

Aneta Afelt¹, Tomasz Ekiert², Dariusz Woronko¹

ZWIĄZEK WÓD POWIERZCHNIOWYCH I PODZIEMNYCH W WARUNKACH WEZBRAŃ POWODZIOWYCH

THE GROUNDWATER AND SURFACE
WATER INTERACTIONS IN FLOOD CONDITIONS

Abstrakt

Rozważania na temat zależności między wodami powierzchniowymi i podziemnymi są istotnym elementem badań funkcjonowania systemów hydrologicznych. Jest to szczególnie istotne w przypadku zjawisk ekstremalnych, jakimi są wezbrania powodziowe, czyli takie, które przynoszą wymierne straty gospodarcze i społeczne. Dochodzi do nich przede wszystkim w dolinach rzecznych, zarówno dużych jak i małych, co potwierdzono w niniejszej pracy, w której przedstawiono hydrologiczne zależności między wodami powierzchniowymi i podziemnymi w różnych aspektach czasowych i przestrzennych. Analiza stanów wody z posterunków wodowskazowych udowodniła, że zależności te są przede wszystkim warunkowane typem wód podziemnych oraz całkowitą retencją początkową zlewni przy wystąpieniu wezbrania. Od niej zależy, ile wody powierzchniowej zostanie

¹Zakład Hydrologii, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski

²Zakład Hydrologii, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

zużyte na uzupełnienie zapasów glebowych, a ile spowoduje podniesienie się zwierciadła wód podziemnych. Przedstawione wyniki badań potwierdzają niejednoznaczność zależności między wodami podziemnymi i powierzchniowymi. Niemniej jednak można na ich podstawie stwierdzić, że szczególnie duże wezbrania powodziowe (takie jak Wisły w 2010 roku) powodują podnoszenie zwierciadła wód podziemnych w dolinie rzecznej i drenaż wód powierzchniowych przez podziemne.

Słowa kluczowe: wody podziemne, wody powierzchniowe, wezbranie, dolina rzeczna

Abstract

The relationship between surface water and groundwater are an important part of the investigations of hydrological systems functioning. This is particularly important in the case of extreme events such as floods, especially those that bring tangible economic and social losses. They occur mainly in river valleys, both large and small, which is confirmed by this study, which shows the hydrologic relationship surface water and groundwater in different temporal and spatial aspects. The analysis of water levels from gauging stations proved that these relationships are primarily conditioned by the type of groundwater and the total initial retention in the basin before the flood. This initial retention decides how much surface water will be used to replenish soil storage and how much will cause the raise of the groundwater table. Presented results confirm the ambiguity of the relationship between groundwater and surface water. However, on the basis of this research, one can say that especially large floods (such as in the Vistula basin in 2010) cause increasing of the groundwater table in the river valley and groundwater drainage of surface water.

Key words: groundwater, surface water, flood, river valley

Wstęp

Wody powierzchniowe są nierozzerwalnie związane z systemami wód podziemnych, zależności między którymi znajdujemy we wszelkich typach krajobrazów, od małych rzek i strumieni, przez obszary mokradłowe i pojezierne po wielkie doliny rzeczne (Winter 1999). Szczególnie te ostatnie charakteryzują się dużą dynamiką hydrologiczną i złożonością procesów powodujących wzajemne zależności między wodami powierzchniowymi i podziemnymi (Woessner 2000).

Powiązania między systemami wód podziemnych i powierzchniowych są niestety w wielu dorzeczach świata słabo rozpoznane, mimo że mają fundamentalne znaczenie w skutecznym zarządzaniu zasobami wodnymi (Kalbus i in. 2006; Acworth 2009) i określaniu przyczyn i skutków wezbrań, szczególnie tych, które prowadzą do powodzi (Webb, Leake 2006).

Wzajemna relacja wód powierzchniowych i podziemnych w obrębie dolin rzecznych wydaje się być prostym związkiem, gdzie zwierciadło wody podziemnej przechodzi bezpośrednio w swobodne lustro wody powierzchniowej w korycie rzeczonym. W typowych warunkach klimatu umiarkowanego zakłada się wówczas, że wody podziemne są drenowane, zasilając wody powierzchniowe. Analiza zmienności sezonowej i wieloletniej stanów wód powierzchniowych i podziemnych na posterunkach pomiarowych usytuowanych w obrębie dolin rzecznych wykazuje, zgodnie z oczekiwaniami, większą zmienność stanów wód powierzchniowych, pozostających w ścisłej zależności od warunków zasilania atmosferycznego (Afelt, Oksiuta 2009).

Dynamika stanów wód rzecznych znajduje swoje odzwierciedlenie w wypełnieniu koryta; w sytuacji skrajnie intensywnego zasilania typowe jest przekroczenie stanu pełnokorytowego, co wiąże się z zajęciem przez wody powodziowe znaczących partii doliny. W tych warunkach w obrębie doliny zajętej przez wody powodziowe należy oczekiwać pełnego wysycenia ośrodka porowego oraz wzrostu stanów wód podziemnych w obrębie doliny zajętej przez wody rzeczne. Nie jest jednak jasne, czy za-

ležność ta jest tak bezpośrednia, jak to wynika z prostych rozważań teoretycznych; ośrodek porowy stanowi dla filtracji opór, spowalniając wlew wód powodziowych do podziemnej fazy obiegu wody.

Analiza relacji zachodzących między stanami wód powierzchniowych i podziemnych możliwa jest do przeprowadzenia w odniesieniu do par posterunków pomiarowych usytuowanych nie tylko w obrębie doliny rzecznej, ale również w bezpośrednim sąsiedztwie. Dodatkowym warunkiem jest ujmowanie przez posterunek wód podziemnych pierwszego – swobodnego horyzontu wodonośnego, powiązanego z wodami powierzchniowymi. W wyniku selekcji wytypowano przekroje hydrologicznych trzech rzek: Soły w Rajczy i Regi w Łobzie (wieloletnie ciągi danych pomiarowych, posterunki IMGW) oraz Wisły w Dęblinie i Gusinie (pomiaru własne z okresu powodzi 2010 r.).

Przedmiot i metody badań

Badania przedstawione w niniejszej pracy można podzielić na dwie części. Pierwsza z nich zawiera analizę zależności między wodami powierzchniowymi i podziemnymi rozpatrywaną na podstawie wieloletnich danych pomiarowych. Do analizy zmienności czasowej relacji stanów wód powierzchniowych i podziemnych zostały wytypowane posterunki wodowskazowe: Soła (profil Rajcza), Rega (profil Łobez) oraz korespondujące posterunki pomiarowe wód podziemnych: Rajcza i Łobez. Wykorzystano wartości codziennych stanów wód powierzchniowych oraz tygodniowych stanów wód podziemnych z wielolecia 1970-2000 (dane IMGW). Lustro wody podziemnej w posterunkach Rajcza oraz Łobez układa się powyżej rzędnej profilu wodowskazowego.

Posterunki pomiarowe wód podziemnych reprezentują tzw. płytkie wody, położone w dwóch makroregionach hydrogeologicznych (Paczyński 1995): północno-zachodnim (zlewnia Regi) i południowym (zlewnia Soły). Studnie pomiarowe usytuowane

są w obrębie dolin, jednak nie w bezpośrednim sąsiedztwa koryta. Posterunki reprezentują horyzonty wodonośne porowe, ale o odrębnej genezie: Łobez – typowe dla obszarów o genezie polodowcowej i Rajcza – porowo-szczelinowe, typowe dla obszarów górskich. Zwierciadło wód podziemnych jest swobodne; alimentacja zasadniczo następuje z zasilania atmosferycznego (opadowego i roztopowego) oraz z dodatkowego bocznego zasilania w obrębie osadów aluwialnych (nacięte erozyjnie głębsze horyzonty wodonośne).

Profil Rajcza reprezentuje warunki przepływu wody w obrębie bardzo łatwo przepuszczalnych osadów zwietrzelinowych, charakteryzujących się dużą dynamiką stanów wód powierzchniowych i podziemnych w bezpośrednim sąsiedztwie rzeki. Soła płynie w erozyjnej dolinie wypełnionej dobrze przepuszczalnym kompleksem osadów pochodzenia wietrzeniowego. Przepływ wody ma charakter nie tylko powierzchniowy, ale również zachodzi w obrębie osadów korytowych (Pietryga 1975). Posterunek wód podziemnych Rajcza usytuowany jest peryferycznie względem Soły, wyniesienie średnie lustra wody podziemnej ponad średni wieloletni stan wody w profilu wodowskazowym wynosi 10 m. W analizie pomocniczo wykorzystywany jest posterunek wód podziemnych Rycerka Górna (12 km powyżej Rajczy), usytuowany w górnym biegu potoku, z którego dostępne są codzienne stany wód podziemnych.

