

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (1), 15–27
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (1)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (1), 15–27
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (1)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.1.02

Justyna KUBICZ, Radosław STODOLAK

Institut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Institute of Environmental Engineering, Wrocław University of Environmental
and Life Sciences

Metoda obrazowania niskich stanów wód podziemnych w przestrzeni jednolitych części wód podziemnych The method of low groundwater flow charting in space of groundwater bodies

Słowa kluczowe: susza hydrogeologiczna, modelowanie GIS, metoda AHP, narażenie na suszę
Key words: groundwater drought, GIS modeling, AHP method, drought exposure

Wprowadzenie

Powodzie i susze to główne klęski żywiołowe nawiedzające naszą strefę klimatyczną (Mokwa i Radczuk, 2005). Konsekwencje wezbrań w szczególnie sposób budzą medialne zainteresowanie, a ekonomiczne i społeczne skutki deficytu wody mogą być nie mniej dotkliwe (Kaczmarek, 1998; Mokwa i Radczuk, 2005).

W literaturze nie ma jednej definicji suszy w wodach podziemnych. Część definicji odnosi się ogólnie do zjawiska. Demuth i Bakenhus (1994) stwierdzają, że susza jest to okres ograniczonej dostępności wody w porównaniu z warun-

kami standardowymi. Według Tallaksen i Van Lanena (2004) susza w wodach podziemnych jest szczególnym rodzajem suszy obserwowanym w momencie, kiedy przez dłuższy czas występuje zbyt niski lub zerowy poziom zasilania warstwy wodonośnej. Według Van Lanena i Peters (2000) susza w wodach podziemnych występuje wtedy, gdy zasilanie warstwy wodonośnej spada poniżej krytycznego poziomu, powodując jednocześnie negatywne skutki przyrodnicze i gospodarcze. Przyjmuje się, że susze wód podziemnych są kolejnym i najczęściej ostatnim etapem następującym po suszy meteorologicznej, rolniczej i hydrologicznej (Tallaksen i Van Lanen, 2004).

Pojęcie suszy hydrogeologicznej w niniejszym artykule odnosi się do suszy na poziomie wód podziemnych o zwierciadle swobodnym oraz o zwierciadle napiętym. Mając do dyspozycji

dane dotyczące położenia zwierciadła wody podziemnej, za suszę uznaje się okres, w którym poziom zwierciadła wody jest niższy od założonej wartości progowej zgodnie z metodą Threshold Level Method (Tallaksen i in., 1997; Peters, 2003). Za początek suszy przyjmuje się moment, gdy położenie zwierciadła wody spada poniżej przyjętej wartości progowej i w sposób analogiczny przekroczenie wartości poziomu zwierciadła jest jednoznaczne z końcem suszy (Tallaksen i Van Lanen, 2004).

Duża rozpiętość czasu trwania suszy hydrogeologicznej (od miesięcy do nawet kilku lat) powoduje, że zjawisko suszy hydrogeologicznej przebiega z różnym natężeniem. Zasięg przestrzenny suszy jest zazwyczaj dużo większy niż na przykład powodzi, co skutkuje trudnościami w jej ocenie ze względu na zróżnicowanie obszaru, który obejmuje (Tallaksen i Van Lanen, 2004; Sheffield i Wood, 2011; Van Loon, 2015). Wyznaczenie obszarów szczególnie narażonych na zjawisko suszy hydrogeologicznej jest więc trudnym zadaniem. Ocena narażenia na suszę wymaga podejścia wielokryterialnego, uwzględniającego informacje na temat dotychczasowych zjawisk suszy hydrogeologicznej, warunków naturalnych terenu, zasobów wód podziemnych i ich wykorzystania (Tarka i Staško, 2010; Gurwin, 2014), należy przy tym dążyć do jak najlepszego dopasowania wskaźników opisujących suszę do posiadanych informacji i właściwości badanego terenu (Hao i in., 2016).

Celem niniejszego artykułu jest opracowanie i weryfikacja uniwersalnej metody wyznaczania obszarów narażonych na suszę wód podziemnych na podstawie dostępnych informacji.

Teren badań

Obszar badawczy jest zlokalizowany w północno-zachodniej części Polski i obejmuje region wodny Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, na który składa się dziewięć jednolitych części wód podziemnych. Obszar badań obejmuje 10 zbiorników wód podziemnych (Hoc i Jeziński, 2007; Wiśniowski, 2007). Według podziału na makroregiony fizycznogeograficzne Kondrackiego (2002) obszar analiz jest położony w zasięgu jednostek regionalnych Pobrzeża Szczecińskiego oraz fragmentarycznie Pobrzeża Koszalińskiego, Pojezierza Zachodniopomorskiego, Pojezierza Południowopomorskiego, Pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej, Pojezierza Lubuskiego i Pradoliny Warciańsko-Odrzańskiej. Około 50% obszaru stanowią użytki rolne, około 40% grunty leśne oraz zadrzewione i zakrzewione (GUS, 2009). Największą rzeką regionu wodnego jest Odra. W granicach obszaru badań znajduje się Zalew Szczeciński. Wody podziemne występują w plejstoceniowym, paleogeńsko-neogeńskim, kredowym i jurajskim piętrze wodonośnym (Hoc i Jeziński, 2007; Wiśniowski, 2007). Podstawową bazę drenażu dla wszystkich systemów przepływu wód podziemnych stanowi Morze Bałtyckie. Akwen ten ma wpływ na główne kierunki przepływu wód i dyktuje reżim ciśnień piezometrycznych. Strefa drenażu wód podziemnych jest jednocześnie miejscem kontaktu zmineralizowanych wód morskich ze słodkimi wodami podziemnymi obszaru lądowego (Kryza i in., 2005).

