

WPLYW OPADÓW NA WAHANIA ZWIERCIADŁA WÓD GRUNTOWYCH W ZACHODNIEJ CZĘŚCI WZNIESIEŃ ŁÓDZKICH

The influence of precipitation on water table fluctuation in the western part of Łódź Hills

JOANNA JĘDRUSZKIEWICZ*, MARIUSZ ZIELIŃSKI**, PIOTR MONIEWSKI***

Zarys treści. Położenie zwierciadła wód gruntowych uzależnione jest nie tylko od czynników meteorologicznych, ale przede wszystkim od własności hydrogeologicznych podłoża i miąższości strefy aeracji. W opracowaniu dokonano analizy relacji między zasilaniem atmosferycznym a reakcją zwierciadła wody gruntowej. W tym celu zbadano serie tygodniowych pomiarów głębokości do swobodnego zwierciadła wody gruntowej w dwóch studniach położonych w strefie miejskiej (Łódź) i zamiejskiej (Ciosny) oraz serie dobowych sum opadów atmosferycznych (Łódź-Lublinek, Ciosny) w latach 1999–2013. Stwierdzono, że w półroczu chłodnym dominują wzniosy zwierciadła wody gruntowej, wywołane sumami opadów poniżej 10 mm-tydzień⁻¹. Latem natomiast przeważają spadki zwierciadła, a wzniosy są możliwe, gdy natężenie opadów przekracza 20 mm-tydzień⁻¹. Reakcja zwierciadła wody gruntowej w płytszej studni jest bardziej dynamiczna. W głębszej odnotowano niższą amplitudę wahań oraz wydłużenie czasu reakcji na zasilanie atmosferyczne. Wzniosy wywołane opadem o podobnej wysokości w płytszej studni są w przybliżeniu dwukrotnie wyższe niż w studni głębszej.

Słowa kluczowe: opady atmosferyczne, zwierciadło wód gruntowych, strefa aeracji, klimatyczny bilans wodny, Wzniesienia Łódzkie, Łódź

Abstract. The level of the groundwater table depends not only on the weather conditions, but primarily on the hydrogeological properties of the substrate and the thickness of the aeration zone. The paper analyzes the relationship between precipitation and the groundwater table level response. For this purpose, weekly datasets of groundwater table levels (Łódź and Ciosny sites) and daily precipitation totals (Łódź-Lublinek and Ciosny) were studied for the period 1999–2013. During the cold half of the year the increase of the groundwater table level was found for relatively small precipitation (< 10 mm per week). On the contrary, in the warm half of the year a much higher precipitation totals (> 20 mm per week) are required for that increase. For the shallower well (Łódź), the groundwater table level response to precipitation is more dynamic. In the deeper well (Ciosny) the lower fluctuations of amplitude and longer response to precipitation were noticed. For the same amount of precipitation, the increase in the groundwater table level for the shallower well is twice as high as for the deeper one.

Key words: precipitation, groundwater table, aeration zone, climatic water balance, Łódź Hills, Łódź

Wprowadzenie

Wody podziemne odgrywają ważną rolę w obiegu wody na kuli ziemskiej, a ich niedobory mogą mieć negatywny wpływ na stosunki wodne na danym obszarze. Te z kolei w istotny sposób wpływają na społeczeństwo, gospodarkę i ekosystemy (Kowalczyk i in. 2015). Położenie zwierciadła wód podziemnych zależy nie tylko od czynników morfologicznych i hydrogeologicznych, ale przede wszystkim od rodzaju opadu, jego wielkości i natężenia (Dynowska, Pietrygowa 1978;

Chelmiecki 1991; Chlost 2005). Tempo wsiąkania zależy od stanu uwilgotnienia strefy aeracji, wznoszącej się nad swobodnym zwierciadłem wody. Oprócz przepuszczalności utworów powierzchniowych znaczącą rolę odgrywają atmosferyczne uwarunkowania procesu infiltracji.

Długotrwałe okresy o niewielkich sumach opadów deszczu lub zupełny ich brak mogą doprowadzić do niskiego stanu wód gruntowych, natomiast roztopy albo opady o dużym natężeniu lub czasie trwania – do znacznego podniesienia zwierciadła wód gruntowych, a nawet podtopień. Wpływ opadów na reżim zwierciadła wód pod-

* Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, Instytut Geografii, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków; e-mail: joajed@up.krakow.pl

** Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź

*** Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Łodzi, ul. Lipowa 16, 90-743 Łódź

ziemnych na Wyżynie Lubelskiej badał Dobek (2007). Regionalnej oceny dynamiki zwierciadła w środkowej Polsce dokonali także Jokieli i Tomalski (2009), Graf (2010), Tomalski (2011) oraz Grajewski i in. (2014).

