej:

- stan bazowy – $G > 90\% SR$ – brak zagrożenia wystąpienia suszy hydrogeologicznej;
- niski stan – $80\% SR < G < 90\% SR$ – możliwość zagrożenia suszą hydrogeologiczną;
- bardzo niski stan – $70\% SR < G < 80\% SR$ – zagrożenie suszą hydrogeologiczną;
- wyjątkowo niski stan $G \leq 70\% SR$ – susza hydrogeologiczna;

gdzie: G – średni roczny stan; SR – średni stan z wielolecia.

Suszę hydrogeologiczną określono również na podstawie stanów charakterystycznych wód podziemnych w następujący sposób (Kazimierski i in., 2009):

- $G \geq WNG$ – brak zagrożenia suszą;
- $WNG > GD > SNG$ – zagrożenie pojawienia się suszy,
- $SNG \geq GD > 0,5 (SNG + NNG)$ – wystąpienie płytkiej suszy hydrogeologicznej;
- $GD \leq 0,5 (SNG + NNG)$ – wystąpienie suszy hydrogeologicznej;

gdzie: G – średni roczny stan; WNG – najwyższy stan z niskich; SNG – średni stan z niskich; NNG – najniższy stan z niskich; GD – susza hydrogeologiczna.

Ze względu na konstrukcję przyjętych klasyfikacji suszy konieczne było określenie średnich rocznych głębokości do zwierciadła i średnich z okresu wielolecia 1999–2013, a następnie szczegółowa analiza przebiegu typowych sezonowych wahań stanów wód podziemnych. Na tle wielolecia wyraźnie innymi wartościami i przebiegiem zmian cechowały się stany w 2003 r., a zjawisko to obejmowało cały obszar doliny Wisły. Średnia głębokość do zwierciadła w piezometrach była niższa od stanów średnich o wartości od 0,01 do 0,40 m, a maksymalne głębokości były niższe nawet o 1,1 m (tab. 1).

Obliczone średnie stany wód podziemnych z wielolecia 1999–2013 porównano ze stanami w 2003 r., określanymi jako zagrożenie wystąpienia suszy hydrogeologicznej lub

susza hydrogeologiczna (fig. 2). Stany określające suszę hydrogeologiczną, czyli takie gdy $G \leq 70\% SR$ są płytsze niż stany zarejestrowane w 2003 r.

ZASILANIE WÓD PODZIEMNYCH

Wielkość zasilania wód podziemnych określono na modelu hydrodynamicznym, zbudowanym z zastosowaniem programu Visual ModFLOW (Gruszczyński, Krogulec, 2010). Obliczenia modelowe przeprowadzono w dwóch wariantach: model dla stanów średnich z okresu 1999–2013 oraz dla stanów średnich w 2003 r., uznanym za najsuchszy rok w wieloleciu, reprezentujący suszę hydrogeologiczną. Proces kalibracji polegał na zmianie wielkości zasilania infiltracyjnego i parowania podziemnego z jednoczesną weryfikacją przepływu w rzekach i kanałach, porównując obliczoną i pomierzoną głębokość do zwierciadła wód podziemnych we wszystkich wariantach modelu.

Dla stanu średniego z wielolecia średnie zasilanie na rozpatrywanym obszarze wyniosło ok. 21 mm/rok, przy odchyleniu 35 mm/rok, średnie zasilanie dla 2003 r. wyniosło 15 mm/rok przy odchyleniu 25 mm/rok (fig. 3).

W 2003 r. parowanie ze zwierciadła wód podziemnych przewyższało zasilanie na obszarach bagiennych i jednocześnie skutkowało tzw. ujemnym zasilaniem, które pozostawiało na zbliżonym poziomie w stosunku do stanu średniego (–50–0 mm/rok), natomiast zasilanie na obszarach wydmych było wyraźnie niższe o ok. 20 mm/rok w stosunku do stanu średniego.