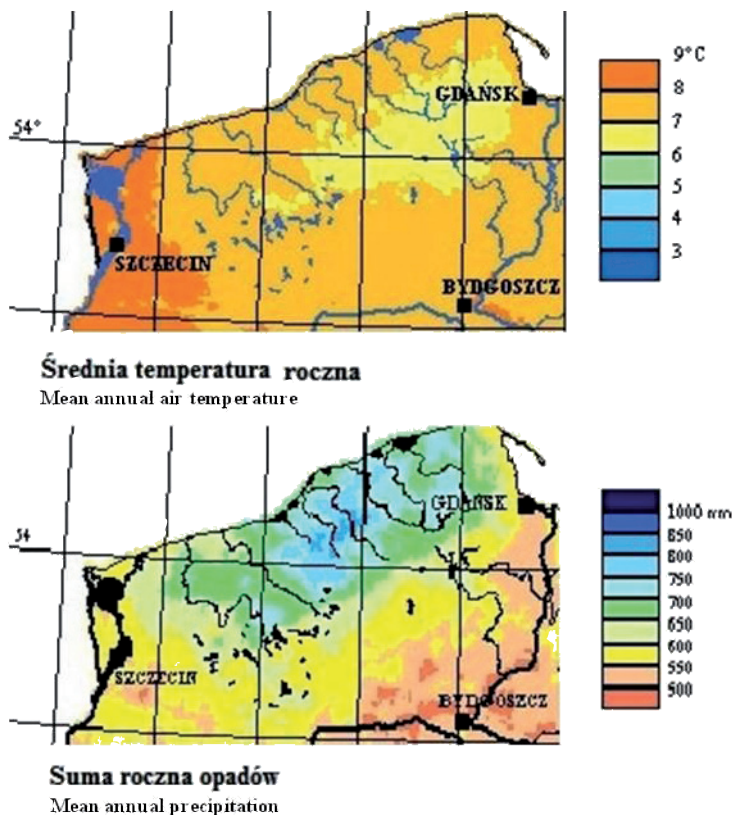
Klimat obszaru badań charakteryzuje się dużą różnorodnością i zmiennością. Obserwuje się silnie zróżnicowanie

przestrzenne i czasowe warunków opadowych i termicznych. Jest to związane głównie z cyrkulacją atmosferyczną nad Morza Bałtyckiego i północnego Atlantyku oraz ukształtowaniem powierzchni (Czarnecka i in., 2004). Średnie wieloletnie sumy opadów wahają się od poniżej 550 mm w zachodniej części opisywanego obszaru do ponad 700 mm w jego części środkowej (Michalska, 2004). W poszczególnych latach notowane są zarówno okresy skrajnie wilgotne, jak i skrajnie suche, a częstość, nasilenie i miejsce wystąpienia ekstremalnego

opadu lub suszy jest trudne do przewidzenia (Kalbarczyk i Kalbarczyk, 2006, 2010). Mapy rozkładu przestrzennego średniej temperatury oraz średniej sumy opadów przedstawiono na rysunku 1 (Górski i in., 1998a, b).

Dane i metodyka pracy

Przedstawione w artykule obliczenia i analizy opracowano z wykorzystaniem danych pochodzących z baz cyfrowych i materiałów, których dysponentami są



RYSUNEK 1. Mapa rozkładu średniej rocznej temperatury powietrza i średniej rocznej sumy opadów północnej i północno-zachodniej Polski (Górski i in., 1998a, b)
 FIGURE 1. Map of distribution of mean annual air temperature and mean annual precipitation of northern and north-western Poland (Górski et al. 1998a, b)

instytucje rządowe i samorządowe. Najważniejsze informacje, które pozyskano z Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB), dotyczyły obserwacji stanów zwierciadła wód podziemnych z lat 1974–2014. Umożliwiły one charakterystykę obszaru pod kątem dotychczasowych wystąpień niżówek w wodach podziemnych. Na obszarze badań w sieci pomiarowej znajduje się 113 punktów pomiaru stanów wód podziemnych, spośród których 81 ujmuje poziomy wodonośne o napiętym zwierciadle, a 32 – pierwszy poziom wodonośny o swobodnym zwierciadle wody. Do celów badawczych dane z sieci obserwacyjnej zostały zweryfikowane pod kątem długości serii pomiarowej, a także przerw w pomiarach. Zgodnie z kryteriami Kazimierskiego (2009) analiza objęła punkty, w których dysponowano 15-letnią serią danych. W ramach analizy wstępnej oceniono, że 18 punktów sieci ma ciąg pomiarowy ponad 20 lat i więcej oraz że są to punkty najbardziej reprezentatywne, o bardzo dużej wiarygodności. Według Kazimierskiego (2009) szeregi czasowe utworzone z pomiarów krótszych niż 10 lat wykazują wiarygodność problematyczną. Dodatkowo można wyróżnić wiarygodność dobrą (20–15 lat pomiarów) oraz dostateczną (15–10 lat obserwacji). Charakterystyka punktów badawczych wykorzystanych do stworzenia metodyki wyznaczania obszarów narażonych na suszę znajduje się w tabeli 1.