Na terenie miast reakcję zwierciadła wody na zasilanie komplikuje zróżnicowany stopień uszczelnienia powierzchni, jak również eksploatacja poziomów wodonośnych poprzez ujęcia oraz odwodnienie wykopów (Bartnik i in. 2000; Bartnik, Moniewski 2015). Zarówno w krótkoterminowych, jak i w rocznych wahańach udaje się wyróżnić składową zależną od czynników naturalnych. Oprócz zasilania należy do nich także drenaż zwierciadła wody gruntowej w dolinach rzecznych, odbywający się za pośrednictwem źródeł i koryt rzecznych.

Celem pracy było zbadanie kierunku i tempa relacji zachodzących pomiędzy zasilaniem atmosferycznym a reakcją zwierciadła wody gruntowej. Zidentyfikowano także opady wpływające na wznios lub obniżanie się zwierciadła i zbadano tempo jego zmian oraz dokonano sezonowej analizy efektywnych sum opadów.

Obszar badań

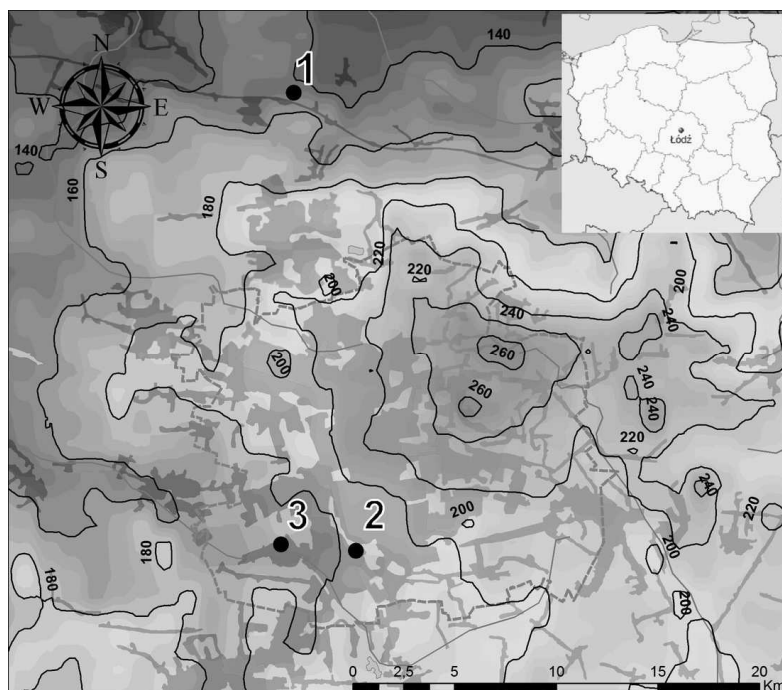
W opracowaniu wykorzystano serie tygodniowych pomiarów głębokości swobodnego zwierciadła wody gruntowej w dwóch studniach położonych w strefie miejskiej (Łódź) i zamiejskiej (Ciosny) oraz serie dobowych sum opadów atmosferycznych ze stacji Łódź-Lublinek i Ciosny dla lat 1999–2013. Analizowane studnie gospodarcze dzieli w linii prostej odległość blisko 23 km (rys. 1). W połowie tej odległości przebiega dział wodny I rzędu pomiędzy dorzeczami Odry i Wisły. Pierwsza ze studni leży we wsi Ciosny, na północ od Zgierza, na rzędnej 146,4 m n.p.m. (tab. 1). Przy studni znajduje się deszczomierz. Przez obszar ten przebiega strefa krawędziowa Wzniesień Łódzkich, charakteryzująca się dużym zróżnicowaniem przestrzennym opadów atmosferycznych (Dubaniewicz 1974; Kłysik 2001). Pod względem hydrograficznym obszar, na którym znajduje się studnia, należy do zlewni Bzury, a najbliższym ciekim jest odległa o 0,75 km Ciosenka. Swobodne zwierciadło wody nachylone jest w kierunku północnym ze spadkiem 7,1%. Studnię wykopano na stoku dużego kompleksu osadów fluwio-glacialnych, nazywanego sandrem grotnicko-luźmierskim. W jego profilu geologicznym