OCENA PODATNOŚCI WÓD PODZIEMNYCH NA ZANIECZYSZCZENIA

Do oceny podatności naturalnej na zanieczyszczenia zastosowano metodę parametryczną DRASTIC przeznaczoną dla wodonośnych ośrodków porowych, gdzie do najważniejszych założeń metody należy adwekcyjne przemieszczanie się konserwatywnych zanieczyszczeń z powierzchni terenu

Tabela 1

Głębokości charakterystyczne wód podziemnych w wybranych punktach sieci monitoringowej [m]

Specific groundwater depths in selected monitoring points [m]

Nr punktu	P9	P10	P12	P18	P19	P21	P22	P23	P32	P33	P35	P38	P39	P40	P42
Średni stan z wielolecia (SR) 1999–2013	0,85	0,60	0,60	0,90	1,43	0,15	0,69	1,31	0,84	1,45	2,41	1,14	0,71	1,47	1,10
Średni roczny stan (G) w 2003 r.	0,98	0,78	0,61	1,10	1,48	0,40	0,87	1,71	1,09	1,46	2,45	1,29	0,74	1,61	1,03
Stan najniższy w 2003 r.	1,45	1,11	1,13	1,52	2,14	0,98	1,58	2,41	1,28	2,03	2,80	1,54	1,26	2,16	1,86
70% SR	0,69	0,55	0,42	0,77	1,04	0,28	0,61	1,20	0,76	1,02	1,71	0,91	0,52	1,13	0,72
80% SR	0,78	0,62	0,48	0,88	1,19	0,32	0,70	1,37	0,87	1,17	1,96	1,04	0,60	1,29	0,82
90% SR	0,88	0,70	0,54	0,99	1,34	0,36	0,78	1,54	0,98	1,31	2,20	1,16	0,67	1,45	0,93
Najwyższy stan z niskich (WNG)	0,80	0,57	0,47	0,69	1,28	-0,28	0,12	0,32	0,81	1,33	2,27	1,06	0,50	1,04	0,96
Średni stan z niskich (SNG)	1,21	0,92	0,90	1,20	1,86	0,58	1,18	1,68	1,11	1,80	2,76	1,47	1,01	1,85	1,52
Najniższy stan z niskich (NNG)	1,45	1,11	1,15	1,52	2,14	0,98	1,60	2,41	1,35	2,03	3,16	1,76	1,26	2,16	1,86
0,5 (SNG + NNG)	1,33	1,02	1,02	1,36	2,00	0,78	1,39	2,04	1,23	1,91	2,96	1,61	1,13	2,01	1,69