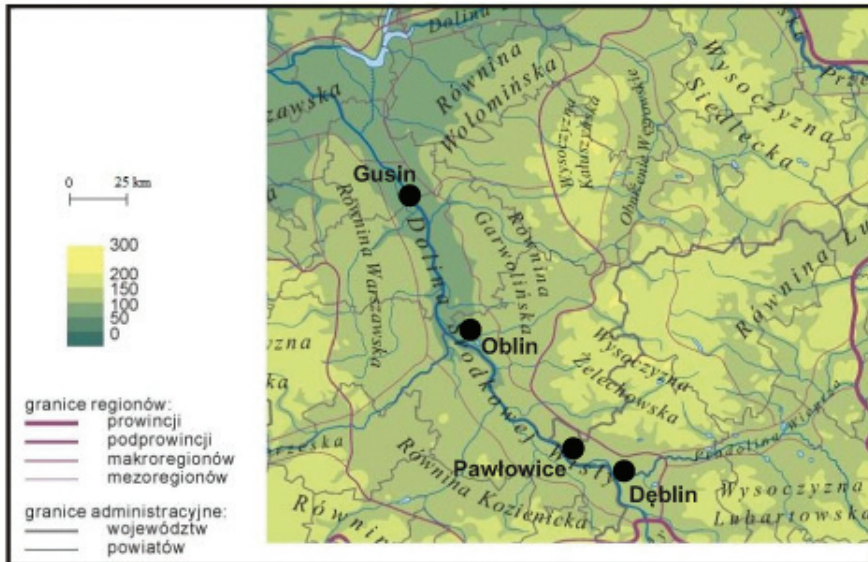
Profil Łobez jest typowy dla horyzontu wodonośnego wykształconego w osadach aluwialnych erozyjnej doliny rzeki młodoglacjalnej. Posterunek wód podziemnych jest usytuowany w obrębie doliny rzecznej w jej środkowym biegu. Wody aluwialne są w ścisłym związku z wodami posterunku pomiarowego, dodatkowo dolina Regi jest zasilana z głębszych horyzontów wodonośnych, drenowanych w wyniku wcięcia erozyjnego rzeki. Wyniesienie lustra wody podziemnej ponad średni wieloletni stan wody powierzchniowej wynosi ok. 120 cm.

Mankamentem dostępnych danych pomiarowych jest tygodniowy harmonogram pomiarowy wód podziemnych, co skut-

kuje niepełną informacją o dynamice zmienności stanów wód podziemnych w krótkich przedziałach czasu – charakterystycznych dla występowania intensywnych wezbrań.

Drugim elementem badań jest fragment doliny Środkowej Wisły od Dębina po Gusin (ryc. 1). Wisła jest rzeką o ustroju deszczowo-śnieżnym. Charakteryzuje się roztopowo-zatorowymi wezbrańiami wiosennymi oraz opadowymi, związanymi z nawalnymi i rozlewnymi opadami deszczu latem. Niżówki występują przeważnie wczesną jesienią, co jest związane z niższą sumą opadów niż w porze letniej oraz nadal dość wysoką ewapotranspiracją. Wisła charakteryzuje się dużymi wahaniami stanów wody – od bardzo głębokich niżówek do wysokich, dochodzących do korony wałów przeciwpowodziowych wezbrań. Wielkość przepływów waha się od kilkuset do ponad 10 tys. m^3s^{-1} podczas wezbrań (Falkowski 1982).

Doliny rzeczne są specyficznym typem krajobrazu. Charakteryzuje je morfologia terenu, obukierunkowe obniżenie w kie-



Ryc. 1. Obszar badań i postępniki pomiarowe na tle mapy podziału fizyczno-geograficznego Polski (wg Kondrackiego 2011)

Fig. 1. Research area and investigation sites on the background of the regional division of Poland by Kondracki (2011)

runku koryta względem wysoczyzny oraz podłużny spadek, zgodny z biegiem rzeki. Można również wyróżnić specyfikę cyklicznego funkcjonowania doliny w różnych okresach roku. Pod tym stwierdzeniem należy rozumieć ustrój rzeki, który warunkuje rodzaj i strukturę wahań stanów wody, zarówno w cyklu dobowym, sezonowym, jak i rocznym (Soczyńska 1997). Powoduje to okresowe wylewy wód rzecznych zalewających terasy zalewowe, podczas których woda występuje i płynie całym łozyskiem rzeki. Wahania wód powierzchniowych w dolinie Wisły, ściśle powiązane z wahaniami zwierciadła wód podziemnych modyfikowanych takimi czynnikami, jak klimat, litologia, orografia i morfologia terenu (Gutry-Korycka, Gąsowska 2001), w dużym stopniu wpływają na procesy glebotwórcze i typy gleb, warunkując występowanie specyficznych zespołów roślinnych. Duża część doliny Wisły między Dęblinem a Gusinem charakteryzuje się dominacją krajobrazu kulturowego, gdzie przeważają grunty orne, łąki kośne, pastwiska i sady, uprawy leśne oraz jednostki osadnicze. Te obszary oddzielone są wałami przeciwpowodziowymi, zaburzającymi naturalny cykl wezbraniowy. W tym odcinku doliny występują jednak również obszary o krajobrazie naturalnym, z przewagą roślinności potencjalnej w strukturze użytkowania ziemi (Wolski 1999).

Jednym z celów pracy jest przedstawienie zależności między wodami podziemnymi a wezbraniowymi wodami powierzchniowymi, w tym przypadku Wisły. Przez wezbranie należy rozumieć wzrost poziomu wody w rzece, jeziorze, morzu, wywołany przez zwiększone zasilanie, takie jak opady deszczu lub topnienie pokrywy śnieżnej, jak również spowodowane warunkami uniemożliwiającymi swobodny odpływ wody, np. zator lodowy lub śryżowy w okresie zimowym albo rozwój roślinności wodnej w okresie letnim (Dobrowolski i in. 2010).

Pierwsze pomiary stacjonarne stanów wody Wisły w Polsce zostały zapoczątkowane przez A. Magiera, który w 1799 r. zainstalował wodowskaz na moście pontonowym w Warszawie, między ulicą Bednarską a Bukową, które do czasów współczesnych dały przeszło 200-letnie ciągi pomiarowe (Gutry-Korycka 2007).

Zainstalowane profile wodowskazowe na Wiśle w Warszawie (1799 r.), Zawichoście (1838 r.), Puławach (1830 r.) i Dęblinie (1840 r.) dostarczyły wielu danych pomiarowych, dzięki którym w sposób ilościowy można analizować wielkie wody Wisły Środkowej (Gutry-Korycka 2007). Na ich podstawie można stwierdzić, że w „XIX i XX wieku katastrofalne wezbrania występowały co kilka lub kilkanaście lat, z nierównomierną częstością, nawet zdarzały się co roku, np. w latach 1837-1839, 1924-1925, oraz co 2 lata 1960-1962” (Gutry-Korycka 2007). Najwyższy stan wody Wisły został osiągnięty w lipcu 1844 r. – 863 cm ponad zero wodowskazu. Znaczna część przedstawionych powodzi powodowała zmiany poziomu rzeki i przebiegu koryta, wpływając na ewolucję doliny Wisły.

Dane z profili wodowskazowych Dęblin i Gusin posłużyły do scharakteryzowania sytuacji hydrologicznej badanego odcinka Wisły od 1 IV 2010 do 1 IV 2011 r. Pierwszy wodowskaz w profilu Dęblin został zainstalowany w roku 1840, niestety brak jest wyników obserwacji z lat 1840-1860 (Ujda 1969). Istniejące ciągi pomiarowe pochodzą z wodowskazu zainstalowanego w 1919 r. przy moście drogowym na Wiśle, w 393,7 km biegu rzeki (21°49'40"E; 51°33'45"N). Powierzchnia zlewni Wisły po profil Dęblin wynosi 68234,4 km², zero wodowskazu jest zlokalizowane na wysokości 109,15 m n.p.m. Kr. (Szczepański 1995-1996).