znajdują się średnio- oraz gruboziarniste piaski i żwiry, niekiedy na głębokości 1,5 m zalega warstwa gładzików o większej średnicy. Utwory te charakteryzują się dobrą wodoprzepuszczalnością i tworzą rozległy poziom wodonośny o dużej bezwładności hydraulicznej. W otoczeniu studni przeważają grunty orne z niewielkim udziałem lasów, rozproszoną zabudową wiejską i niewielkim stopniem uszczelnienia powierzchni terenu (< 10%). Jedynym obiektem ograniczającym infiltrację jest autostrada A2, przebiegająca kilkaset metrów na południe od studni w Ciosnach (rys. 2).

Druga studnia położona jest w południowej części Łodzi, w zlewni Neru, na wysokości 184,7 m n.p.m., w obrębie Wysoczyzny Łaskiej. Studnię zlokalizowano na łagodnie nachylonym zboczu doliny Olechówki, której koryto oddalone jest o około 0,7 km. W profilu geologicznym tej studni przeważają piaski drobne, szare, średnio zagęszczone, miejscami piaski pylaste, na głębokości 1,2 m przeławiczone mułkami zastoisłowymi. Ich miąższość zmienia się od 0 do kilkudziesięciu centymetrów, tworząc warstwę nieciągłą, nienapinającą zwierciadła wody podziemnej. Jest ono nachylone w kierunku SSW, a jego spadek wynosi 5,1%. Studnia położona jest na peryferiach miasta, pośród zabudowy jednorodzinnej (rys. 2). Dzięki temu zwierciadło wody znajduje się poza strefą oddziaływania lokalnych lejów depresji, wytworzonych przez odwodnienie budynków i tuneli. Naruszeniem naturalnych warunków infiltracji jest około 0,5 m warstwa gruntów nasypowych, pokrywająca miejscami otoczenie studni oraz sięgający 50% odsetek powierzchni trudno przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych (dachy budynków, asfalt, beton). W pobliżu studni nie ma posterunku rejestrującego opady w całym analizowanym okresie. Dlatego wykorzystano dane ze stacji meteorologicznej Łódź-Lublinek, położonej 3,5 km na zachód na wysokości 187 m n.p.m., charakteryzującej się podobnymi warunkami środowiskowymi (tab. 2).

Metody badań

Do charakterystyki opadów atmosferycznych wykorzystano wartości progowe tygodniowej sumy opadów większej bądź równej 10 i 20 mm.

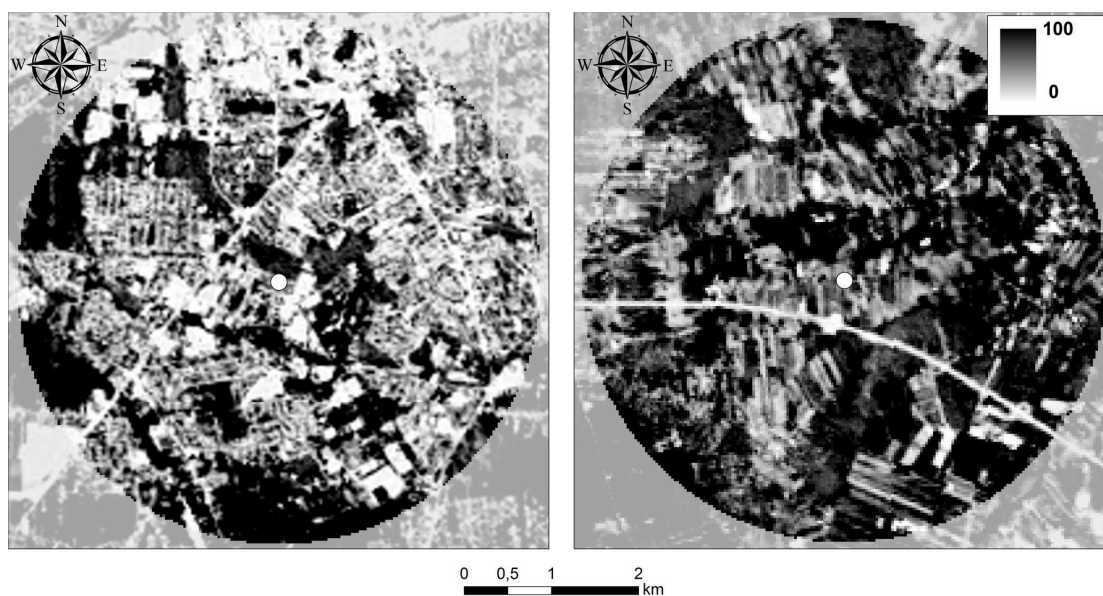


Rys. 1. Lokalizacja studni i posterunków opadowych na tle warunków hipsometrycznych