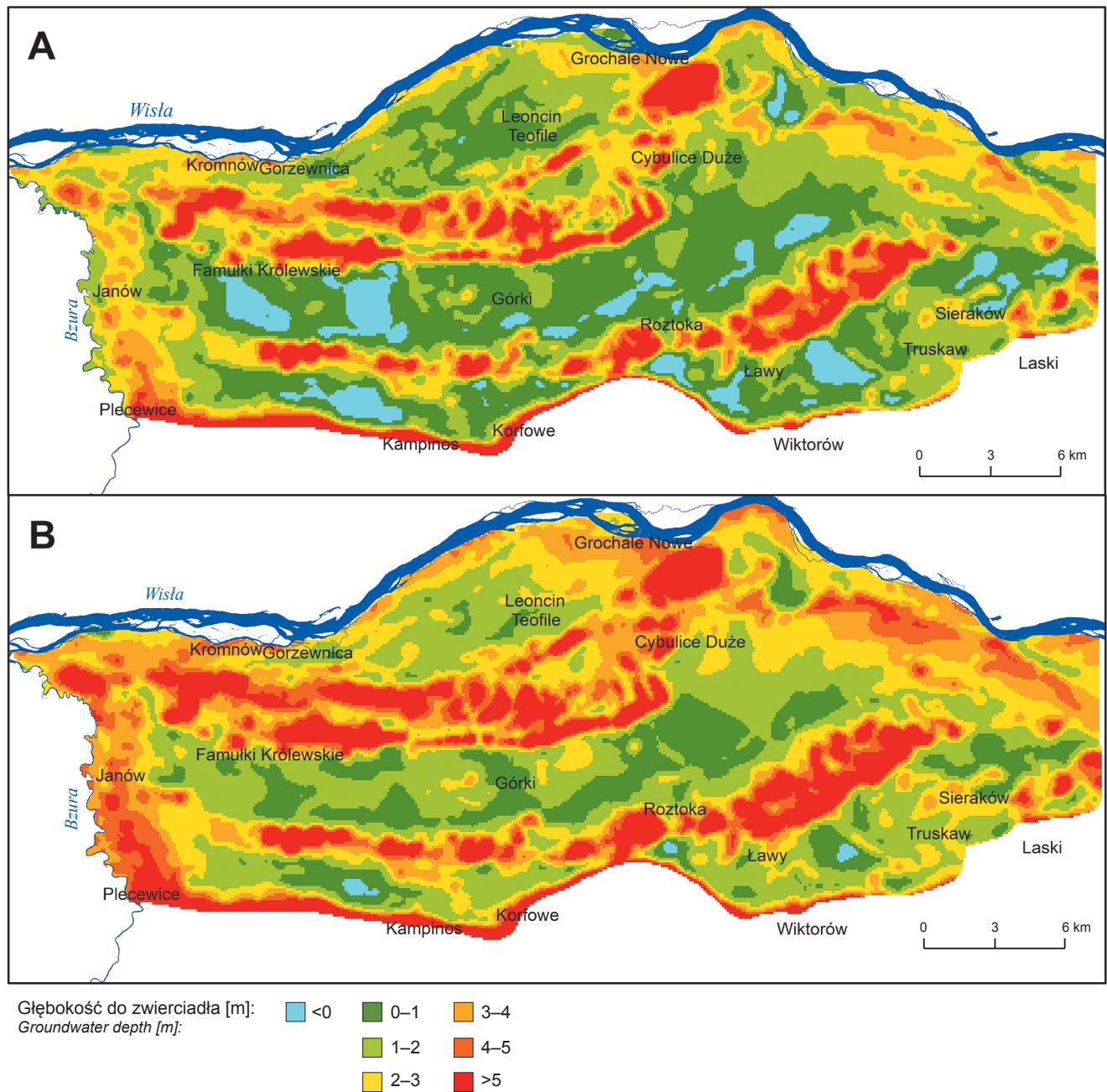


Fig. 2. Głębokość zwierciadła wód podziemnych

A – średnia w wieloleciu 1999–2013; **B** – susza hydrogeologiczna

Groundwater table depth

A – average in the period of 1999–2013; **B** – hydrogeological drought

przez strefę aeracji (Aller i in., 1987). W metodzie DRAS-TIC do parametrów dynamicznych są zaliczane: głębokość do zwierciadła wód podziemnych oraz wielkość zasilania infiltracyjnego, a parametry o charakterze statycznym to: litologia warstwy wodonośnej i strefy aeracji, współczynnik filtracji, typ gleb oraz topografia terenu. Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia w obszarze badań wykonano dla dwóch wariantów głębokości do zwierciadła

wód podziemnych i zasilania infiltracyjnego: wariant A – wartość średnia z wielolecia; wariant B – stany najniższe w wieloleciu odpowiadające suszy hydrogeologicznej w 2003 r.

Na podstawie wyników oceny przeanalizowano różnice w powierzchniach zajmowanych przez poszczególne klasy podatności określone dla obu wariantów. Najbardziej widoczne są zmiany w powierzchniach obszarów o wysokiej oraz o bardzo niskiej podatności (fig. 4).