Kolejny profil wodowskazowy Gusin, zlokalizowany w 461,5 km biegu Wisły (21°15'20"E; 51°53'35"N), poniżej ujścia Wilgi, wyznaczającej północną granicą obszaru badań, został założony w roku 1974. Powierzchnia dorzecza Wisły po profil Gusin wynosi 81785,5 km², zero wodowskazu jest zlokalizowane na 91,74 m n.p.m. Kr. (Szczepański 1995-1996).

Na podstawie dobowych stanów wody w obydwu profilach wodowskazowych zgromadzono dane pomiarowe od 1 IV 2010 do 1 IV 2011 r. Umożliwiło to analizę hydrologiczną Wisły w tym okresie, jak również analizę dynamicznej zależności hydrologicznej między wodami Wisły a wodami gruntowymi w jej dolinie.

Pomiary wód podziemnych były wykonywane od 1 IV 2010 do 1 IV 2011 r., w miesięcznym kroku czasowym. Na podstawie informacji pochodzących z opracowania wykonanego na zlecenie Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Warszawie, zawierającego dane pomiarów geodezyjnych profilu podłużnego rzędnej zwierciadła wody Wisły w kilometrowych przedziałach odległości podczas powodzi w lipcu 1997, obliczono przebieg spadku podłużnego między profilami pomiarowymi Dęblin oraz Gusin (ryc. 1). Przebieg spadku podłużnego umożliwił oszacowanie rzędnej zwierciadła wody Wisły na wysokości wytypowanych posterunków wód podziemnych (Pawłowice i Oblin, ryc. 1), przy określonym stanie wody w profilu Dęblin. Wszystkie dane pomiarowe zostały sprowadzone do jednego poziomu odniesienia, którym jest poziom Morza Bałtyckiego w Kronsztadt.

Posterunek wód podziemnych Pawłowice (ryc. 1) jest położony w odległości ok. 850 m od koryta Wisły w 407,7 km jej biegu i jest oddzielony od rzeki wałem przeciwpowodziowym. Drugi posterunek wód podziemnych (Oblin, ryc. 1) zlokalizowano ok. 2800 m od Wisły, na wysokości 427,7 km biegu. Wody podziemne obserwowane w obu posterunkach reprezentują pierwszy, swobodny horyzont wodonośny w dolinie rzecznej.

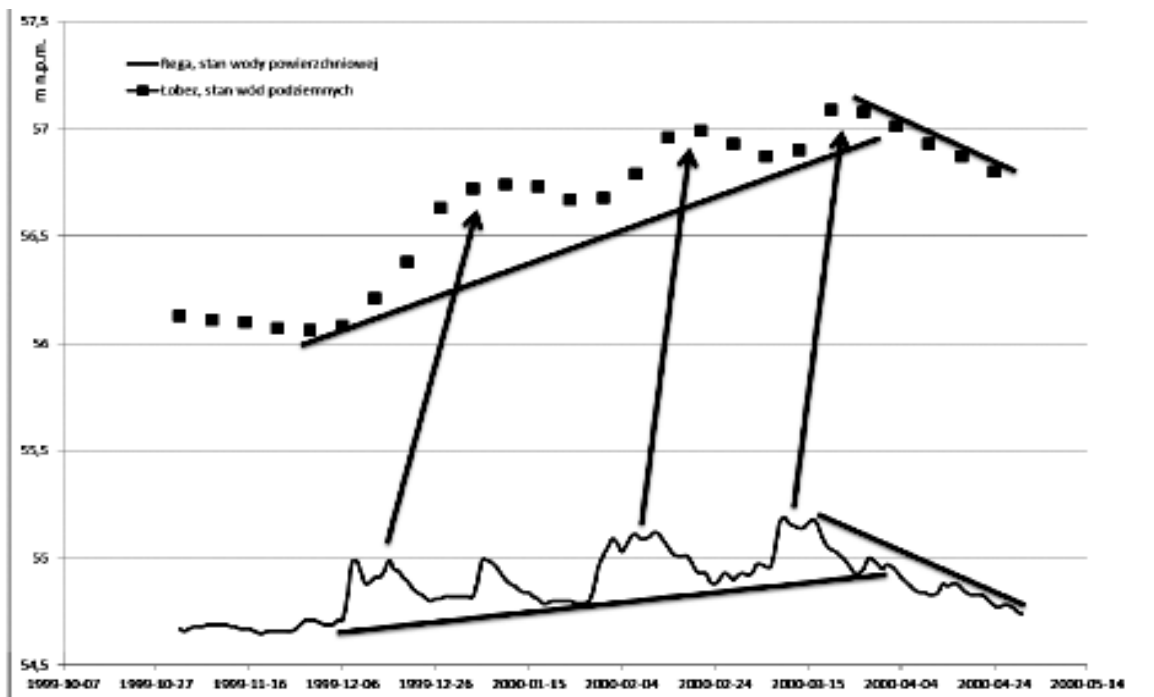
Zależność między wodami powierzchniowymi i podziemnymi w wieloleciu

Z analizy wieloletnich stanów wody podziemnej (1971-2000) wynika, że maksymalne roczne stany wody (WW) występowały w analizowanych posterunkach w odrębnych porach roku: dla Rajczy typowe były maksima przypadające na okres ciepły (czerwiec-sierpień), a w Łobzie – przeważająco występowały w chłodnej porze roku (luty-kwiecień). Co ciekawe, posterunek Łobez charakteryzuje duży rozrzut w wieloleciu stanów charakterystycznych wód podziemnych, przy największej zmienności niskiej wody (odchylenie standardowe: NW – 52, SW – 36, WW – 34). W przypadku Rajczy jedynie wysokie sta-

ny wód podziemnych wykazały odchylenie standardowe powyżej 10 (WW – 24). Generalnie czas wystąpienia maksymalnego rocznego stanu wody podziemnej następuje bezpośrednio po wystąpieniu rocznego maksimum stanu wód podziemnych w obu analizowanych parach posterunków. Opóźnienie wynosi maksymalnie do 2 tygodni (Afelt, Oksiuta 2009). Ekstremalnie wysokie stany wód podziemnych (przekroczenie średniego wysokiego stanu wód podziemnych w wieloleciu, SWW) na obu posterunkach wykazały współzmiennność. Okresy o podwyższonych stanach wód podziemnych przypadają na początek lat 1980. i przedział 1988-1994. Stwierdzono również istotną statystycznie zależność między przebiegiem stanów wód podziemnych w kroku pomiarowym tygodniowym a średnim tygodniowym stanem wód powierzchniowych obliczonym na dzień pomiaru wód podziemnych. Lepsze dopasowanie charakteryzuje Regę i Łobez (wsp. korelacji 0,64).

Analiza zmienności stanów wód powierzchniowych i podziemnych wskazuje jednak na niepełną informację zawartą w wynikach analizy statystycznej. Okazuje się, że współzmiennność przebiegu stanów wód w analizowanych parach występuje tylko w szczególnych warunkach hydrologicznych. Z uwagi na relację przestrzenną posterunku wód podziemnych do wodowskazowego, w przypadku pary Soła-Rajcza analizę graficzną przeprowadzono na danych o stanie wód, w przypadku pary Rega-Łobez sprowadzono dane do wspólnej wartości, jaką jest wyniesienie lustra wody nad poziom morza.

Niezależnie od położenia geograficznego rzeki, typu utworu porowego wyściełającego dolinę, pory kalendarzowej wystąpienia wezbrania wód powierzchniowych – można zauważyć, że przyrost stanu wód podziemnych następuje proporcjonalnie do poprzedzającego stopnia wysycenia wodą kompleksu osadowego. Oznacza to, że w cyklu następujących po sobie okresów wezbrań wód powierzchniowych w pierwszej kolejności są uzupełniane zasoby wód porowych w bezpośrednim sąsiedztwie koryta, a przyrost stanu wody podziemnej w tej fazie jest rozciągnięty w czasie (ryc. 2).