Do oceny wystąpienia niżówki, w literaturze międzynarodowej utożsamianej z suszą, zostały wykorzystane wartości progowe położenia zwierciadła wód podziemnych z wyników obserwa-

cji wieloletnich i mające bezpośrednie odniesienie do głównych stanów wód. Według przedstawionej metody położenia zwierciadła wody powyżej strefy niskich stanów wód oznaczały brak wystąpienia niżówki. Stany pomiędzy wysokim niskim położeniem zwierciadła z wielolecia a średnim niskim z wielolecia świadczyły o zagrożeniu wystąpienia niżówki. Stany poniżej strefy stanu średniego niskiego w wieloleciu oznaczały wystąpienie niżówki hydrogeologicznej (Kazimierski i in., 2009).

Na podstawie dostępnych materiałów wyselekcjonowano czynniki wpływające na narażenie obszaru na suszę. Podzielono je na naturalne i antropogeniczne. Poza zidentyfikowanymi historycznie niżówkami pod uwagę wzięto występowanie stref hydrodynamicznych (Bącik i Dobies, 2012), stopień aktualnego wykorzystania zasobów gwarantowanych wód podziemnych (Przytuła i in., 2013), występowanie obniżenia położenia zwierciadła wód podziemnych wywołanych eksploatacją ujęć oraz obniżenia wywołanych przez drenaż melioracyjny (Walczykiewicz i Szczepański, 2012), poziom rezerw zasobów wód podziemnych według wskaźnika zmian retencji (Bącik i Dobies, 2012).

W przestrzennej interpretacji zjawiska suszy hydrogeologicznej, w aspekcie narażenia obszarów, wykorzystano rozkład wszystkich czynników decydujących o narażeniu na suszę. Stosując metodę Analytic Hierarchy Process (AHP), każdej warstwie nadano odpowiedni współczynnik rangowy w zależności od wagi czynnika (Saaty, 2004). Metoda ta jest w ostatnich latach często wykorzystywana we wspomagananiu decyzji ekonomicznych, technicznych

TABELA 1. Informacje o punktach objętych analizą
 TABLE 1. Information about the analyzed monitoring points

Numer punktu Point number	Charakter zwierciadła wody Type of aquifer	Głębokość spągu warstwy wodonośnej Depth of aquifer bottom	Głębokość stropu warstwy wodonośnej Depth of aquifer top [m]	Stratygrafia Stratigraphy	Wykształcenie warstwy wodonośnej Kind of sediments	Miejscowość Location	JCWpd Ground bodies
II/642/1	swobodne	4	2	Q	piaski	Świnoujście	1
II/643/1	napięte	26	20	Q	piaski	Świnoujście	1
II/644/1	napięte	266	225	K1	piaski	Świnoujście	1
II/1039/1	napięte	36,5	17	Q	piaski + żwiry	Świnoujście	1
II/440/1	napięte	12,9	11,6	Q	piaski + żwiry	Stepnica	2
II/421/1	napięte	12,9	8	K2	margle	Wysoka Kamieńska	6
II/930/1	napięte	46	33,5	PgO1	piaski	Przybiernów	6
II/930/2	napięte	7	3	Q	żwiry	Przybiernów	6
II/1044/1	napięte	17,5	15,5	Q	piaski	Płotkowo	6
II/441/1	napięte	44	22	Q	piaski	Wardyń	7
II/432/2	napięte	60	38	Q	piaski + żwiry	Rogowo	7
II/432/3	napięte	28	23	Q	piaski	Rogowo	7
II/1022/1	napięte	58	14	Q	piaski	Żółwia Błoc	7
II/1035/1	napięte	47	23	Pg+Ng	piaski	Kania	7
I/649/1	napięte	131	105	J1	piaskowce + mułowce	Lisowo	8
I/649/2	napięte	98	35	Q	piaski + żwiry	Lisowo	8
I/649/3	napięte	8	3,1	J1	piaskowce + mułowce	Lisowo	8
II/1028/1	napięte	60	37	K2	margle	Rogozina	8
II/439/1	napięte	33	27	Q	piaski	Karlino	9
II/1024/1	napięte	37	30	Q	Piaski + żwiry	Świeszyno	9
II/1033/1	napięte	168	130	NgM	piaski	Nowe Koprzywno	9
II/1040/1	napięte	146	68	NgM	piaski	Nosibądy	9

TABELA 1 cd.
TABLE 1 cont.