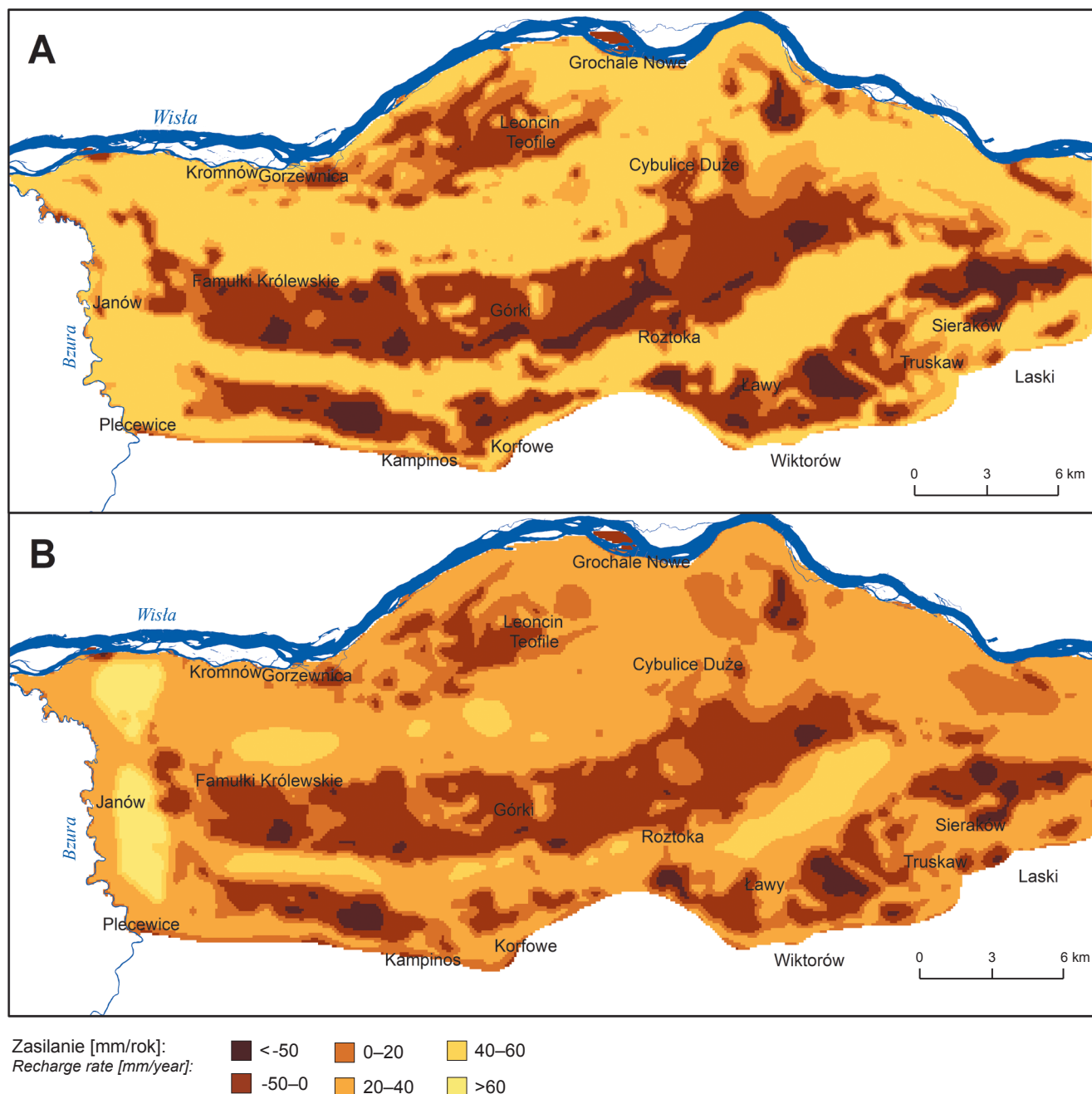


Fig. 3. Wielkość zasilania w wariantach modelowych

A – średnia w wieloletniu 1999–2013; **B** – susza hydrogeologiczna (2003 r.)

Recharge rate in modelled variants

A – average in the period of 1999–2013; **B** – hydrogeological drought (in 2003)

Podatność wód podziemnych na zanieczyszczenia określona w wariantcie A, czyli dla stanu średniego z lat 1999–2013, charakteryzuje się wysokim udziałem powierzchni klasy średniowysokiej (IPZ = 151–175; 41% powierzchni) głównie w pasach wydmych. Mimo płytko położonego zwierciadła w pasach bagiennych, podatność jest niższa o 1–2 klasy, przyjmując wartości od klasy średniej (IPZ = 126–150) na obrzeżach pasów do klasy niskiej

(IPZ = 101–125) w częściach centralnych. Niska klasa podatności występuje na równi zalewowej Wisły. Całkowita powierzchnia sklasyfikowana jako niska podatność to 138,80 km². Klasa wysokiej podatności (IPZ > 176) występuje na obszarze 5,68 km² w kilku polach w południowym pasie wydmych i na przedmieściach Warszawy.