1 – Ciosny, 2 – Łódź, 3 – Łódź-Lublinek

The location of wells and precipitation sites on the ground of hypsometry

1 – Ciosny, 2 – Łódź, 3 – Łódź-Lublinek



Rys. 2. Stopień pokrycia terenu (%) przez powierzchnie sztuczne (jasny odcień) i naturalne (ciemny) w otoczeniu studni

Łódź (z lewej) i Ciosny (z prawej) oszacowany na podstawie obrazu z satelity LANDSAT 5TM
Artificial (light shade) and natural (dark shade) land cover rate in the wells' surroundings

Łódź (left) and Ciosny (right) based on LANDSAT 5TM image

Tabela 1

Położenie oraz charakterystyczne stany wód gruntowych w badanych studniach (1999–2013)

The well locations and typical groundwater levels (1999–2013)

Posterunek	Współrzędne geograficzne		Wysokość [m n.p.m.]		Odległość do rzeki	Spadek zwierciadła	Stan wody [cm p.p.t.]		
	φ	λ	posterunku	rzeki	L [km]	i [%]	max	śr.	min
Ciosny	51°43'13"	19°27'09"	146,4	137,8	0,75	7,1	260	329	356
Łódź	51°55'23"	19°24'36"	184,4	179,4	0,69	5,1	49	148	272

Tabela 2

Położenie deszczomierzy oraz średnie półroczne i roczne sumy opadów (1999–2013)

The location of precipitation sites and semi-annual and annual precipitation totals (1999–2013)

Posterunek	Współrzędne geograficzne		Wysokość bezwzględna	Suma opadów [mm]		
	φ	λ	[m n.p.m.]	XI–IV	V–X	XI–X
Ciosny	51°43'13"	19°27'09"	146,4	237,6	368,7	606,3
Łódź-Lublinek	51°43'38"	19°24'09"	187,0	233,2	361,7	594,9

W opracowaniu dokonano standaryzacji opadów atmosferycznych (P) i głębokości zwierciadła wód gruntowych (H), zgodnie z formułą:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

gdzie:

 Z – zmienna standaryzowana (Z_P, Z_H), x – obserwowana wartość zmiennej niestandardyzowanej (P, H), μ – średnia wieloletnia wartość zmiennej (P_{sr}, H_{sr}), σ – odchylenie standardowe (σ_P, σ_H).

W celu wyznaczenia okresu alimentacji wód gruntowych oszacowano klimatyczny bilans wodny obszaru badań, przyjmując jego wartości miesięczne jako różnice pomiędzy opadem a parowaniem:

$$KBW = P - E, \quad (2)$$

gdzie:

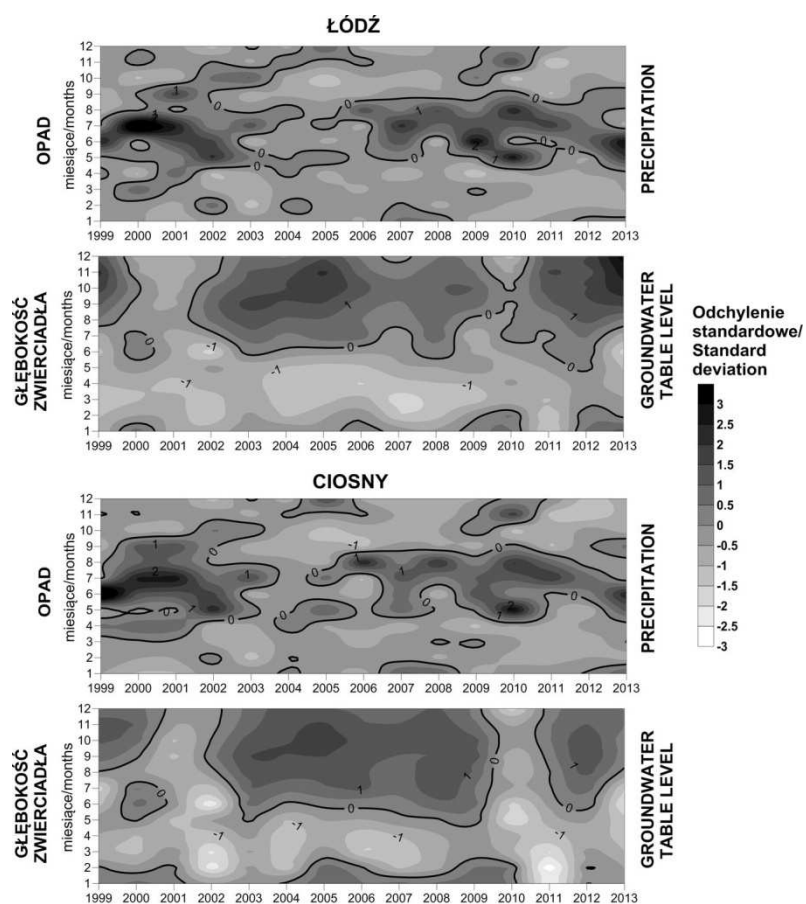
 P – klimatyczny bilans wodny [mm], P – średnia wieloletnia suma opadów [mm], E – średnia wieloletnia suma ewapotranspiracji obliczonej formułą Konstantinowa [mm].

