

Analiza czynnikowa jako metoda identyfikacji procesów kształtujących skład chemiczny wód podziemnych

Krzysztof Dragon¹, Justyna Jażdżewska¹

Factor analysis – groundwater chemistry origin identification method. Prz. Geol., 63: 688–693.

Abstract. The article presents the classification of groundwater chemistry origin in the regional aquifer system located in the Wielkopolska region (west Poland). For identification of geochemical processes that affect groundwater chemistry factor analysis was used. Two groups of processes were identified: “anthropogenic” (i.e., caused by human activity) and “geogenic” (i.e., caused by natural geochemical processes). On the background of the natural changes of groundwater chemistry, the influence of ascent water on groundwater chemistry was identified. The presented results demonstrate that factor analysis is a reliable method for differentiation of both: natural and anthropogenic processes influencing groundwater chemistry, particularly during the early phase of anthropogenic groundwater chemistry transformations. The study demonstrates general usefulness of the groundwater chemistry differentiation for support identification of groundwater flow pattern. It also demonstrates the importance of using chemical data to verify multilayer aquifers connectivity.

Keywords: factor analysis, groundwater chemistry origin, groundwater hydrogeochemical zoning

Analiza czynnikowa jest metodą statystyczną analizy wielowymiarowej szeroko stosowaną w badaniach hydrogeologicznych, w szczególności do identyfikacji procesów kształtujących skład chemiczny wód (Liszkowska, 1995; Stępień & Józwiak, 2005; Modelska & Buczyński, 2007) oraz do identyfikacji zanieczyszczeń wód podziemnych (Dragon, 2006; Jeong, 2001).

Na Niżu Polskim pojawiają się coraz częściej symptomy antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych, obserwowane w coraz głębszych poziomach wodonośnych, często przykrytych osadami słabo przepuszczalnymi (Górski, 1989; Kotowski, 2005; Dragon, 2006). W tym obszarze wyraźna jest też naturalna strefowość chemizmu wód podziemnych, związana z oddziaływaniem czynników geogenicznych (Dragon & Górski, 2015). Rozpoznanie genezy składu chemicznego wód, szczególnie gdy wpływy antropopresji rejestruje się na niskim poziomie oddziaływań jest trudnym problemem badawczym, zwłaszcza jeśli przejawy zanieczyszczenia nakładają się na zmienność naturalną w zakresie tych samych składników wód.

W artykule przedstawiono wykorzystanie analizy czynnikowej w regionalnych badaniach hydrogeologicznych do identyfikacji genezy składu chemicznego wód podziemnych. Zidentyfikowano dwie grupy procesów (geogeniczne i antropogeniczne) kształtujących skład chemiczny wód podziemnych.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Do badań wytypowano obszar zachodniej Wielkopolski pomiędzy dolinami rzek Warty (na wschodzie i północy), Obry (na zachodzie) oraz pradoliny warszawsko-berlińskiej (na południu) (ryc. 1).

Miąższość osadów czwartorzędowych lokalnie przekracza 130 m w centralnej części obszaru badań, w pradolinie warszawsko-berlińskiej sięga 60 m, a w dolinie Warty, w części północnej – nie przekracza 40 m. Są to głównie fluwalne i fluwioglacjalne osady piaszczyste, formujące