Podatność określona w wariantcie B, czyli dla warunków suszy hydrogeologicznej, jest wyraźnie niższa na całym ob-

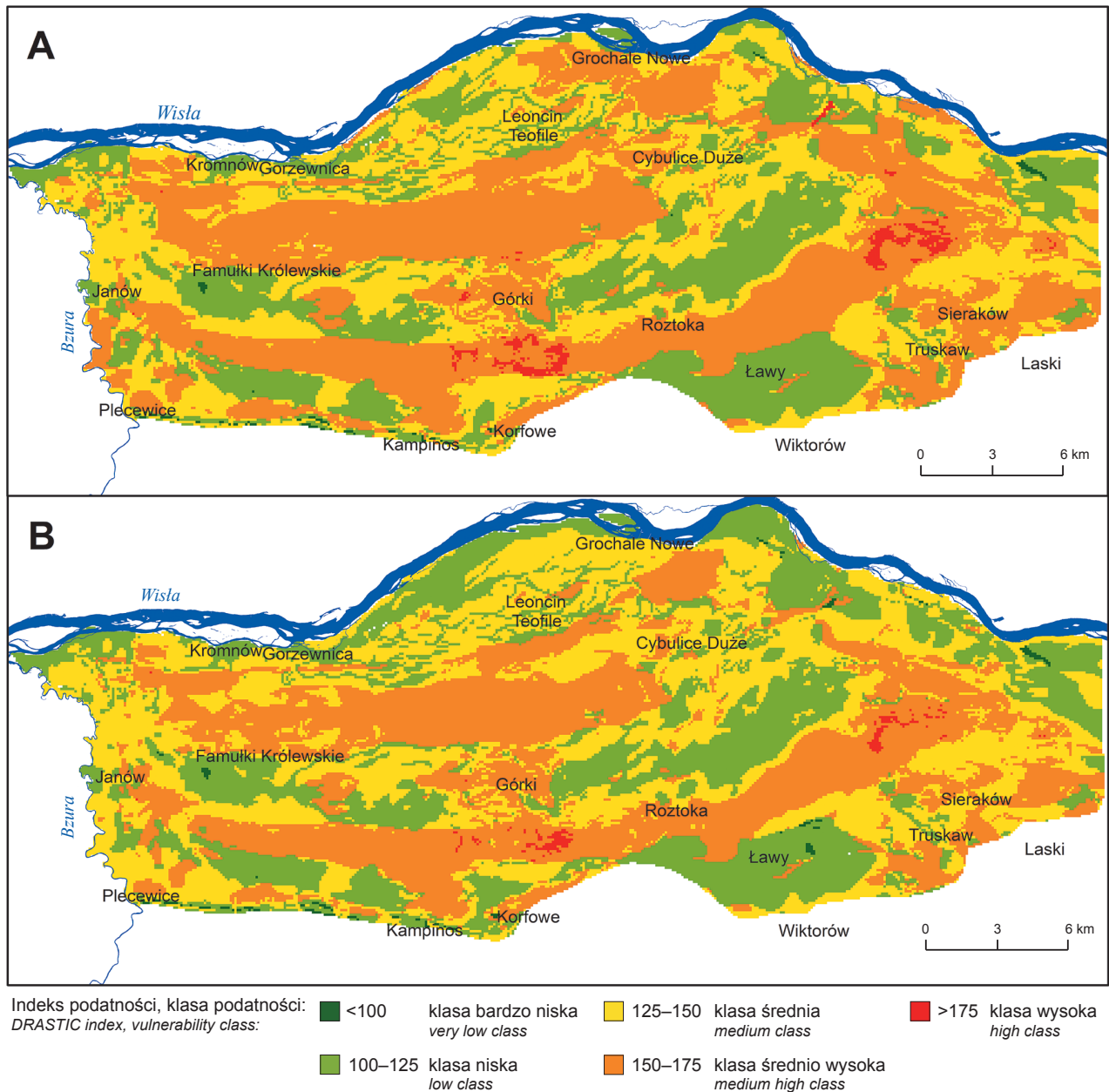


Fig. 4. Wskaźnik IPZ i klasy podatności w 2 wariantach

A – wartość średnia; **B** – w warunkach suszy hydrogeologicznej

DRASTIC index and vulnerability classes in two variants

A – average value; **B** – during hydrogeological drought conditions

szarze w porównaniu do wariantu A. Największy udział osiąga powierzchnia klasy podatności średniej – 216,26 km², głównie w pasach wydmych. Średniowysoka podatność zajmuje 190,75 km². W pasach bagiennych podatność jest również niższa o 1–2 klasy (średnia na obrzeżach pasów i niska w częściach centralnych). Niska klasy podatności występuje na równi zalewowej Wisły. Całkowita powierzchnia sklasyfikowana jako niska podatność to 138,80 km². Klasa wysokiej podatności występuje na łącznym obszarze 2,12 km² w kilku polach w południowym pasie wydmych i na przedmieściach Warszawy.

WALIDACJA OCENY PODATNOŚCI

Walidacja podatności jest dokonywana przez korelację ze stężeniami substancji chemicznych występującymi powszechnie w wodach podziemnych i stanowiącymi wskaźnik zanieczyszczenia tych wód (Saidi i in., 2011; Elçi, 2017).

W celu wykonania walidacji oceny podatności naturalnej przeprowadzono analizę korelacyjną polegającą na poszukiwaniu liniowej zależności między zbiorami stanowiącymi dane wynikowe oceny podatności oraz danymi hydrogeochemicznymi. Jako wskaźnik walidacji wykorzystano po-