Numer punktu Point number	Charakter zwierciadła wody Type of aquifer	Głębokość spagu warstwy wodonośnej Depth of aquifer bottom	Głębokość stropu warstwy wodonośnej Depth of aquifer top [m]	Stratygrafia Stratigraphy	Wykształcenie warstwy wodonośnej Kind of sediments	Miejscowość Location	JCW/Pd Ground bodies
II/1041/1	swobodne	22	1,2	Q	piaski	Wicewo	9
II/1042/1	napięte	66	58,5	Q	piaski	Mieszalki	9
II/1045/1	napięte	146	134	K2	piaski + piaskowce	Mielno	9
II/414/1	napięte	50	45	Q	piaski + żwiry	Staniewice	10
II/415/1	swobodne	24	13,25	Q	żwiry	Polanów	10
II/1026/1	napięte	163	118	K2+PgOl	margle	Jezierzany	10
II/1031/1	napięte	168	136	NgM	piaski	Dolsko	10
II/1029/1	napięte	36	23,5	NgM	piaski	Malechowo	10
II/71/1	napięte	32	18,5	Q	piaski	Głazów	23
II/1027/1	napięte	35	29	Q	piaski	Mostno	23
I/900/1	napięte	48	11	Q	piaski + żwiry	Swobnica	23
I/900/2	napięte	240	194	K2	wapienie	Swobnica	23
I/900/3	napięte	150,5	146	Q	piaski	Swobnica	23
II/1032/1	napięte	48	20	Q	piaski + żwiry	Gądno	23
II/1037/1	napięte	72	67	Q	piaski	Borzym	23
II/1144/2	napięte	54	50	Pg+Ng	piaski drobnoziar- niste	Rybojedzko	58
II/1146/1	napięte	138,3	95,5	Pg+Ng	piaski pyłowate	Świecko	58
II/1146/2	napięte	59,6	25	Pg+Ng	piaski + żwiry	Świecko	58

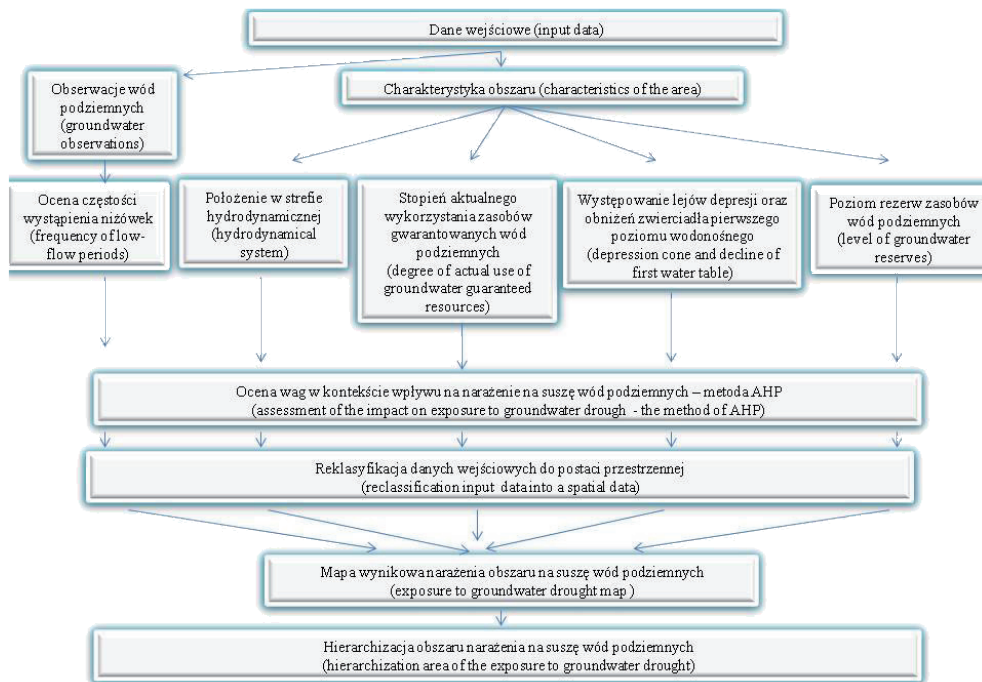
i środowiskowych (Downarowicz i in., 2000). Liczne publikacje wykazują jej przydatność szczególnie tam, gdzie doświadczenie oceniającego stanowi główne źródło ocen, a znaczna część kryte-

riów oceny jest subiektywna (Malmasi i in., 2010; Górski i in. 2015; Kubicz i in., 2015; Kubicz i in. 2016). Wagi te zostały dobrane na podstawie wyników ankiety, którą wypełnili eksperci

z różnych dziedzin naukowych (hydrologia, hydrogeologia, klimatologia i meteorologia, zarządzanie środowiskiem, inżynieria środowiska, ochrona środowiska). Na tej podstawie oceniono, która z warstw ma wyższą rangę. Pierwszy poziom modelu składał się z jednego elementu, celu zadania: oceny wpływu poszczególnych elementów na narażenie na suszę hydrogeologiczną. Na kolejnym poziomie przyjęto grupę kryteriów o znaczeniu ogólnym (czynniki naturalne, czynniki antropogeniczne). Trzeci poziom modelu obejmował

gwarantowanych wód podziemnych, występowanie lejów depresji oraz obniżen zwierciadła pierwszego poziomu wodonośnego, poziom rezerw zasobów wód podziemnych).

Pozyskane wcześniej i ocenione dane reklasyfikowano w sześciopunktowej skali. W ten sposób uzyskano przestrzenne rozkłady wybranych zmiennych. Po nałożeniu na siebie poszczególnych warstw z uwzględnieniem wag uzyskano mapę narażenia na zjawisko suszy w wodach podziemnych. Schemat postępowania przedstawiono na rysunku 2.