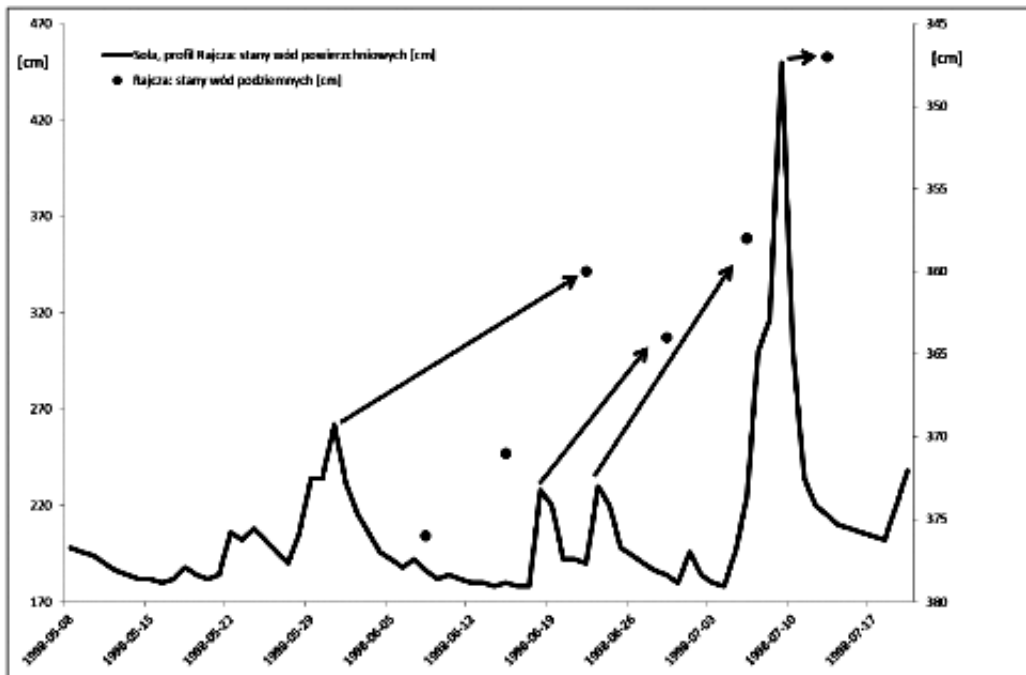


Ryc. 2. Współzmiennosc stanów wód powierzchniowych i podziemnych, rzeka Rega, profil Łobez, posterunek wód podziemnych Łobez

Fig. 2. Related fluctuations of surface water level and groundwater table (Rega river, Łobez profile, Łobez groundwater station)

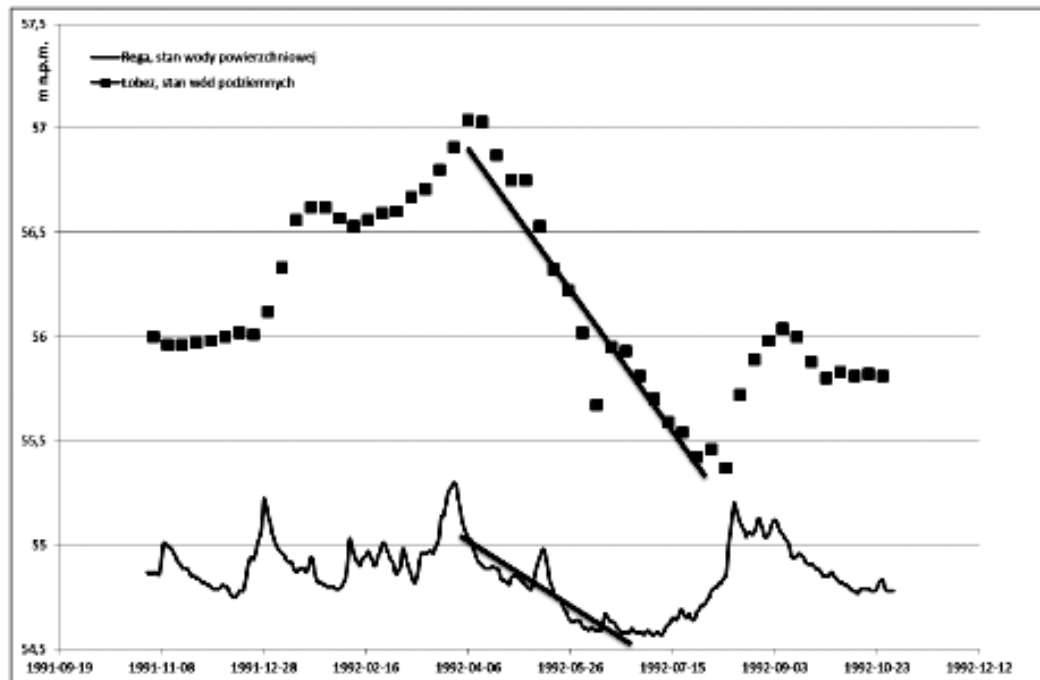
Pierwsza informacja o wysokim stanie wód powierzchniowych „zapisana” w reakcji wód podziemnych jest zwykle opóźniona o 4-6 tygodni. Wraz ze wzrastającym zwilżeniem (uzupełnieniem niedoboru wilgotności) ośrodka porowego kolejny przyrost stanu wód powierzchniowych jest „zapisany” w stanie wód podziemnych z przyspieszeniem – czas reakcji skraca się do 3-4 tygodni (ryc. 2). Każdy kolejny wznios wód powierzchniowych następujący w krótkim czasie powoduje przyspieszenie reakcji wód podziemnych (ryc. 2, 3).

Z analizy porównawczej wynika, że niekorzystny proces odwrotny – występowanie niskich stanów wód powierzchniowych wywołuje znacznie szybszą reakcję wód podziemnych (ryc. 2, 4). Krzywa spadkowa (recesji) stanów wód podziemnych charakteryzuje się większym spadkiem niż ubytek stanu wody w rzece. Prawdopodobnie jest to etap osiągnięcia w przekroju poprzecznym doliny klasycznego układu drenażu wód podziemnych. Dodatkowo etap szczytowania zasobów wód podziemnych jest potęgowany w porze letniej przez intensywny pobór płytkiej wody podziemnej na potrzeby biologiczne (głównie ewapotranspiracja) (ryc. 4).



Ryc. 3. Współmienność stanów wód powierzchniowych i podziemnych, rzeka Soła, profil Rajcza, postereunek wód podziemnych Rajcza

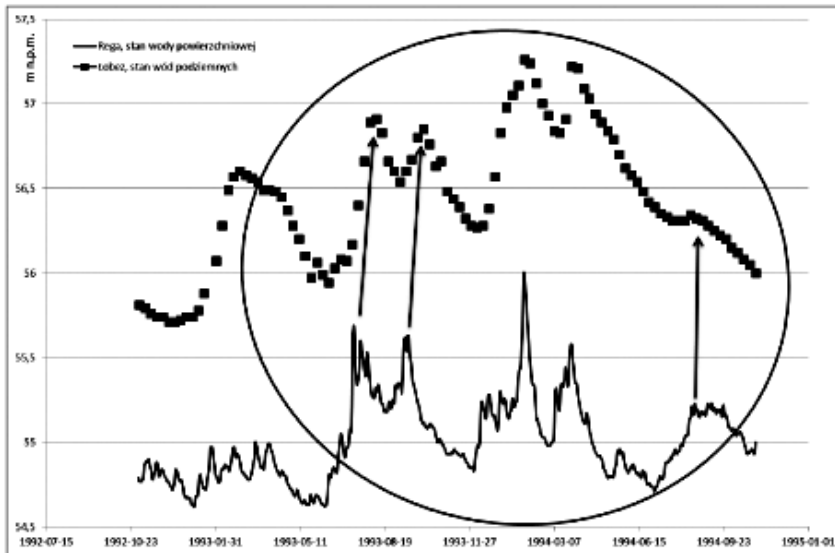
Fig. 3. Related fluctuations of surface water level and groundwater table (Soła river, Rajcza profile, Rajcza groundwater station)



Ryc. 4. Współmienność stanów wód powierzchniowych i podziemnych, rzeka Rega, profil Łobez, postereunek wód podziemnych Łobez: etap szczyptywania zasobów wód powierzchniowych i podziemnych

Fig. 4. Related fluctuations of surface water level and groundwater table (Rega river, Łobez profile, Łobez groundwater station): the stage of the reduction of surface water and groundwater resources