Tabela 2

Macierz korelacji wyników oceny podatności oraz wskaźników hydrogeochemicznych

Correlation matrix of vulnerability results and hydrogeochemical indicators

	DRASTIC	pH	Eh	PEW	Mineralizacja ogólna	HCO ₃	Ca	Mg	Sr	Cl	SO ₄	Na
DRASTIC	1,00	-0,30	0,21	-0,79	-0,69	-0,52	-0,65	-0,71	-0,68	-0,63	-0,36	-0,73
pH	-0,30	1,00	-0,64	0,56	0,59	0,55	0,60	0,45	0,45	0,25	0,33	0,26
Eh	0,21	-0,64	1,00	-0,39	-0,62	-0,72	-0,64	-0,30	-0,38	0,17	-0,42	0,07
PEW	-0,79	0,56	-0,39	1,00	0,92	0,70	0,90	0,94	0,91	0,64	0,72	0,71
Mineralizacja ogólna	-0,69	0,59	-0,62	0,92	1,00	0,92	0,99	0,82	0,87	0,32	0,80	0,43
HCO ₃	-0,52	0,55	-0,72	0,70	0,92	1,00	0,92	0,58	0,70	-0,04	0,72	0,12
Ca	-0,65	0,60	-0,64	0,90	0,99	0,92	1,00	0,79	0,84	0,26	0,79	0,36
Mg	-0,71	0,45	-0,30	0,94	0,82	0,58	0,79	1,00	0,85	0,62	0,73	0,68
Sr	-0,68	0,45	-0,38	0,91	0,87	0,70	0,84	0,85	1,00	0,50	0,73	0,60
Cl	-0,63	0,25	0,17	0,64	0,32	-0,04	0,26	0,62	0,50	1,00	0,15	0,95
SO ₄	-0,36	0,33	-0,42	0,72	0,80	0,72	0,79	0,73	0,73	0,15	1,00	0,21
Na	-0,73	0,26	0,07	0,71	0,43	0,12	0,36	0,68	0,60	0,95	0,21	1,00

– korelacja dodatnia, $r > 0,60$ / positive correlation, $r > 0.60$

– korelacja ujemna, $r < -0,60$ / negative correlation, $r < -0.60$

szczególne jony oraz cechy fizykochemiczne (tab. 2), które oznaczano w 41 punktach monitoringu w latach 2006–2009. Do analizy wykorzystano dane z 2008 r. (analizy pełne obejmujące 21 oznaczeń).