RYSUNEK 2. Schemat procedury tworzenia mapy narażenia obszaru na zjawisko suszy
 FIGURE 2. Procedure of creating the exposure to groundwater drought map

tw. subkryteria, będące szczegółowymi rozwinięciami kryteriów głównych (częstość występowania niżówki, położenie w strefie hydrodynamicznej, stopień aktualnego wykorzystania zasobów

Wyniki

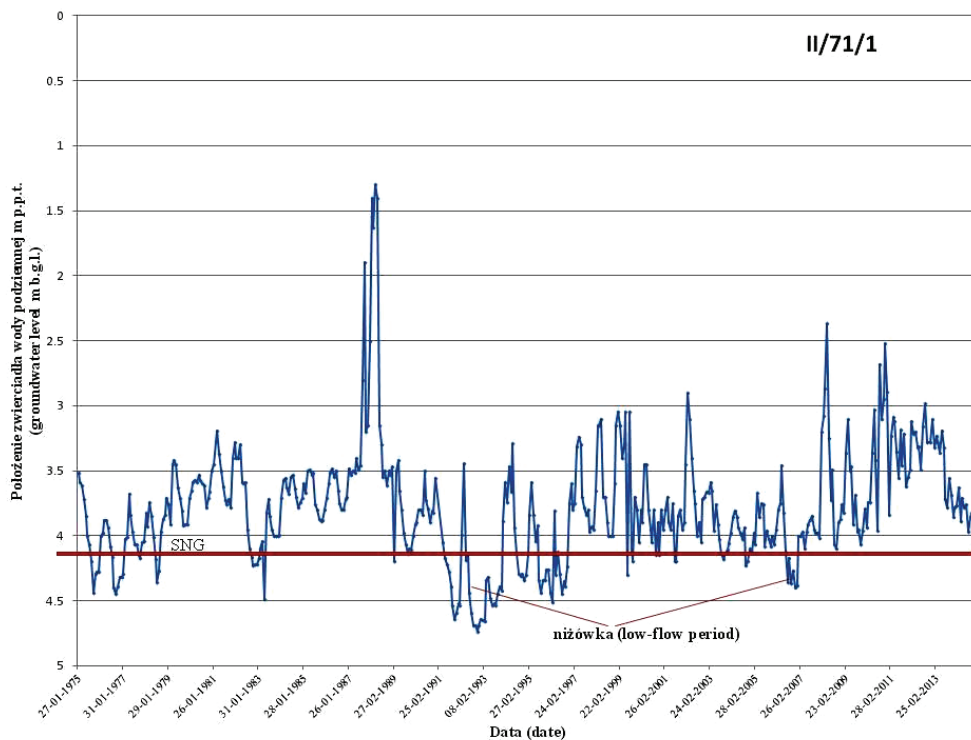
Pierwszy etap prac zakończył się wyznaczeniem okresów z zaobserwowanymi historycznymi niżówkami we

wszystkich punktach obserwacyjnych. Przykład wyznaczenia okresów z niżówkami na podstawie hydrogramu wód podziemnych przedstawiono na rysunku 3. Wyróżniono kilka charakterystycznych przedziałów czasu wystąpienia niżówki. Najbardziej charakterystyczne okresy wystąpienia niżówek to w analizowanych punktach to:

- okres od lata 1989 roku do wiosny 1994 roku,
- okres od lata 1997 roku do wiosny 1998 roku,
- okres od lata 2003 roku do wiosny 2007 roku,
- okres lata i jesieni 2008 roku,

– okres od wiosny do końca roku 2014.

Niżówki najczęściej obserwuje się w północno-zachodniej części obszaru, na południu oraz na południowym-wschodzie. Porównując mapy rozkładu opadów i częstości niżówek w wodach podziemnych, stwierdza się dużą zależność zwiększonego występowania suszy hydrogeologicznej z rozkładem opadów. Tereny te charakteryzują się również większą średnią temperaturą roczną w stosunku do pozostałych. Obszary w najmniejszym stopniu wykazujące susze to obszary nadmorskie, o większych



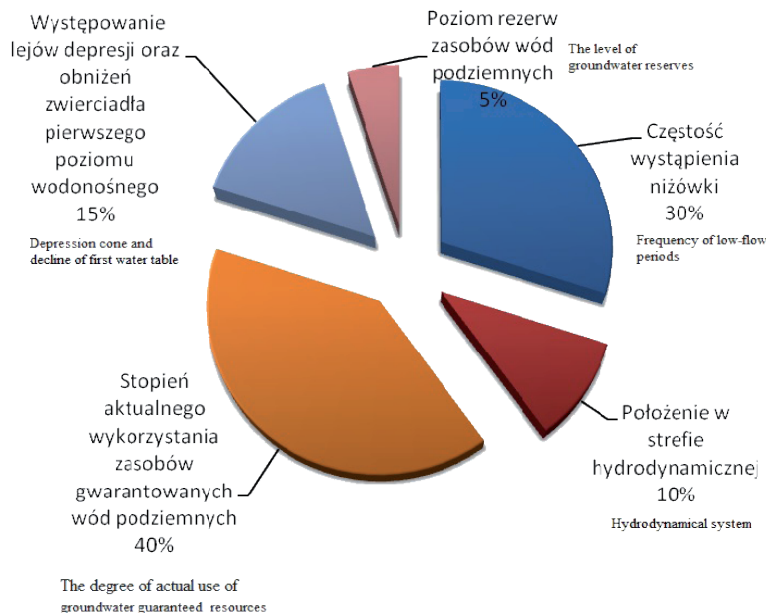
RYSunEK 3. Przykład wyznaczenia okresów niżówki w wodach podziemnych na podstawie obserwacji z punktu monitoringowego Głazów II/71/1 w latach 1975–2014