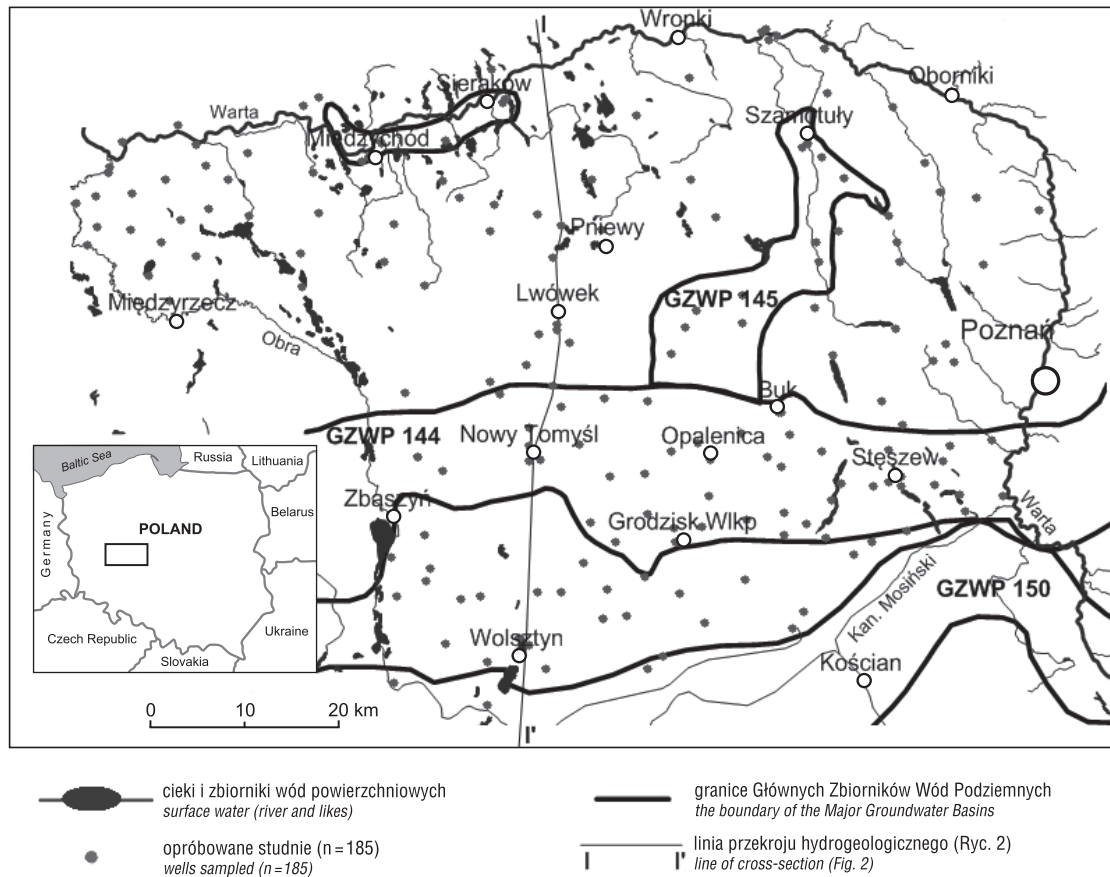
zbiorniki wód podziemnych i rozdzielające je osady gliniaste. Najgłębsze, rozpoznane lokalnie zbiorniki wód podziemnych występują na głębokości ponad 100 m i są zbudowane głównie z drobnoziarnistych piasków. Głównym zbiornikiem wodonośnym na badanym obszarze jest wielkopolska dolina kopalna (wdk) wraz z dolinami towarzyszącymi (ryc. 2). Miąższość jej osadów wynosi od 25 do ponad 40 m. Są to głównie piaski drobno- i średnioziarniste w górnych częściach profilu oraz piaski gruboziarniste, pospółki i żwiry w części dolnej. W obrębie systemu wdk wydzielono dwa Główne Zbiorniki wód Podziemnych (Kleczkowki, 1990): nr 144 i 145 (wielkopolska dolina kopalna i zbiornik Szamotuły–Duszniki). Zbiorniki wodonośne, które kontaktują się z systemem doliny kopalnej od południa i północy, mają mniejszą miąższość, najczęściej 5–20 m i są zbudowane w przewadze z piasków drobnoziarnistych. Najpłytsze poziomy międzyglinowe występują pod przykryciem kilkunastometrowej warstwy glin morenowych i najczęściej nie mają dużej miąższości (maksymalnie 10–15 m).

Główne rysy krążenia wód podziemnych nawiązują do morfologii terenu. Głównym obszarem zasilania są wyniesienia Wału Lwówecko-Rakoniewickiego w centralnej części obszaru badań. Regionalnymi obszarami drenażu są doliny Warty i Obry oraz obniżenie pradoliny warszawsko-berlińskiej.