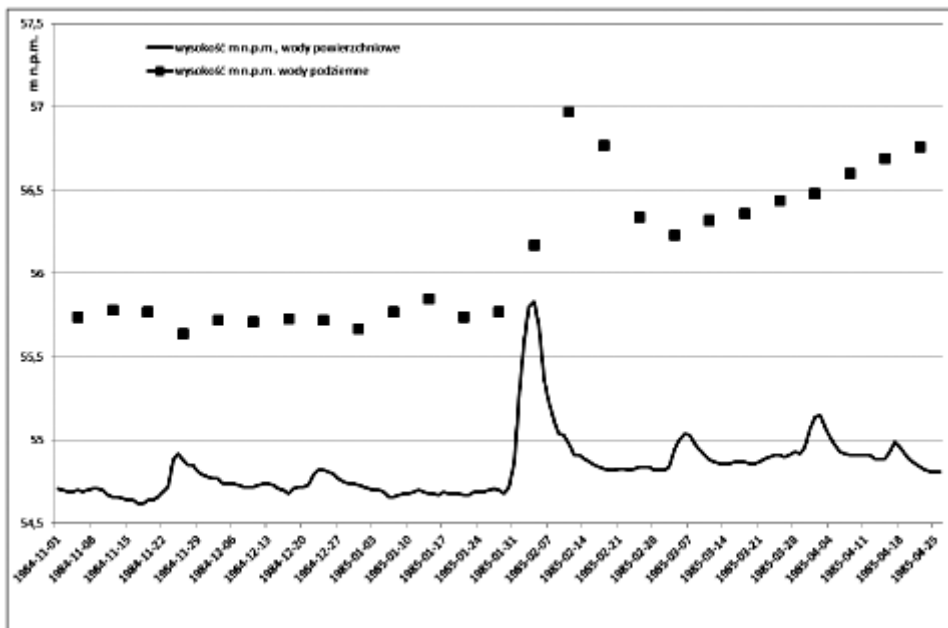
Można również przypuszczać, że w okresie ciepłym rozwój roślinności i zapotrzebowanie biologiczne na wodę w połączeniu z dużym parowaniem dodatkowo opóźnia reakcję wód podziemnych na wznios stanu wód powierzchniowych (ryc. 5).



Ryc. 5. Współzmierność stanów wód powierzchniowych i podziemnych, rzeka Rega, profil Łobez, posterunek wód podziemnych Łobez: wpływ pory roku na przebieg stanu wód

Fig. 5. Related fluctuations of surface water level and groundwater table (Rega river, Łobez profile, Łobez groundwater station): fluctuations of water levels resulting from season changes

Sytuacja intensywnego jednoczesowego wzniosu stanu wód powierzchniowych i podziemnych nie wystąpiła w żadnym z analizowanych lat wielolecia 1971-2000. Najmniejsze opóźnienie reakcji wód podziemnych na przybór wód powierzchniowych (1-2 tygodnie) występuje w sytuacji poprzedzających przyrostów stanu wody i uzupełnienia zasobów wód porowych. W przypadku Regi, profil Łobez, stwierdzono tylko jeden przypadek sytuacji hydrologicznej gwałtownego przyboru wód powierzchniowych i bardzo szybką odpowiedź wód podziemnych (ryc. 6). Prawdopodobnie w początkowych dniach lutego 1985 r. nastąpiło krótkotrwałe wystąpienie wód na powierzchnię terenu w posterunku Łobez w wyniku gwałtownego przyrostu wód powierzchniowych (być może związanych ze śródziemnymi roztopami).

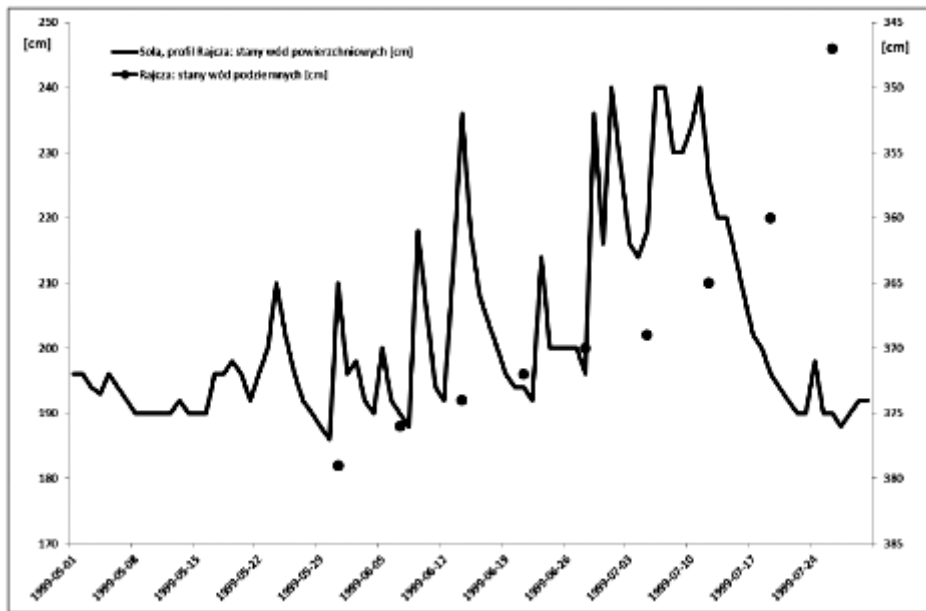


Ryc. 6. Współmienność stanów wód powierzchniowych i podziemnych, rzeka Rega, profil Łobez, posterunek wód podziemnych Łobez: podparcie zwierciadła wód podziemnych w wyniku wzrostu stanów wód powierzchniowych

Fig. 6. Related fluctuations of surface water level and groundwater table (Rega river, Łobez profile, Łobez groundwater station): backwater on groundwater table resulting from surface water level increase

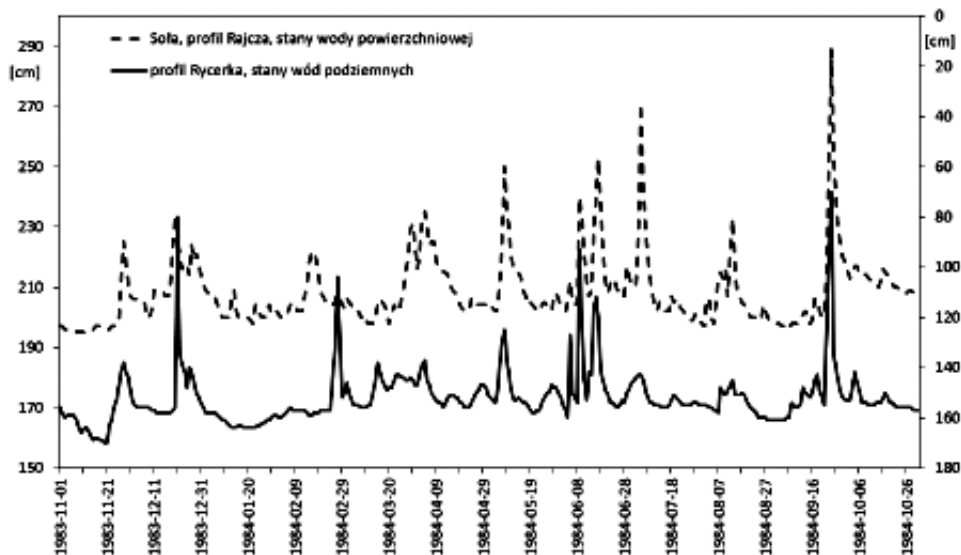
Pomimo znaczącej różnicy w wysokości lustra wód w profilu Soła-Rajcza, również tu jest zauważalna synchroniczność zmian stanów wód podziemnych i powierzchniowych. Nie jest to sytuacja równie klarowna jak w przypadku Regi, niemniej jednak jest czytelna zbliżona relacja: postępujące kolejno przyrosty stanu wód powierzchniowych powodują skrócony w czasie kolejno następujący wznios wód podziemnych (ryc. 3). Najczęściej w reakcji na kolejne wezbrania wód powierzchniowych następuje systematyczny przyrost stanu wód podziemnych (ryc. 7).

Możliwość interpretacji związku wód powierzchniowych z podziemnymi w obszarach górskich jest ograniczona stosowanym programem pomiarowym. W obrębie osadów zwietrzeliowych wypełniających doliny rzek górskich i podgórskich tygodniowy krok czasowy pomiaru jest niewystarczający do prawidłowej oceny problemu. Najlepiej ilustruje to porównanie przebiegu dobowego stanów wody powierzchniowej Soły w profilu Rajcza i dobowych pomiarów stanu wód podziemnych w stacji Rycerka Górna, położonej 12 km w górę rzeki (ryc. 8).