FIGURE 3. Example of determination of groundwater drought periods of Głazów II/71/1 measurement point during the period of 1975–2014

opadach niż poprzednio wymienione tereny.

Dla każdego czynnika obliczono wagi (preferencje) lokalne i globalne. W celu oceny ważności elementów zbudowano macierze ocen porównań parami wydzielonych czynników danego poziomu względem poziomu wyższego. Skalę ocen przyjęto zgodnie ze skalą opracowaną przez Saatiego (2004). Elementy znajdujące się na poziomach II i III hierarchii oceniono pod kątem ich oddziaływania na element wyżej położony. Stwierdzono, że większy wpływ na narażenie na suszę w wodach podziemnych mają czynniki antropogeniczne niż naturalne. W przypadku czynników poziomu III największe znaczenie miał stopień aktualnego wykorzystania zasobów wód gwarantowanych wód podziemnych, najmniejszy z kolei poziom rezerw wód podziemnych (rys. 4).

W kolejnej części prac utworzono warstwy informacyjne przedstawiające czynniki narażenia na suszę omawianego terenu. Mapy te powstały na skutek reklasyfikacji danych w skali sześciopunktowej zgodnie z tabelą 2. Poprzez nałożenie na siebie odpowiednich warstw informacyjnych z uwzględnieniem obliczonych wag uzyskano mapę narażenia obszaru na zjawisko suszy hydrogeologicznej (rys. 5). Zaobserwowano przestrzenne zróżnicowanie narażenia obszaru na zjawisko suszy wód podziemnych. Wydzielono cztery klasy narażenia: IV – obszary bardzo narażone, III – narażone, II – słabo narażone, I – nienarażone/nieznacznie narażone. Z uwagi na fakt, że dane dotyczące aktualnego wykorzystania zasobów gwarantowanych wód podziemnych obejmowały podział na rejonu wodno-gospodarczych, również ta informacja została umieszczona na



RYSUNEK 4. Ocena wag wybranych zmiennych według metody AHP

FIGURE 4. Model weighted overlay function parameters according to AHP method

TABELA 2. Wartości wykorzystane do reklasyfikacji danych do postaci przestrzennej
 TABLE 2. The values used to classify the standard data into the spatial data

Parametr/warstwa wejściowa The parameter/input layer	Wartość Value	Ocena Rating
Częstość wystąpienia niżówki Frequency of low-flow periods	duża	6
	średnia	5
	umiarkowana	4
	mała	3
	bardzo mała	1
Położenie w strefie hydrodynamicznej Hydrodynamical system	strefa zasilania	6
	strefa tranzytu	3
	strefa drenażu	1
Stopień aktualnego wykorzystania zasobów gwarantowanych wód podziemnych The degree of actual use of groundwater guaranteed resources	bardzo wysoki	6
	wysoki	5
	średni	4
	niski	3
	bardzo niski	1
Występowanie lejów depresji oraz obniżen zwierciadła pierwszego poziomu wodonośnego Depression cone and decline of first water table	występują	6
	nie występują	1
Poziom rezerw zasobów wód podziemnych The level of groundwater reserves	bardzo niski	6
	niski	4
	wysoki	3
	bardzo wysoki	1