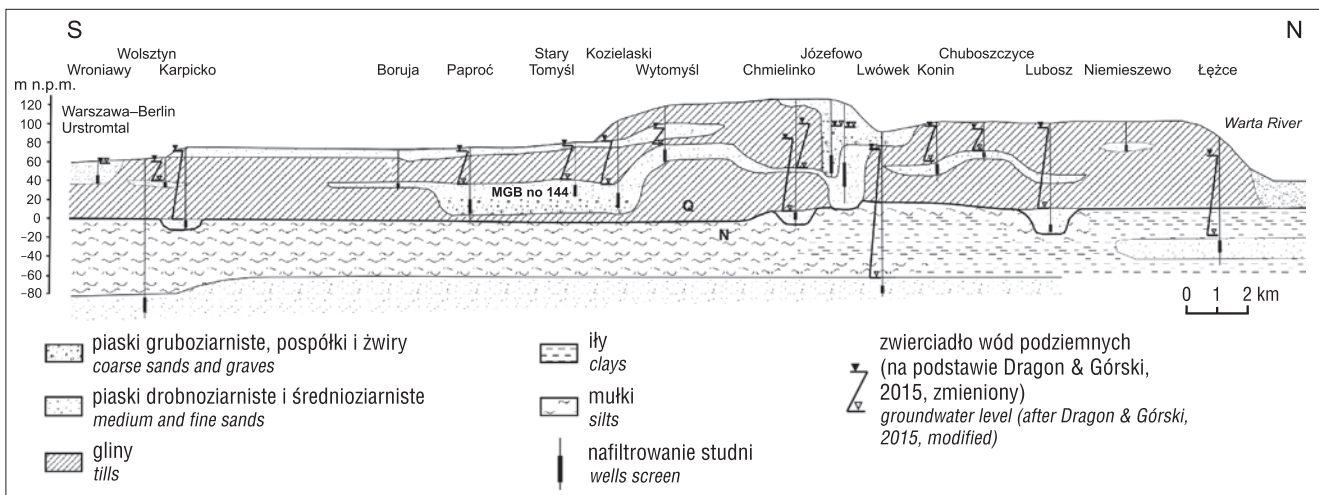
METODY BADAŃ

W artykule zaprezentowano wyniki badań pochodzące z jednoczasowego opróbowania hydrochemicznego, wykonanego w 2009 r. w 185 eksploatowanych studniach. Bezpośrednio w terenie oznaczano barwę wody, odczyn pH oraz przewodnictwo i zasadowość. Próbkę po utrwaleniu były transportowane w przenośnej lodówce do laboratorium. Do badań żelaza i manganu próbki wody utrwalały 20% roztworem HCl. Do badań związków azotu do utrwalań wód stosowano chloroform, natomiast do badań metali ciężkich zastosowano utrwalenie roztworem kwasu

¹ Instytut Geologii, Zakład Hydrogeologii i Ochrony Wód, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. Maków Polnych 16, 61-606 Poznań; smok@amu.edu.pl, jjazdz@amu.edu.pl.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle Głównych Zbiorników Wód Podziemnych
Fig. 1. Location of the study area on background of the Major Groundwater Basins



Ryc. 2. Przekrój hydrogeologiczny
Fig. 2. Hydrogeological cross-section

azotowego. Badania laboratoryjne wykonano w Instytucie Geologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Uzyskane wyniki weryfikowano na podstawie bilansu jonowego. We wszystkich wykonanych analizach błąd nie przekraczał 3%. Do interpretacji wyników badań wykorzystano konwencjonalne metody analizy danych (interpretacja map, przekrojów, diagramów, itp.) oraz metody statystycznej analizy wielowymiarowej – analizy czynnikowej.

Przed rozpoczęciem statystycznej analizy zbior danych poddano standaryzacji (Davis, 1973). Dzięki temu jest

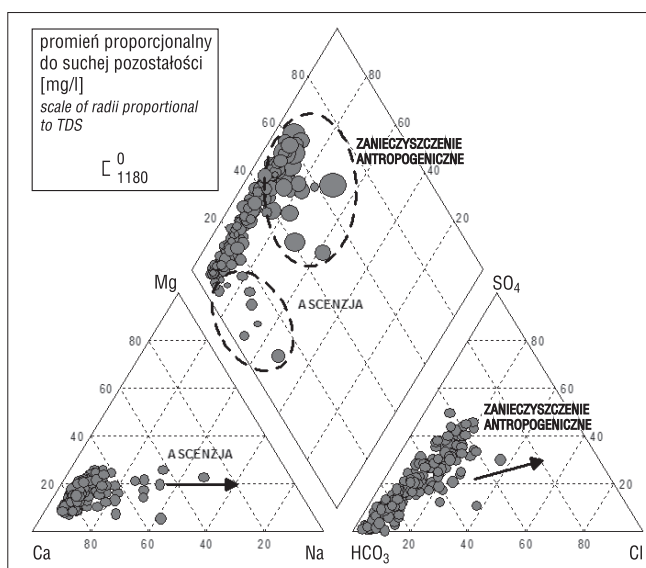
możliwa interpretacja zbioru danych wyrażanych w różnych mianach (np. mg/dm^3 , mval/dm^3), macierz korelacji może zawierać zarówno oznaczenia chemiczne (stężenie poszczególnych jonów), fizyczne (temperatura, pH, itp.), jak i czynniki środowiskowe (np. głębokość studni, miąższość nadkładu, itp.). Następnie dane poddano transformacji, w celu wyodrębnienia czynników. Do tego celu zastosowano procedurę składowych głównych, aby zaś uzyskać przejrzystą strukturę czynników – dane poddano rotacji varimax. W dalszej analizie dla każdego czynnika obliczono

wartości czynnikowe. Wielkość tego parametru odzwierciedla siłę oddziaływania danego czynnika w poszczególnych punktach (Dalton & Upchurch, 1979). Interpretacja wartości czynnikowych na mapach (przy użyciu metod interpolacyjnych krigingu) pozwoliła zidentyfikować obszary, gdzie procesy hydrogeochemiczne opisywane przez poszczególne czynniki charakteryzują się największą intensywnością oraz obszary, gdzie dany proces charakteryzuje się słabym oddziaływaniem. Wynik analizy czynnikowej jest najbardziej czytelny, gdy liczba czynników jest możliwie mała, a otrzymane czynniki dają się interpretować procesem przyrodniczym (Drever, 1997). Podczas interpretacji wyników analizy czynnikowej należy pamiętać, że efektywne wykorzystanie tej metody jest możliwe tylko wtedy, gdy są znane procesy mogące oddziaływać na analizowany zbiór danych. Na tej podstawie arbitralnie przypisuje się wyróżnionym czynnikom interpretację genetyczną.