Ryc. 7. Współmienność stanów wód powierzchniowych i podziemnych, rzeka Soła, profil Rajcza, postarunek wód podziemnych Rajcza: przyrost stanów wody podziemnej w reakcji na następujące po sobie krótkookresowe wezbrania

Fig. 7. Related fluctuations of surface water level and groundwater table (Soła river, Rajcza profile, Rajcza groundwater station): the increase of groundwater table as a result of the succession of short-term floods



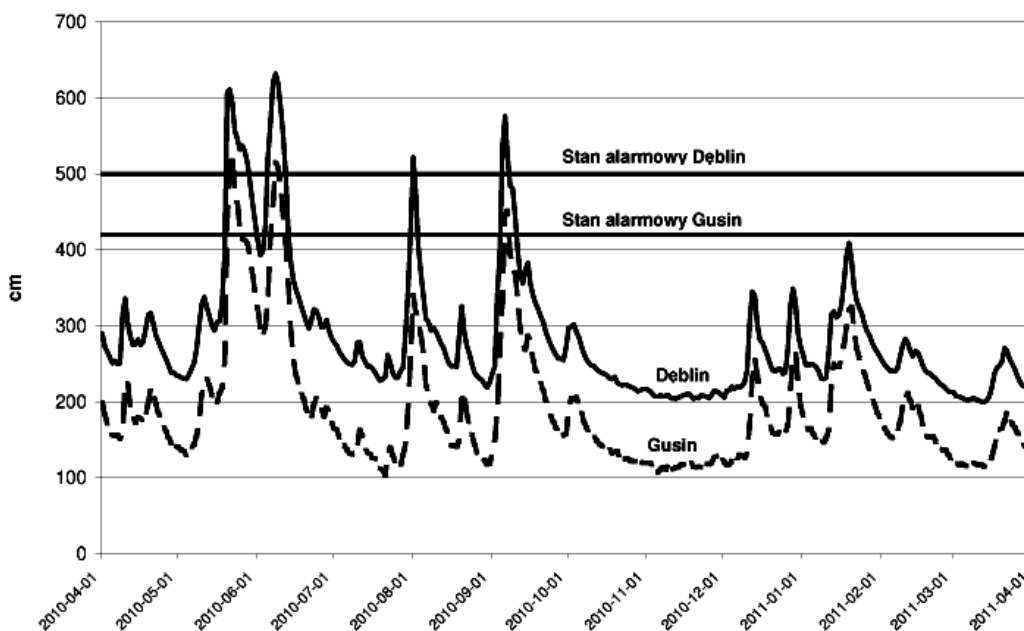
Ryc. 8. Współmienność stanów wód powierzchniowych i podziemnych, rzeka Soła, profil Rajcza, postarunek wód podziemnych Rycerka Górna: przyrost stanów wody podziemnej w reakcji na krótkookresowe wezbrania, pomiary dobowe

Fig. 8. Related fluctuations of surface water level and groundwater table (Soła river, Rajcza profile, Rycerka Górna groundwater station): the increase of groundwater table as a result of short-term floods, daily data

W obrębie płytko występujących wód aluwialnych reakcja na przyrost stanu wód rzecznych jest tu natychmiastowa. Wynika to przede wszystkim w dwóch czynników: płytko występującego horyzontu wód podziemnych oraz grubookruchowej frakcji osadów zdeponowanych w dolinie. Gwarantuje to małe opory filtracji wody, a więc szybką – niemal jednoczasową reakcję wód podziemnych na zasilanie z wód powierzchniowych.

Zależność między wodami powierzchniowymi i podziemnymi w czasie powodzi 2010 r.

Rozpatrywany okres, w porównaniu do poprzednich lat hydrologicznych, cechuje się dużą dynamiką hydrologiczną Wisły. W profilu wodowskazowym Dęblin stan alarmowy (500 cm) był



Ryc. 9. Przebieg dobowych stanów Wisły od 1 IV 2010 do 1 IV 2011 w profilach Dęblin i Gusin

Fig. 9. Daily water levels of Vistula in the period from 1 April 2010 to 1 April 2011 at the hydrometric gauging stations Dęblin and Gusin

przekroczony 4 razy, natomiast w profilu Gusin (420 cm) 3 razy (ryc. 9). Powódź w dorzeczu Wisły w 2010 r. była skutkiem powstania dwóch fal wezbraniowych, których przyczyny leżały w silnych i długotrwałych opadach deszczu w maju i czerwcu w południowej części Polski (Lipińska 2011).

Pierwsza fala powodziowa, przekraczająca stan alarmowy w profilu Dęblin, przeszła w maju (20-28 V 2010) i trwała 9 dni (H_{\max} – 611 cm), 20 V również stan alarmowy został przekroczony w profilu Gusin (H_{\max} – 525 cm), czas przejścia fali powodziowej był jednak krótszy – 6 dni (do 25 V 2010).

Ponad tydzień później, w dniach 5-11 VI 2010 r., przeszła kolejna fala powodziowa w profilu wodowskazowym Dęblin (H_{\max} – 632 cm); czas jej trwania był krótszy od poprzedniej i wyniósł 7 dni, stan maksymalny był jednak wyższy. W profilu wodowskazowym Gusin z dwudniowym opóźnieniem również został przekroczony stan alarmowy (7-11 VI 2010). Stan maksymalny (H_{\max}) podczas tego wezbrania był niższy niż w maju i wyniósł 515 cm. Przejście drugiej fali powodziowej w obydwu rozpatrywanych wodowskazach zakończyło się w tym samym dniu.

Stan alarmowy w profilu Dęblin został przekroczony również 1 VIII 2010 r., jednak był to jedynie epizod jednodniowy (H_{\max} – 522 cm). W profilu Gusin także wystąpiło wezbranie, ale nie przekroczyło ono stanu alarmowego.

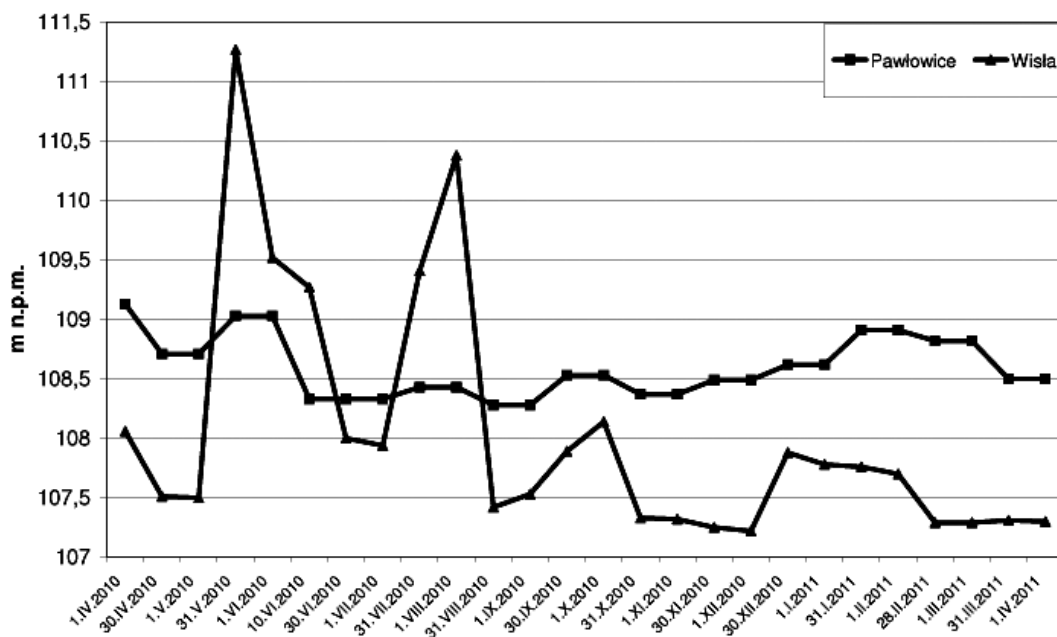
Wrzesień 2010 był kolejnym miesiącem, w którym stan alarmowy został przekroczony w obydwu profilach. W profilu Dęblin stan alarmowy został przekroczony 5-7 IX 2010 r. (H_{\max} – 576 cm). Wezbranie to było znacznie krótsze niż w maju i czerwcu, trwało tylko 3 dni. Z jednodniowym opóźnieniem w dniach 6-7 IX został przekroczony stan alarmowy w profilu Gusin (H_{\max} – 451 cm).