Wyniki wskazują, że na obszarach wysokiej podatności wartości stężeń jonów Ca, Mg, Sr, HCO₃, Cl, Na oraz przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW) i mineralizacji ogólnej (M.og.) są niskie, o czym świadczy ujemna korelacja (tab. 2). Współczynnik korelacji r dla zależności indeksu DRASTIC i stężeń wymienionych jonów i cech wynosi od -0,63 do -0,79. Odwrotna zależność wynika m.in. z rozkładu przestrzennego infiltracji, która skutkuje wysoką wartością wskaźnika IPZ w obszarach wydmowych, a jednocześnie warunkuje niskie stężenia jonów głównych i niską mineralizację ogólną. W strefach drenażu, przy niskich wartościach indeksu IPZ i zasilania oraz dopływie wód z różnych systemów krążenia, stężenia są wyższe. Wysokie korelacje ujemne otrzymano również dla parametrów A i I, co należy interpretować jako znaczący wpływ konkretnego rodzaju litologii ośrodka skalnego na chemizm wód podziemnych. Nie stwierdzono korelacji między wynikami podatności a wskaźnikami takimi jak: N-NO₃, N-NH₄, O₂, K, PO₄, SiO₂, Zn, Fe oraz Al ($r < 0,4$).

wierzchnię zajmuje średnia klasa podatności. We wszystkich wariantach stwierdzono zróżnicowanie przestrzenne występowania poszczególnych klas podatności.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia w obszarach płytko występującego zwierciadła wód podziemnych, szczególnie w obszarach obejmujących ochronę wybranych ekosystemów w tym ekosystemów zależnych od wód podziemnych, powinna dotyczyć kilku wariantów, ze szczególnym uwzględnieniem najniższych obserwowanych stanów wód podziemnych.

Zróżnicowane wyniki oceny podatności dla średnich głębokości wód podziemnych oraz dla warunków wystąpienia suszy hydrogeologicznej wskazują na potrzebę odpowiedniego planowania badań i obserwacji hydrogeologicznych w obszarach płytkiego występowania wód podziemnych. Powszechną metodą weryfikacji ocen podatności jest ich porównanie lub korelacja z mapami wybranych wskaźników fizykochemicznych. W przypadku obszarów, w których nie stwierdzono zanieczyszczeń wód podziemnych, praktycznie weryfikacja ocen podatności jest niemożliwa, dlatego obliczenia dotyczą potencjalnej podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia.

PODSUMOWANIE

Ocenę podatności wód podziemnych w dolinie Wisły przeprowadzono w dwóch wariantach: A – średnia głębokość wód podziemnych z okresu 1999–2013, B – głębokość wód podziemnych reprezentującą suszę hydrogeologiczną. W wariantcie A, określanym jako podatność średnia, największą powierzchnię zajmuje średniowysoka i średnia klasa podatności. W wariantcie B, określanym jako podatność w warunkach suszy hydrogeologicznej, największą po-

LITERATURA

- ALLER L., BENNETT T., LEHR J.H., PETTY R.J., HACKETT G., 1987 – DRASTIC: a standardized system of evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. EPA no. 600/287035, USEPA, Washington, DC.
- ELÇI A., 2017 – Calibration of groundwater vulnerability mapping using the generalized reduced gradient method. *J. Contam. Hydrol.*, **207**: 39–49. DOI: 10.1016/j.jconhyd. 2017.10.008.
- FENDEKOWA M., FENDEK M., 2012 – Groundwater drought in the nitra river basin – identification and classification. *J. Hy-*