Wadą analizy czynnikowej jest trudność w rozróżnieniu procesów, które mogą powodować podobną zmienność analizowanego zbioru danych (Olmez i in., 2001). Chodzi tu o sytuację, gdy dwa różne procesy hydrogeochemiczne prowadzą do podobnej zmienności chemizmu wód. W takim przypadku interpretację analizy czynnikowej należy uzupełnić metodami tradycyjnymi (analiza map, diagramów itp.).

WYNIKI BADAŃ

Badane wody charakteryzują się w miarę jednorodnym składem chemicznym, co obrazuje diagram Pipera (ryc. 3). Podstawowym typem hydrochemicznym wód jest typ Ca-HCO₃. Na wykresie anionów jest jednak widoczne wyraźne liniowe przesunięcie punktów znacznie w kierunku wzrostu stężeń siarczanów. Prowadzi do zmiany proporcji jonowych w kierunku typu Ca-HCO₃-SO₄. Poza tym na wykresie widać też wyraźne przesunięcie punktów w kierunku wzrostu stężeń chlorków. Jednocześnie te właśnie punkty charakteryzują się podwyższoną suchą pozostałością. Udział poszczególnych kationów nie wykazuje aż tak wyraźnej zmienności. Jedyne w kilkunastu punktach zaznacza się wyraźne przesunięcie w kierunku wzrostu



Ryc. 3. Diagram Pipera (wg Dragona & Górskiego, 2015, zmienione)

Fig. 3. Piper plot (after Dragon & Górski, 2015, modified)

udziału sodu. Jednak te punkty wykazują się suchą pozostałością charakterystyczną dla pozostałej części zbioru.

W wyniku analizy czynnikowej wyróżniono 3 czynniki, które łącznie wyjaśniają 59,2% wariancji. **Czynnik 1** – w największym stopniu charakteryzuje zmienność chemizmu wód (29,5% wyjaśnionej wariancji). Najwyższe ładunki czynnikowe posiadają chlorki, siarczany, twardość ogólna oraz sucha pozostałość (tabela 1). Wysokie ładunki czynnikowe ma ponadto mangan, dość wysokie sód i potas. Wszystkie te składniki korelują się ujemnie z pH oraz miąższością słabo przepuszczalnego nadkładu. Procesy hydrogeochemiczne, które prowadzą do takiej zmienności wiązać należy z wpływem antropopresji (Dragon, 2006; Górski, 2001). Wszystkie wymienione parametry charakteryzują się wzrostem stężeń w trakcie eksploatacji studni (Górski, 1989). Wysoka korelacja suchej pozostałości z pozostałymi składnikami wód zawartymi w czynniku świadczy, że składniki te mają duży udział w kształtowaniu mineralizacji ogólnej wód. Ujemna korelacja z pH świadczy o tym, że dopływ zanieczyszczeń wpływa na obniżenie pH wody. Może to powodować wzrost rozpuszczalności niektórych składników (m.in. manganu). Analiza przestrzenna wartości czynnikowych tego czynnika (ryc. 4) wykazuje wyraźne podobieństwo do rozkładu stężeń chlorków, siarczanów, suchej pozostałości, a w niektórych rejonach również twardości ogólnej wód. Wartości

Tab. 1. Ładunki czynnikowe (po rotacji varimax)

Table 1. Factor loadings (after varimax rotation)

Parametr Parameter	Czynnik 1 antropo- geniczny Factor 1 anthropogenic	Czynnik 2 geoge- niczny Factor 2 geogenic	Czynnik 3 ascenzja- Factor 3 upward flow
Barwa/ colour	-0,01	0,48	0,00
pH	-0,48	-0,56	-0,18
Zasadowość (HCO ₃ ⁻)/ alkalinity	0,26	0,60	0,59
Utlenialność/ oxygen consumption	-0,07	0,76	0,24
Fe ²⁺	0,14	0,81	0,17
Mn ²⁺	0,57	0,30	-0,23
B	0,04	0,00	0,76
F ⁻	-0,06	0,12	0,54
Cl ⁻	0,88	-0,13	0,14
NO ₃ ⁻ -N	0,14	-0,47	0,16
NH ₄ ⁻ -N ⁻	-0,14	0,44	0,60
Na ⁺	0,37	-0,06	0,74
K ⁺	0,48	-0,12	0,43
SO ₄ ²⁻	0,90	-0,18	-0,10
Twardość ogólna Total hardness (TH)	0,88	0,27	0,21
Sucha pozostałość Total dissolved solids (TDS)	0,90	0,08	0,25
Miąższość nadkładu Thickness of the aquitard	-0,47	0,33	0,28
% wyjaśnionej ariancji/ percentage of variance	29,5	19,6	10,1

Pogrubią czcionką oznaczono ładunki czynnikowe >0,7.