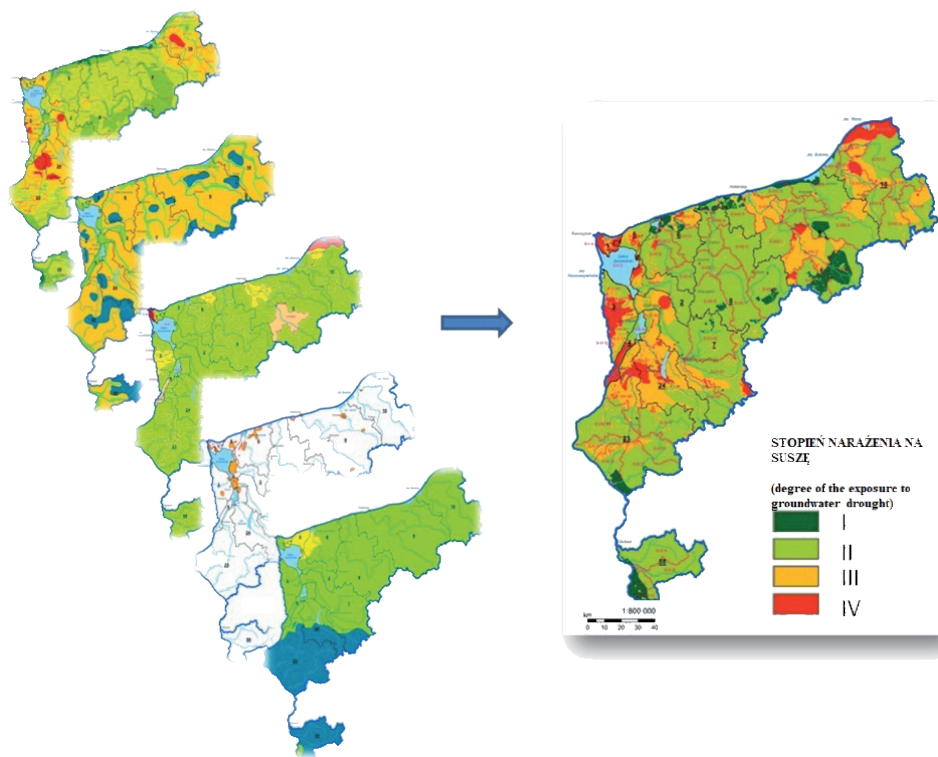
mapie wynikowej. Na podstawie mapy wynikowej stwierdzono zróżnicowanie stopni zagrożenia na analizowanym obszarze. Najwyższy stopień narażenia obejmuje północno-zachodnią, zachodnią i północno-wschodnią część terenu.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona w artykule metodyka wyznaczania obszarów narażonych na suszę hydrogeologiczną według metody Analytic Hierarchy Process (AHP) oraz z zastosowaniem techniki GIS umożliwia łączenie w analizie czynników zarówno

ilościowych, jak i jakościowych. Metoda AHP pozwala na rangowanie warstw informacyjnych pod kątem siły wpływu na występowanie zjawiska suszy. Technika GIS umożliwia przeprowadzanie przestrzennej oceny narażenia obszaru na podstawie wcześniej wyselekcjonowanych i ocenionych czynników.

Zaproponowana metoda została przetestowana z użyciem danych pochodzących z regionu wodnego Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego. Wynikiem prac było stworzenie mapy narażenia na suszę w wodach podziemnych. Należy zwrócić uwagę, że efektem prac jest ocena jakościowa, a wynik w dużej mierze



RYSUNEK 5. Schemat tworzenia wynikowej mapy narażenia na suszę w wodach podziemnych
 FIGURE 5. Scheme of creating the exposure to groundwater drought map

zależy od wiedzy ekspertów, założonych wag i rodzaju wprowadzonych warstw informacyjnych.

W aspekcie praktycznym metoda może służyć jako narzędzie podejmowania decyzji w procesie formułowania strategii gospodarowania wodami.

Literatura

Bącik, A. i Dobies, M. (2012). *Identyfikacja oddziaływań zmian poziomów wód podziemnych w obszarze RZGW Szczecin z uwzględnieniem zmian klimatu*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
 Czarniecka, M., Kozminski, C., Michalska, B., Kalbarczyk, E. i Kalbarczyk, R. (2004). Wa-

runki wilgotnościowe powietrza i gleby na Pomorzu. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Monografie*, 38, 27-45.
 Demuth, S. i Bakenhus, A. (1994). *Hydrological Drought – A literature review*. Freiburg: University of Freiburg.
 Downarowicz, O., Krause, J., Sikorski, M. i Stachowski, W. (2000). Zastosowanie metody AHP do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego. W: *Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji* (s. 7-42). Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
 Górski, K., Ignatowicz, L. R., i Bykowski, J. (2015). Zastosowanie metody AHP do projektowania komór mikrotunelowych. *Przeгляд – Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 24(4), 70, 317-330.
 Górski, T., Demidowicz, G., Deputat, T., Górski, K., Marcinkowska, I., Spoz-Pać, W., ...Za-