- drol. *Hydromech.*, **60**, 3: 185–193. DOI: 10.2478/v10098-012-0016-1.
- GRUSZCZYŃSKI T., KROGULEC E., 2010 – Numerical model of the filtration field in the area of the Kampinos National Park. Result no. 9 of Project “Development of methods for the reconstruction of the primary water conditions in Kampinos National park for recovering natural degradation and improvement state of biodiversity”. EEA Grants. PL0268.
- GURWIN J., 2014 – Long-term monitoring and GIS based determination of groundwater drought propagation, the Lower Silesia region, SW Poland. *Episodes*, **37**, 3: 172–181.
- KAZIMIERSKI B., CABALSKA J., MIKOLAJCZYK A., PILICHOWSKA-KAZIMIERSKA E., 2009 – Ocena zagrożenia suszą hydrogeologiczną (gruntową) na obszarze Polski. *W: Materiały XVIII Ogólnopolskiego Sympozjum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego*, Szymbark.
- KROGULEC E., 2004 – Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia w dolinie rzecznej na podstawie przesłanek hydrodynamicznych. Wydaw. UW, Warszawa.
- KROGULEC E., 2018 – Evaluating the risk of groundwater drought in groundwater-dependent ecosystems in the central part of the Vistula River Valley, Poland. *Ecohydrol. & Hydrobiol.*, **18**: 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.11.003>.
- KROGULEC E., ZABŁOCKI S., 2015 – Relationship between the environmental and hydrogeological elements characterizing groundwater-dependent ecosystems in central Poland. *Hydrogeol. J.*, **23**, 7: 1587–1602.
- KROGULEC E., ANDRZEJEWSKA A., FURMANKOWSKA A., ZABŁOCKI S., 2009 – Analiza stanów wód podziemnych na obszarach podmokłych na przykładzie obserwacji w Kampinoskim Parku Narodowym. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **436**: 281–288.
- KROGULEC E., ZABŁOCKI S., SAWICKA K., 2016 – Changes in groundwater regime during vegetation period in groundwater dependent ecosystems. *Acta Geol. Pol.*, **66**, 3: 525–540.
- SAIDI S., BOURI S., DHIA H.B., 2011 – Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: a validation study. *Hydrolog. Sci. J. – Journal des Sciences Hydrologiques*, **56**, 2: 288–304. DOI: 10.1080/02626667.2011.552886.
- SHAHID S., HAZARIKA M.K., 2010 – Groundwater Drought in the Northwestern Districts of Bangladesh: *Water Resour. Manag.*, **24**: 1989–2006. DOI: 10.1007/s11269-009-9534-y.
- STRZEBOŃSKA-RATOMSKA B., 1994 – Metodyka oceny intensywności i zasięgu suszy hydrologicznej. Cz. I. Susza hydrologiczna na Podkarpaciu w latach 1961–1990. *Wiadomości IMGW*, **4**: 15–42.

SUMMARY

The study of groundwater vulnerability was carried out in the Vistula river valley, in the area of shallow groundwater occurrence, which allowed the development of groundwater-dependent ecosystems (GDEs) covering 62% of the Kampinos National Park's surface area in two latitudinal marsh belts. An analysis of groundwater level changes was performed to identify average values and the lowest values in the period of 1999–2013. On the hydrodynamic model, infiltration rate was determined corresponding to average groundwater levels and the lowest levels representing hydrogeological drought. For the steady state from 1999–2013, the average recharge rate was about 21 mm/year, with a standard deviation of 35 mm/year, the average recharge rate in 2003 was 15 mm/year with a standard deviation of 25 mm/year. A variant evaluation of groundwater vulnerability to pollution was done using the DRASTIC method, assuming the average and the lowest groundwater levels and the corresponding infiltration rates for the calculation. The vulnerability maps for both vulnerability options: medium (A) and hydrogeological drought conditions (B), show the spatial diversity of individual vulnerability classes. The vulnerability of groundwater to pollutants determined in A variant, is characterized by the largest area of the medium-high class (IPZ = 151–175, 41% of the area) mainly in dune belts. De-

spite the fact that the shallow groundwater table occurs in the marsh belts, the vulnerability is lower by 1–2 classes, assuming values from the medium class (IPZ = 126–150) and low class (IPZ = 101–125). The vulnerability determined in variant B is clearly lower in the whole area compared to variant A. The largest area is covered by the medium class – 216.26 km², mainly in dune belts.

In order to perform the validation of the vulnerability assessment, a correlation analysis was conducted between the resultant data and hydrogeochemical data. The results indicate that the values of Ca, Mg, Sr, HCO₃, Cl, Na and total mineralization are low in areas of high vulnerability class. The correlation coefficient for the dependence of the DRASTIC index and the concentrations of these ions and features is from –0.63 to –0.79. A reverse dependence is a result of the spatial distribution of infiltration, which results in a high IPZ index in dune areas, and concurrently determines the low concentrations of main ions and low total mineralization. In the drainage zones, the concentrations are higher at low IPZ index values. High negative correlations were also obtained for parameters A and I, which should be interpreted as a significant influence of a particular type of sediment on groundwater chemistry.