Factor loadings >0.7 are marked by bold font.

czynnikowe czynnika 1 mogą zatem posłużyć do identyfikacji obszarów podlegających najsilniejszej antropopresji na wody podziemne.

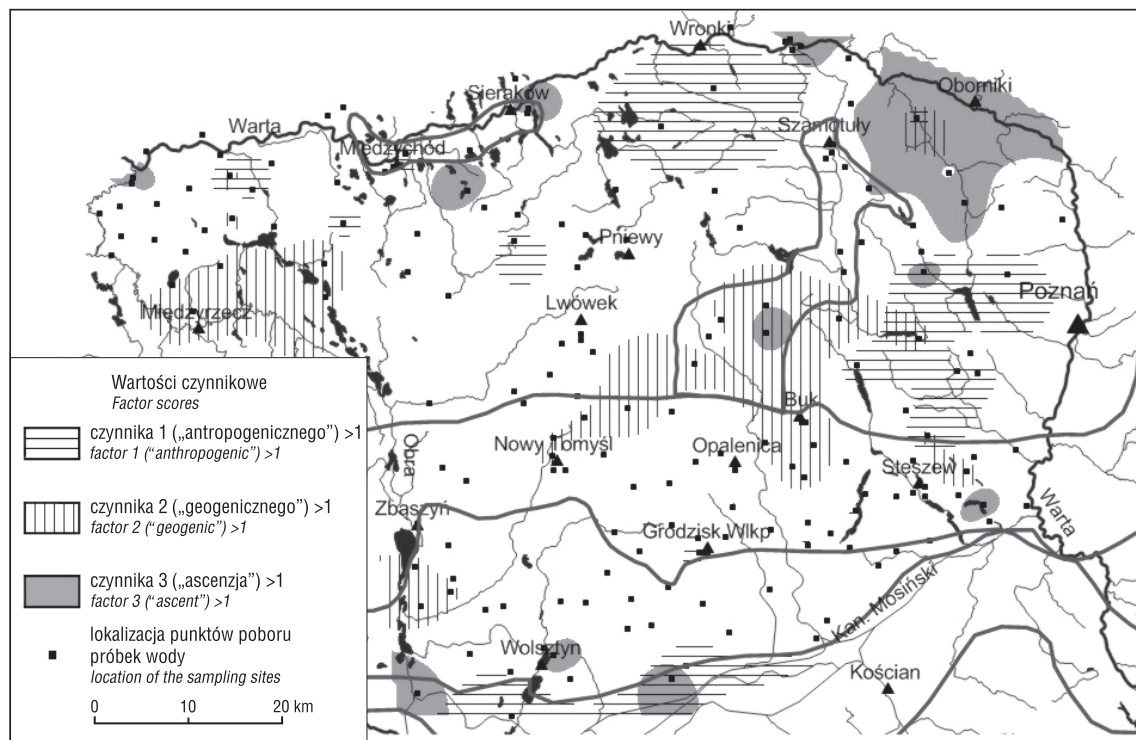
Czynnik 2 – najwyższe ładunki czynnikowe charakteryzują żelazo, utlenialność (ChZT_{Mn}), przy dość wysokim ładunku czynnikowym zasadowości i wysokich ładunkach barwy i azotu amonowego. Wszystkie te parametry opisują procesy geogeniczne, kształtujące chemizm wód. Podkreślić należy brak udziału twardości ogólnej w tym czynniku, co może świadczyć o tym, że na stężenia wapnia i magnezu większy wpływ od procesów geogenicznych ma antropopresja. Procesem, który prowadzi do obserwowanej zmienności, jest rozkład materii organicznej w środowisku anaerobowym i następnie wpływ tego procesu na rozpuszczalność składników środowiska geologicznego. Dość wysoka korelacja składników wód grupujących się w czynniku 2 z miąższością słabo przepuszczalnego nadkładu wskazuje, że procesy te rozwijają się szczególnie w głębszych strefach systemu krążenia wód. Obserwacje te są potwierdzone analizą zmienności stężeń poszczególnych parametrów wraz ze wzrostem miąższości słabo przepuszczalnego nadkładu (Dragon & Górski, 2015).