W rozpatrywanym okresie w profilu pomiarowym Dęblin najwyższy dobowy stan wody (WW) osiągnął 632 cm i nie przekroczył stanu WWW (730 cm) z wielolecia. Najniższy stan wody (NW) wyniósł 203 cm i nie osiągnął stanu NNW – 66 cm.

Średni stan wody w profilu Dęblin w okresie badawczym wyniósł 286 cm.

Najwyższy dobowy stan wody w profilu pomiarowym Gusin w tym okresie wyniósł 523 cm, przekraczając stan WWWW (503 cm) z wielolecia. Stan ten został przekroczony podczas dwóch fal powodziowych, które wystąpiły w maju i czerwcu 2010 r. Najniższy stan wody w tym okresie wyniósł 103 cm i nie osiągnął stanu NNW – 30 cm. Średni stan wody Wisły w rozpatrywanym okresie w profilu Gusin wyniósł 190 cm.

Liczne wezbrania wód Wisły miały swoje odbicie w zmianach stanów wód podziemnych na posterunkach Pawłowice i Oblin. Rycina 10 przedstawia przebieg stanów wód podziemnych oraz Wisły.



Ryc. 10. Rzędne zwierciadła wody na posterunku wód podziemnych Pawłowice oraz Wisły w okresie od 1 IV 2010 do 1 IV 2011 r.

Fig. 10. The elevations (m a.s.l.) of the groundwater table in Pawłowice station and Vistula water level in the period from 1 April 2010 to 1 April 2011

Dynamika zwierciadła wód podziemnych pierwszego horyzontu wodonośnego jest powiązana z ustrojem Wisły. W okresie przejścia pierwszej fali powodziowej Wisły, od 20 do 28 V 2010 r. zaobserwowano również wysoki poziom wód podziemnych.

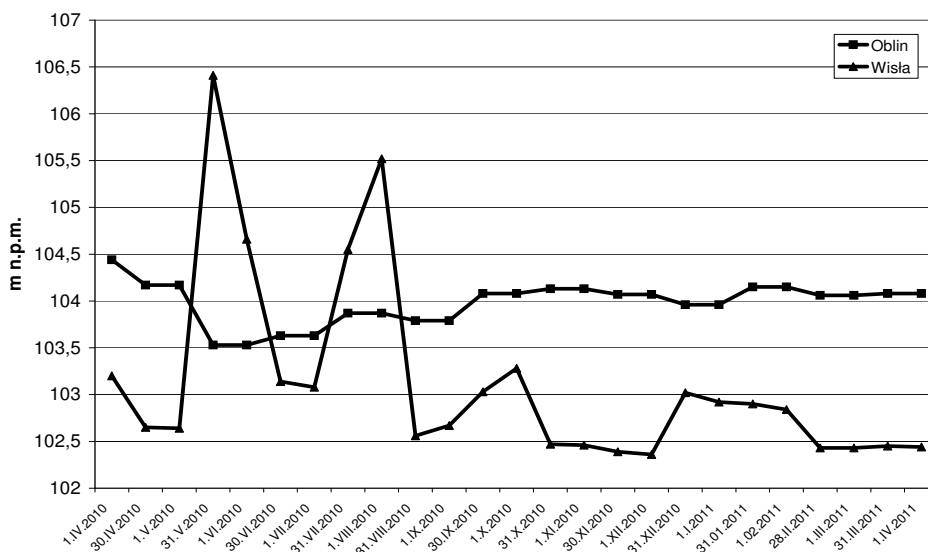
Przez większość okresu badawczego wody podziemne pierwszego horyzontu wodonośnego były drenowane przez rzekę (ryc. 10). Sytuacja ulegała zmianie podczas przejścia fali powodziowej Wisły w maju 2010 r.; wtedy nastąpiło odwrócenie zasilania. Wzrost stanów wody Wisły pociągał za sobą wzrost poziomu wód podziemnych. „Z uwagi jednak na opory stawiane przez ciało porowate (glebę), ten wzrost jest powolniejszy, a osiągnięty poziom niższy niż w rzece, jeziorze” (Gutry-Korycka, Soczyńska 1997). Kulminacja wezbrania wód podziemnych w utworach aluwialnych jest zatem zwykle opóźniona w stosunku do maksimum wezbrania wód powierzchniowych. W takiej sytuacji, gdy zwierciadło wód powierzchniowych (jezioro, rzeka) jest położone ponad zwierciadłem wód podziemnych pierwszego horyzontu wodonośnego, następuje proces nawadniania warstwy wodonośnej przez wody powierzchniowe (rzekę, jezioro). Dochodzi również do zmiany kierunku przepływu wód podziemnych (Gutry-Korycka, Gąsowska 2001).

Kolejne fale wezbraniowe nie spowodowały już tak wysokich stanów wód podziemnych, jak to miało miejsce w maju 2010 r. Doprowadziły co prawda do podniesienia się wód podziemnych, wznios ten był jednak dużo mniejszy i wolniejszy, ponieważ dużo wody zastało przeznaczone na zwilżanie strefy aeracji, jak też na ewapotranspirację.

Nieco inaczej przedstawiała się sytuacja na posterunku wód podziemnych Oblin (ryc. 11). Zmienność wód podziemnych na tym posterunku nie wykazywała już takich zależności jak w Pawłowicach. Podstawową przyczyną jest znaczna odległość od koryta Wisły. Pierwsze wezbranie w maju jest rozpoznawalne tylko w niewielkim stopniu w zmienności wód podziemnych. Po zakończeniu wezbrania następuje jedynie ich niewielki wzrost, z kulminacją w czasie wezbrania czerwcowego. Reakcja wód podziem-

nych w tym fragmencie doliny jest opóźniona, a wzrost stanów jest powolny, niemniej jednak zauważalny aż do października.

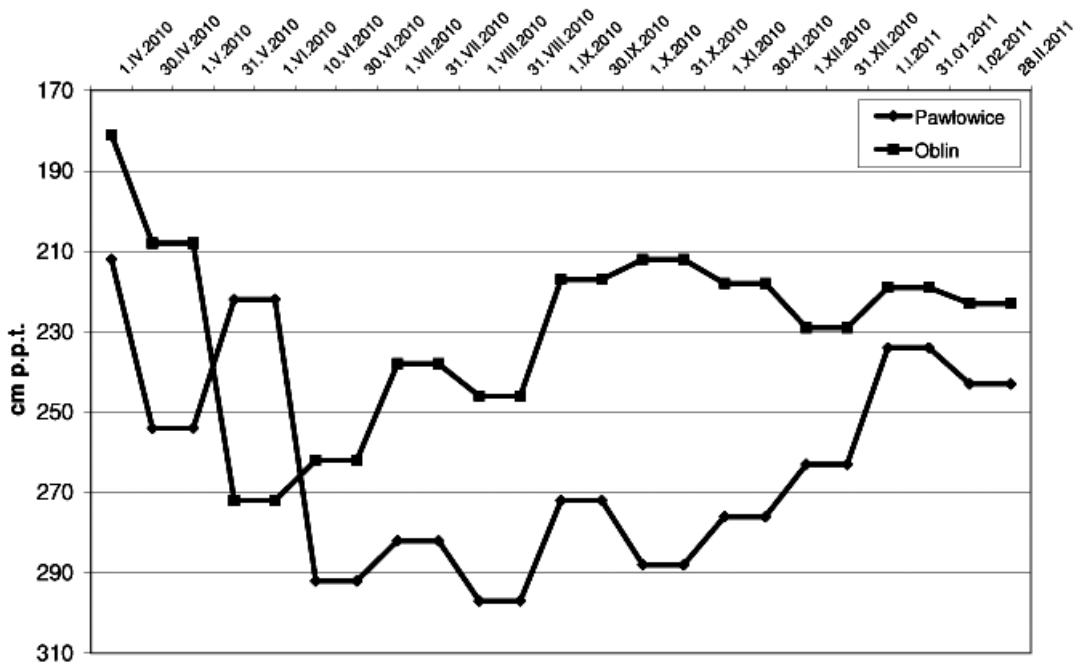
Zestawienie danych pomiarowych zwierciadła wód podziemnych w zlewni starorzecza Pawłowice i Oblin, wykonane w celu porównania dynamiki hydrogeologicznej, wykazało w niektórych okresach duże podobieństwo zmienności stanów wody w obu zlewniach (ryc. 12). Występują natomiast jednocześnie okresy różniące się ustrojem stanów wód podziemnych. W okresie przejścia majowej fali powodziowej, w wyniku zasilania wód podziemnych wodami Wisły oraz wodami pobliskiego starorzecza, doszło do podwyższenia zwierciadła wód podziemnych w Pawłowicach. W tym samym okresie stan wody mierzony na posterunku Oblin nie podniósł się, ale znacznie opadł. Sytuacja uległa odwróceniu po przejściu drugiej fali powodziowej Wisły, w czerwcu – stan wód podziemnych w Oblinie podniósł się, a w Pawłowicach znacznie się obniżył. Podczas wezbrania roztopowego Wisły, pod koniec stycznia, wody podziemne w Pawłowicach znacznie się podniosły, podczas gdy w Oblinie był niewielki wzrost.