- liwski, A. (1998a). *Suma roczna opadów*. Puławy: Instytut Uprawy Nawożenia Gleboznawstwa.
- Górski, T., Górski, K., Wróblewska, E., Zaliwski, A., Posielski, K. (1998b). *Średnia temperatura roku*. Puławy: Instytut Upraw Nawożenia Gleboznawstwa.
- 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.
- GUS. (2009). *Leśnictwo 2009*. Pobrano z lokalizacji: http://stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/rl_lesnictwo_2009.pdf.
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., Xia, Y., Ouyang, W. i Shen, X. (2016). A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices. *Advances in Water Resources*, 92, 240-247.
- Hoc, R. i Jezierski, P. (2007). Region Zachodniopomorski. W: *Hydrogeologia regionalna Polski*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Kaczmarek, Z. (1998). *Metody oceny i przewidywania susz hydrologicznych*. XVIII Ogólnopolska szkoła hydrauliki. Gdańsk: Instytut Budownictwa Wodnego PAN.
- Kalbarczyk, E., i Kalbarczyk, R. (2006). Identification of atmospheric drought periods in north-west Poland over 1965–2004. *EJPAU*. Pobrano z lokalizacji: www.ejpau.media.pl/volume9/issue4/art-15.html.
- Kalbarczyk, E., i Kalbarczyk, R. (2010). Ocena warunków opadowych w polskiej strefie Północno-wschodniej. *Przeгляд Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 19(2), 23-34.
- Kazimierski, B., Cabaska, J., Mikołajczyk, A. i Pilichowska-Kazimierska, E. (2009). Ocena zagrożenia suszą hydrogeologiczną (gruntową) na obszarze Polski. *Materiały XVIII Ogólnopolskiego Sympozjum Monitoringu Środowiska Przyrodniczego*.
- Kondracki, J. (2002). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kryza, J., Kryza, H., Pruszkowska, M., Szczepioński, J., Szlufik, A., Tomaszewski, B. i Kleśta, W. (2005). *Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki bezpośredniego odpływu podziemnego do akwenu bałtyckiego wraz z analizą możliwości zagospodarowania i ochrony wód podziemnych*. Wrocław: Integrated Management Services Sp. z o.o., AQUATOR Sp. z o.o.
- Kubicz, J., Hämmerling, M. i Walczak, N. (2015). The Use of AHP Method for the Determination of the Most Environmentally Beneficial Variants of Barrages. *Journal of Ecological Engineering*, 16(4), 36-43.
- Kubicz, J., Hämmerling, M. i Walczak, N. (2016). Porównanie oddziaływania na środowisko różnych metod technologii unieszkodliwiania odpadów wydobywczych z wykorzystaniem metody AHP. *Inżynieria Ekologiczna*, 47, 131-136.
- Malmasi, S., Jozi, S.A., Monavari, S.M. i Jafarian, M.E. (2010). Ecological impact analysis on Mahshahr petrochemical industries using analytic hierarchy process method. *International Journal of Environmental Research*, 4(4), 725-734.
- Michalska, B. (2004). *Atlas zasobów i zagrożeń klimatycznych Pomorza*. Szczecin: Wydawnictwo Akademii Rolniczej.
- Mokwa, M. i Radczuk, L. (2005). Analiza stanów minimalnych dla wstępnej oceny przebiegu suszy hydrologicznej. *Przeгляд Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 1(31), 58-66.
- Peters, E. (2003). *Propagation of drought through groundwater systems*. Doctoral thesis. Wageningen Universiteit [manuscript].
- Przytuła, E., Filar, S. i Mordzonek, G. (2013). *Bilans wodnogospodarczy wód podziemnych z uwzględnieniem oddziaływań z wodami powierzchniowymi w polskiej części dorzecza Odry*. Warszawa: Informator Państwowej Służby Hydrogeologicznej. Państwowy Instytut Geologiczny.
- Saaty, T.L. (2004). Decision making – the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1-35.
- Sheffield, J. i Wood, E.F. (2011). *Drought: Past Problems and Future Scenarios*.
- Tallaksen, L.M., i Van Lanen, H.A. (2004). *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater* 48. Elsevier.
- Tallaksen, L.M., Madsen, H. i Clausen, B. (1997). On the definition and modelling of streamflow

drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, 42(1), 15-33.

- Tarka, R. i Staško S. (2010). Wahania zwierciadła wód podziemnych jako odzwierciedlenie ekstremalnych sytuacji pogodowych. W: *Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki* (pp. 241-255). Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego.
- Van Lanen, H.A.J. i Peters, E. (2000). Definition, effects and assessment of groundwater droughts. W: *Drought and drought mitigation in Europe* (pp. 49-61). Netherlands: Springer.
- Van Loon, A.F. (2015). Hydrological drought explained. *Water*, 2(4), 359-392.
- Walczykiewicz, T. i Szczepański, W. (2012). *Opracowanie analizy presji w wpływów zanieczyszczeń antropogenicznych w szczegółowym ujęciu wszystkich kategorii wód dla potrzeb opracowania aktualizacji programów działań i planów gospodarowania wodami*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.
- Wiśniowski, Z. (2007). Region dolnej Odry i Zalewu Szczecińskiego. W: B. Paczyński i A. Sadowski (red.), *Hydrogeologia regionalna Polski: Wody słodkie*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.

Streszczenie

Metoda obrazowania niskich stanów wód podziemnych w przestrzeni jednolitych części wód podziemnych. Wytypowanie obszarów najbardziej narażonych na suszę jest bardzo ważnym i aktualnym zadaniem. W opracowaniu zaproponowano metodykę wyznaczania obszarów narażonych

na suszę wód podziemnych łączącą metodę analizy wielokryterialnej AHP oraz technikę GIS. Wykorzystanie obu technik umożliwiło włączenie do analizy danych różnego typu. Wynikiem prac było uzyskanie mapy wynikowej i wytypowanie obszarów o różnym narażeniu na suszę hydrogeologiczną (w zakresie klas I–IV). Analizę wykonano na podstawie danych z regionu wodnego Dolnej Odry oraz Przymorza Zachodniego.

Summary

The method of low groundwater flow charting in space of groundwater bodies. Groundwater drought leads to the lowering of the ground water level and affects the functioning of whole ecosystems. This is why the determination of areas most exposure to drought. For the purposes of the study, a multi-layer model was created with use of AHP and GIS method. It constitutes a basis for the determination of areas characterised by various levels of exposure to groundwater drought (within classes I–IV). The analysis was prepared basing on data from the Lower Odra river and the Western Pomerania Region.

Authors' address:

Justyna Kubicz
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Środowiska
pl. Grunwaldzki 24
50-363 Wrocław
Poland
e-mail: Justyna.kubicz@up.wroc.pl