Czynnik 3 – opisuje zmienność przede wszystkim sodu i boru, przy dużym udziale fluorków oraz zasadowości, co może być spowodowane wpływem ascenzji wód z głębszego podłoża. Największą siłę oddziaływania tego czynnika zaobserwowano bowiem w głębokich studniach, w rejonach, gdzie udokumentowano (m.in. za pomocą metod izotopowych) dopływy wód z głębszego podłoża (Dragon & Górski, 2015). Utrudnieniem w interpretacji tego czynnika jest jednak fakt, że jego wysokie wartości czynnikowe obserwuje się również w płytkich studniach, gdzie można wykluczyć wpływy ascenzji, a obserwuje się jednocześnie wpływ antropopresji (szczególnie w zakresie boru,

który współwystępuje w tych punktach z wysokimi stężeniami wskaźników zanieczyszczeń antropogenicznych). Zatem należy przyjąć, że czynnik ten opisuje nakładanie się procesów geogenicznych w postaci ascenzji na efekty antropopresji.

Wyniki obliczeń analizy czynnikowej przeprowadzonych dla podzbiorów wyróżnionych w zależności od miąższości słabo przepuszczalnego nadkładu przedstawia tabela 2. W każdym z podzbiorów wyróżniono dwa najważniejsze czynniki, kształtujące chemizm badanych wód. Uzyskano podobną ich strukturę jak w analizie całego zbioru danych. Jednak można zauważyć pewne prawidłowości związane z oddziaływaniem warunków izolacji. W analizie dla najmniejszej miąższości nadkładu (do 15 m) zwraca uwagę większy udział azotanów oraz sodu i potasu w czynniku 1 (antropogenicznym). Również udział boru w tym czynniku jest wyraźny. Korelacja ze wskaźnikami zanieczyszczeń antropogenicznych świadczy o jego genezie antropogenicznej. Co ciekawe składnik ten jest obecny również w pierwszym czynniku w zbiorze danych o miąższości nadkładu powyżej 45 m. W tym zbiorze koreluje się jednak ze składnikami wód o genezie geogenicznej, szczególnie z sodem i fluorkami oraz barwą i utlenialnością, przy dużym udziale azotu amonowego. Struktura i przestrzenna analiza tego czynnika świadczą o jego genezie, związanej z ascenzją wód z głębszego podłoża. Potwierdza to analiza zmienności stężeń sodu wraz z głębokością (ryc. 5), gdzie widoczny jest wyraźny wzrost stężeń tego składnika w najgłębszych studniach.

Przeprowadzona analiza potwierdza oczywisty wpływ izolującego nadkładu na przenikanie zanieczyszczeń do wód podziemnych. Czynnik związany z oddziaływaniem antropopresji największy udział ma w pierwszych dwóch podzbiorach (do 30 m nadkładu). W zbiorze 30–45 m czynnik



Ryc. 4. Przestrzenna zmienność wartości czynnikowych
Fig. 4. Spatial distribution of the factor scores

Tab. 2. Wyniki analizy czynnikowej (ładunki czynnikowe po rotacji varimax)
Table 2. The results of the factor analyses (factor loadings after varimax rotation)

Parametr parameter	Czynnik 1 Factor 1	Czynnik 2 Factor 2	Czynnik 1 Factor 1	Czynnik 2 Factor 2	Czynnik 1 Factor 1	Czynnik 2 Factor 2	Czynnik 1 Factor 1	Czynnik 2 Factor 2
	miąższość nadkładu aquitard thickness (n = 71) < 15 m		miąższość nadkładu aquitard thickness (n = 47) 15–30 m		miąższość nadkładu aquitard thickness (n = 39) 30–45 m		miąższość nadkładu aquitard thickness (n = 26) >45 m	
Barwa/ colour	0,13	0,71	-0,22	0,50	0,17	0,05	0,77	0,23
pH	-0,62	-0,40	-0,61	-0,10	-0,70	-0,27	0,02	-0,80
Zasadowość (HCO ₃ ⁻)/ alkalinity	0,64	0,48	0,57	0,65	0,93	0,22	0,56	0,74
Utlenialność/ Oxygen consumption	0,13	0,78	-0,06	0,82	0,77	-0,21	0,70	0,50
Fe ²⁺	-0,09	0,82	0,42	0,54	0,73	-0,24	-0,17	0,67
Mn ²⁺	0,45	0,18	0,55	0,18	-0,16	0,39	-0,02	-0,19
B	0,73	0,15	0,25	0,49	0,34	0,17	0,92	0,11
F ⁻	-0,08	0,35	0,04	0,41	0,48	-0,09	0,79	-0,06
Cl ⁻	0,94	-0,09	0,90	-0,12	0,10	0,89	0,23	0,40
NO ₃ ⁻ -N	0,47	-0,37	-0,03	-0,04	0,06	0,48	-0,25	0,14
NH ₄ ⁻ -N ⁻	0,11	0,66	0,06	0,82	0,77	-0,26	0,69	0,44
Na ⁺	0,82	0,01	0,58	0,54	0,75	0,22	0,95	0,16
K ⁺	0,74	-0,01	0,67	0,32	0,72	0,46	0,68	0,57
SO ₄ ²⁻	0,78	-0,19	0,91	-0,13	-0,05	0,86	-0,52	0,18
Twardość ogólna Total hardness (TH)	0,85	0,08	0,96	0,12	0,70	0,65	-0,19	0,90
Sucha pozostałość Total dissolved solids (TDS)	0,91	-0,02	0,95	0,12	0,53	0,79	0,37	0,75
% udział / percentage of variance	36,60	16,90	38,40	16,36	37,40	18,00	41,20	17,80