Zastosowana w tym przypadku formuła Konstantinowa, której wybór został podyktowany dostępnością danych, daje rezultaty porównywalne z wynikami bardziej wymagających formuł (Jokiel 2007).

Wyniki

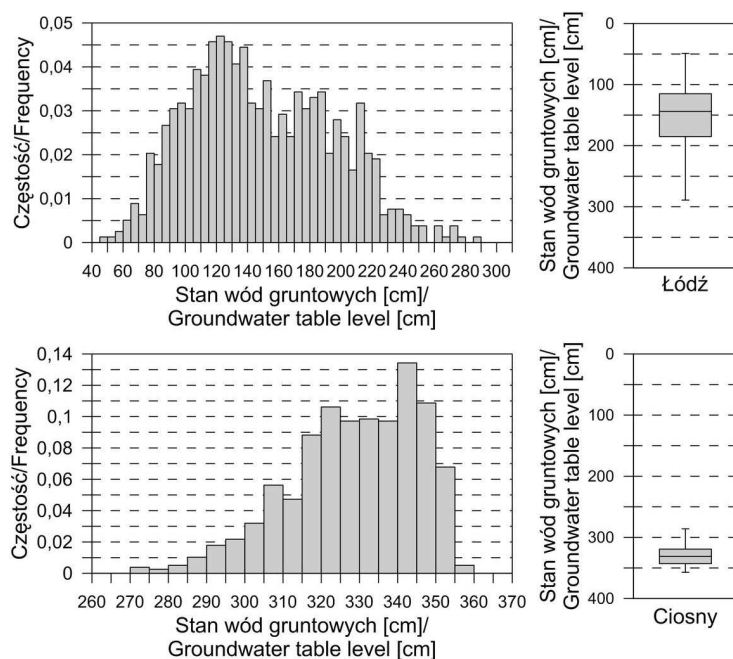
W badanym okresie można wyróżnić dwa okresy suche (lata: 2003–2006 i 2011–2012 z rocznymi sumami opadu niższymi nawet o ponad 150 mm) oraz dwa okresy wilgotne (lata: 2000–2002 i rok 2010 z opadem rocznym przekraczającym 100–200 mm w stosunku do średniej z wielolecia). Tylko w latach suchych (2004–2006) sumy opadu w miesiącach letnich nie przekraczały średniej (rys. 3). Natomiast wyłącznie w latach wilgotnych (2000, 2001, 2010) w sezonowym rozkładzie stanów wody nie zaznaczyło się letnie minimum, bowiem wówczas opady miesięczne były najwyższe. We wszystkich latach, w okresie od stycznia do czerwca, zwierciadło wody znajdowało się powyżej przeciętnej.

Średnia głębokość zwierciadła wody w położonej na sandrze studni Ciosny (329 cm) jest większa niż w studni w Łodzi, umiejscowionej w dolinie Olechówki (148 cm). Wraz z głębokością rośnie stabilność jego położenia – amplitudy wynosiły odpowiednio 223 cm (Łódź) i 96 cm (Ciosny). Oddziaływanie strefy aeracji zmniejszało także częstość występowania stanów wysokich w studni w obrębie osadów sandru (rys. 4). W studni położonej w Łodzi najczęściej (13,8% obserwacji) zwierciadło znajdowało się na głębokości 115–130 cm p.p.t., zaś w Ciosnach na 340–350 cm p.p.t. (24,3%).