Ryc. 11. Rzędne zwierciadła wody na posterunku wód podziemnych Oblin oraz Wisły w okresie od 1 IV 2010 do 1 IV 2011 r.

Fig. 11. The elevations (m a.s.l.) of the groundwater table in Oblin station and Vistula water level in the period from 1 April 2010 to 1 April 2011

Większą dynamiką wahań stanów wody charakteryzują się wody podziemne w Oblinie – amplituda wynosiła 91 cm. Nie jest to dziwne, gdyż warstwę wodonośną stanowią tu utwory różnoziarniste. Są to frakcje piasków różnoziarnistych, których współczynnik filtracji jest stosunkowo wysoki (Pazdro 1964). Zakres wahań stanów wody w Pawłowicach wynosi 85 cm. Przeważającymi utworami powierzchniowymi na tym obszarze jest pył, z którego wytworzyły się w wyniku procesów glebotwórczych mady rzeczne. Utwory pylaste charakteryzują się mniejszym współczynnikiem filtracji niż piaski (Pazdro 1964), co może być powodem większej dynamiki zwierciadła wód podziemnych w Oblinie niż w Pawłowicach, znajdujących się dużo bliżej koryta Wisły.



Ryc. 12. Stany wód podziemnych w zlewniach starorzeczy Pawłowice i Oblin

Fig. 12. Groundwater tables at Pawłowice and Oblin stations

Podsumowanie

Wzajemna relacja wód powierzchniowych i podziemnych w obrębie doliny rzecznej jest zmienna w czasie. Horyzont wód podziemnych nie odzwierciedla w sposób prosty zmiany stanu wód powierzchniowych. Intensywność reakcji wód podziemnych na zmiany stanu wód rzecznych zależy od wielu czynników; najważniejsze z nich to:

- przewodność wodna ośrodka porowego budującego dolinę rzeczną,
- głębokość występowania wód podziemnych, pośrednio związania z odległością posterunku pomiarowego od osi doliny rzecznej,
- stan zasobów wodnych poprzedzający przybór wód rzecznych,
- pora roku (zapotrzebowanie wodne biosfery),
- odcinek biegu rzeki.

Najsilniejszy związek między wodami podziemnymi i powierzchniowymi występuje w górnych odcinkach rzek górskich, jako efekt słabo rozwiniętego systemu rzecznej oraz wysokiej przewodności wodnej osadów dolinowych (grubookruchowa zwietrzelina).

W niższych odcinkach biegu rzek najwyższe stany wód podziemnych, korespondujące z maksymalnymi stanami wód powierzchniowych, występują w konsekwencji uzupełnienia zasobów wodnych doliny; następuje to przynajmniej z tygodniowym opóźnieniem. Im dłuższy jest czas trwania wysokich stanów wód powierzchniowych (im dłuższa jest fala wezbraniowa), tym silniej zaznacza się wzrost stanów wód podziemnych. W skrajnych przypadkach możliwe jest wystąpienie płytkich wód podziemnych na powierzchnię topograficzną.

Z reguły szczytowanie zasobów wód podziemnych przy niskich stanach wód powierzchniowych przebiega szybciej niż uzupełnianie zasobów. Dodatkowym czynnikiem pogłębiającym recesję jest ciepła pora roku, ponieważ zapotrzebowanie biolo-

giczne na wodę dodatkowo pogłębia niekorzystne warunki obniżania zasobów wód podziemnych.

Wraz ze zwiększaniem się odległości między doliną rzeczną (jej strefą zalewową) a posterunkiem pomiarowym monitorującym stany wód podziemnych stopniowo zanika bezpośrednie oddziaływanie stanów wód rzecznych na zmienność lustra wody podziemnej. Zmienność stanów wód podziemnych nabiera wówczas cech niezależnych bezpośrednio od wód związanych z doliną rzeczną.

Wielkie wezbrania, takie jak w 2010 r., mają niewątpliwy wpływ na ustrój wód podziemnych w dolinie, szczególnie wtedy, kiedy występują wiosną lub wczesnym latem, gdy zapasy wód podziemnych są nadal wysokie po roztopowym zasilaniu. W okresie letnim straty wody na zwilżanie i ewapotranspirację powodują mniejsze wzrosty stanów wód podziemnych podczas wezbrań. W przypadku szerokich dolin rzecznych (jak np. Dolina Środkowej Wisły), oprócz litologii i hydrologicznych warunków początkowych, niezwykle ważną rolę odgrywa odległość od rzeki i obecność wałów powodziowych, które zaburzają naturalny cykl obiegu wody, powodując ograniczenie strefy zalewowej, a co za tym idzie zmniejszając możliwości wymiany wody powierzchniowej z podziemną.

Literatura

Acworth R.I., 2009, *Surface water and groundwater: understanding the importance of their connections*. Australian Journal of Earth Sciences, 56.

Afelt A., Oksiuta M., 2009, *Osiąganie stanów ekstremalnych przez wody podziemne*. Prace i Studia Geograficzne, 43.

Dobrowolski A., Mierkiewicz M., Ostrowski J., Sasim M., 2010, *Regiony Polski najbardziej zagrożone powodziami katastrofalnymi*. [w:] Magnuszewski A. (red.). *Hydrologia w kształtowaniu i ochronie środowiska*, Krajowy Kongres Hydrologiczny, tom 2, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Warszawa.

- Falkowski E., 1982, *Wisła mazowiecka*. [w:] Piskozub A. (red.), *Wisła, monografia rzeki*. WKiŁ, Warszawa.
- Gutry-Korycka M., 2007, *Wielkie wody Wisły Środkowej w ujęciu historycznym*. Prace i Studia Geograficzne, 38.
- Gutry-Korycka M., Gąsowska G., 2001, *Związek wezbrań dolinnych wód podziemnych z wezbraniem Wisły*. Przegląd Geograficzny, 73.
- Gutry-Korycka M., Soczyńska U., 1997, *Cykl hydrologiczny zlewni*. [w:] Soczyńska U. (red.), *Hydrologia dynamiczna*. PWN, Warszawa
- Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M., 2006, *Measuring methods for groundwater, surface water and their interactions: a review*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 3.
- Kondracki J., 2011, *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Lipińska E.J. (red.), 2011, *Powódź 2010 – przyczyny i skutki*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Rzeszów.
- Paczyński B. (red.), 1995, *Atlas hydrogeologiczny Polski 1:500 000*. PIG, Warszawa.
- Pazdro Z., 1964, *Hydrogeologia ogólna*, Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Pietryga Z., 1975, *Odptyw podziemny w ogólnym obiegu wody w Karpatach na przykładzie dorzecza Skawy*. Materiały Badawcze, Seria: Specjalna Nr 5, IMGW, Warszawa.
- Soczyńska U. (red.), 1997, *Hydrologia dynamiczna*. PWN, Warszawa.
- Szczepański W. (red.), 1995-1996, *Atlas posterunków wodowskazowych dla potrzeb państwowego monitoringu środowiska*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- Ujda K. (red.), 1972, *Wodowskazy na rzekach Polski. Cz. 2, Wodowskazy w dorzeczu Wisły i na rzekach Przymorza na wschód od Wisły*. WKiŁ, Warszawa.
- Webb R.H, Leake S.A., 2006, *Ground-water surface-water interactions and long-term change in riverine riparian vegetation in the southwestern United States*. Journal of Hydrology, 320.

Winter T.C., 1999, *Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems*. Hydrogeology Journal, 7.

Woessner W.W., 2000, *Stream and fluvial plain groundwater interactions: Rescaling hydrogeological thought*. Ground Water, 38.

Wolski J., 1999, *Przyrodnicze podstawy opracowania optymalnej koncepcji zagospodarowania obszaru doliny Wisły od ujścia Sanu do ujścia Pilicy (KM 295-456)*. IGiPZ PAN, Warszawa.