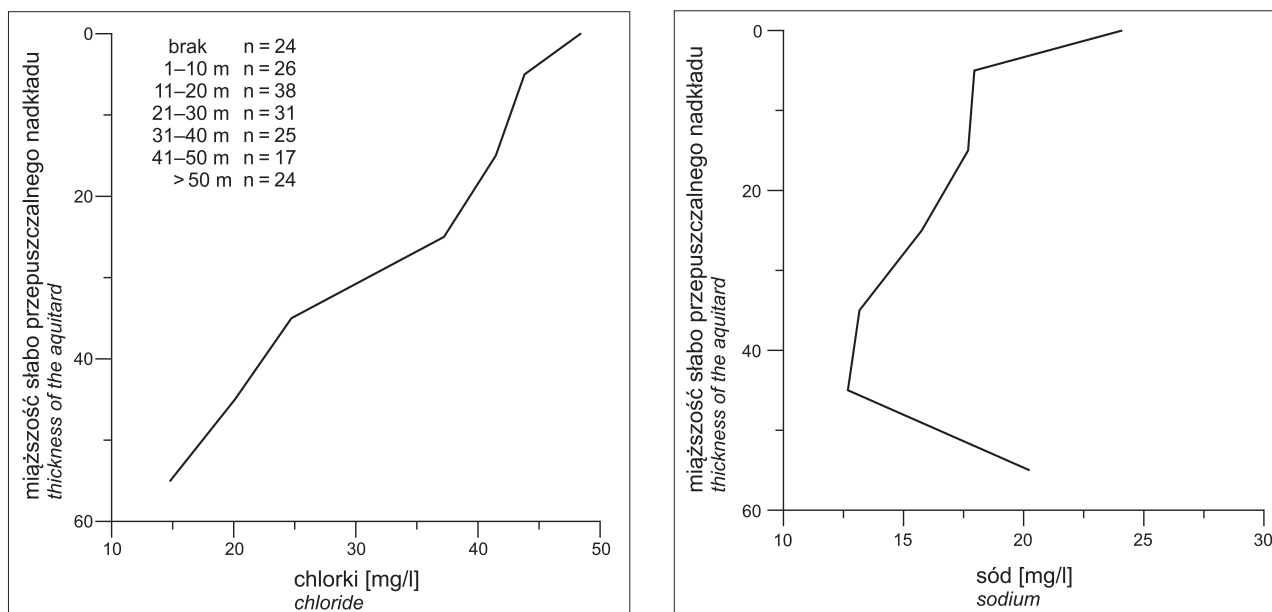
Pogrubioną czcionką oznaczono ładunki czynnikowe >0,7.
 Factor loadings >0.7 are marked by bold font.

ten zajmuje drugie miejsce pod względem wyjaśnionej wariancji, a w zbiorze o nadkładzie powyżej 45 m oddziaływanie tego czynnika jest znikome. Oznacza to praktyczny zanik antropopresji przy miąższości nadkładu powyżej 45 m. Potwierdza to analiza chlorków wraz z głębokością (ryc. 5), które w najgłębszych studniach mają stężenia na poziomie naturalnego tła hydrogeochemicznego, którego górna granica nie przekracza 20 mg/dm³ (Górski, 1989).

W opisywanej analizie wyraźnie zaznacza się też udział poszczególnych parametrów w kształtowaniu mineralizacji wód (wyrażonej suchą pozostałością). Przy miąższościach nadkładu do 45 m w procesie tym największy udział mają składniki wód związane z antropopresją. Wraz ze wzrostem miąższości nadkładu w kształtowaniu mineralizacji rośnie udział składników wód odzwierciedlających procesy geogeniczne. Wyniki analizy wyjaśniają też genezę twardości wód (tj. stężeń wapnia i magnezu), która jest związana zarówno z procesami antropogenicznymi (szczególnie w płytszych strefach systemu krążenia, przy miąższości nadkładu poniżej 30 m), jak i geogenicznymi (w głębszych strefach systemu krążenia, przy nadkładzie powyżej 30 m). Parametr ten może mieć zatem genezę zarówno geogeniczną, jak i antropogeniczną.

PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań oparto na jednoczasowym oprobowaniu hydrochemicznym, wykonanym w 2009 r. dla 185 próbek wody pobranych z czynnych studni. Badaniami objęto wody piętra czwartorzędowego w obszarze zawartym pomiędzy doliną Warty i pradoliną warszawsko-berlińską na północy i południu oraz dolinami Obry i Warty na zachodzie i wschodzie. Analiza czynnikowa pozwoliła wyróżnić podstawowe grupy procesów kształtujących skład chemiczny wód badanego obszaru. Ustalono, że antropogeniczne zmiany składu chemicznego wód (czynnik 1) odzwierciedlają się głównie w zakresie chlorków i siarczanów oraz twardości wód, co znajduje odzwierciedlenie również w mineralizacji wód. W wyniku antropopresji obniża się także pH wód. Naturalna zmienność chemizmu wód odzwierciedla się głównie w zakresie zasadowości, żelaza ogólnego, utlenialności i barwy oraz azotu amonowego (czynnik 2). Procesem prowadzącym do tej zmienności jest beztlenowy rozkład substancji organicznej, który warunkuje wzrastającą rozpuszczalność składników środowiska geologicznego. Największa intensywność tych procesów zachodzi w głębszych partiach systemu krążenia wód.



Ryc. 5. Zmienność stężeń chlorków i sodu w wodach w zależności od miąższości słabo przepuszczalnego nadkładu (n = 185)
Fig. 5. The variability of chloride and sodium concentrations with thickness of the aquitard (n = 185)

W niektórych rejonach (strefy drenażu, szczególnie w głębszych strefach systemu krążenia) zmienność geogeniczna wyraża się takimi składnikami jak: sól, bor, fluorki oraz azot amonowy zasadowość (czynnik 3), co jest związane z oddziaływaniem ascencji wód z głębszego podłoża.

Wyniki analizy czynnikowej wskazują, że oddziaływanie antropopresji jest najbardziej intensywne w płytkich poziomach wodonośnych (o miąższości nadkładu poniżej 30 m). Wraz ze wzrostem miąższości słabo przepuszczalnego nadkładu (i głębokości studni) w kształtowaniu chemizmu wód rośnie udział procesów geogenicznych. Ponadto wyniki analizy czynnikowej są pomocne do określenia łączności hydraulicznej poziomów wodonośnych, występujących w układzie piętrowym; pozwoliły również zidentyfikować wpływ oddziaływania ascencji.

Wyniki badań prezentowanych w artykule uzyskane zostały dzięki realizacji grantu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (grant 2164/BT02/2007/33).

LITERATURA

DAVIS J.C. 1973 – Statistics and data analysis in geology. Wiley, New York.
 DRAGON K. 2006 – Application of factor analysis to study contamination of a semi-confined aquifer (Wielkopolska Buried Valley aquifer, Poland). *J. Hydrology*, 331: 272–279.

DRAGON K. & GÓRSKI J. 2015 – Identification of groundwater chemistry origins in a regional aquifer system (Wielkopolska region, Poland). *Environ. Earth Sci.*, 73 (5): 2153–2167.
 DREVER J.I. 1997 – The geochemistry of natural waters. surface and groundwater environments. Prentice-Hall Upper Saddle River, New Jersey.
 GÓRSKI J. 1989 – Główne problemy chemizmu wód podziemnych utworów kenozoiku środkowej Wielkopolski. *Zeszyty Nauk. AGH*: 45.
 GÓRSKI J. 2001 – Propozycje oceny antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych na podstawie wybranych wskaźników hydrochemicznych. [W:] Bocheńskiej T. & Staško S. (red.), Współczesne problemy hydrogeologii, Tom X: 309–314. Wydaw UW, Wrocław.
 JEONG C.H. 2001 – Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea. *J. Hydrology*, 253: 194–210.
 LISZKOWSKA E. 1995 – Analiza czynnikowa jako obiektywna metoda określenia genezy składu chemicznego oraz źródeł zanieczyszczeń wód podziemnych. [W:] Współczesne problemy hydrogeologii, Tom VII: 329–336. Wydaw. Profil, Kraków
 MODELSKA M. & BUCZYŃSKI B. 2007 – Zastosowanie analizy czynnikowej w badaniach hydrochemicznych wybranych zlewni sudeckich. *Prz. Geol.*, 55 (4): 319–323.
 OLMEZ I., BEAL J.W. & VILLAUME J.F. 1994 – A new approach to understanding multiple-source groundwater contamination: factor analysis and chemical mass balances. *Water Resour. Res.*, 28 (5): 1095–1101.
 STEPIEŃ M. & JÓŹWIĄK K. 2005 – Kształtowanie się chemizmu wód podziemnych niecki krzeszowskiej i jej obrzeżenia w świetle analizy czynnikowej. [W:] Współczesne problemy hydrogeologii, Tom XII: 671–677. Wydaw. UMK, Toruń