Rys. 3. Czasowa zmienność standaryzowanych opadów i stanu zwierciadła wód gruntowych w studniach w Łodzi i Ciosnach

The temporal variability of standardized precipitation and groundwater table in Łódź and Ciosny



Rys. 4. Częstość występowania stanów wód gruntowych w badanych studniach (1999–2013)

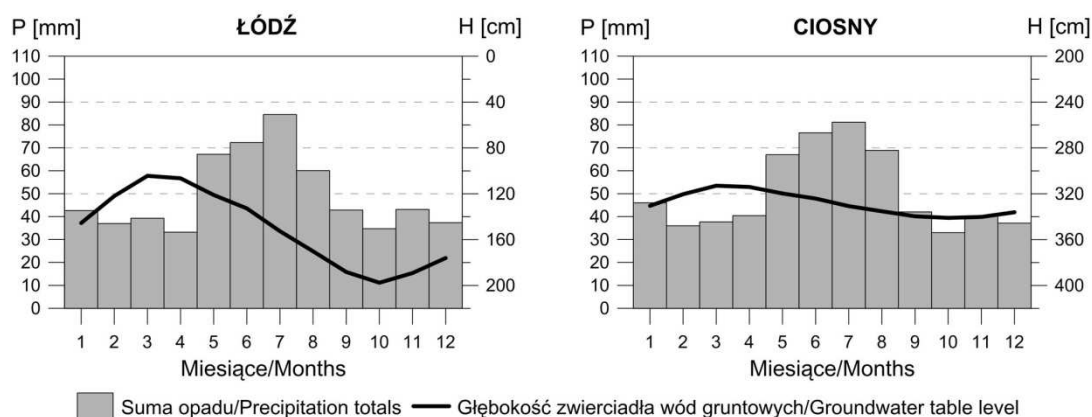
The groundwater table level frequency (1999–2013)

Posterunek w Ciosnach (614 mm) charakteryzował się wyższymi średnimi rocznymi opadami niż Łódź-Lublinek (581 mm). Najwyższe sumy miesięczne opadów notowano w ciepłym półroczu (do 70–80 mm), ale nie miały one bezpośredniego wpływu na położenie zwierciadła wód gruntowych, które w tym czasie uległo stopniowemu obniżeniu. Mimo różnic w głębokości jego wahań charakteryzuje bardzo podobny rytm roczny z maksimum występującym wiosną (marzec–kwiecień), a minimum jesienią (październik), jednak w Ciosnach sezonowa zmienność stanów wody była wyraźnie mniejsza (rys. 5).

Średni miesięczny stan zwierciadła wody grunтовой wykazuje nieznaczną, aczkolwiek istotną statystycznie, korelację z miesięcznymi sumami opadów na obu posterunkach pomiarowych (tab. 3). Siła tego związku rośnie w przypadku porównania ciągów z 1-miesięcznym przesunięciem. Wyższe współczynniki korelacji osiągnięto po usunięciu cyklu rocznego obu ciągów. Były one istotne nawet przy 5-miesięcznym przesunięciu w studni w Łodzi i 7-miesięcznym w Ciosnach.

Najwyższą korelację, o wartości powyżej 0,4, uzyskano dla 1-miesięcznego przesunięcia. Jest to wynikiem tempa wsiąkania wody przez strefę aeracji i bezwładności całego zbiornika wód gruntowych, chociaż rzeczywiste tempo infiltracji jest szybsze.

Powyższe wnioski skłaniają do analizy struktury opadów pod kątem efektywnej reakcji zwierciadła wody. Z treści rys. 6 wynika, że tygodniowe sumy opadów nie przekraczające 10 mm nie są w stanie zrekompensować powstających w tym samym czasie ubytków wody (drenaż, parowanie). Na obszarze miasta niedobór zasilania dodatkowo potęgowany jest przez większe uszczelnienie terenu. Dopiero suma opadu wyższa od 10 mm umożliwia zbilansowanie warstwy wodonośnej, a przekraczająca 20 mm – wznios zwierciadła. Wysokie letnie opady nawalne potrafią podnieść zwierciadło wody nawet o 70–80 cm. Większa dynamika reakcji zwierciadła wód gruntowych na zasilanie zimą i wiosną wynika głównie z niskiego parowania w tym okresie.



Rys. 5. Średnie miesięczne sumy opadów (P) i głębokość zwierciadła wód gruntowych (H)
The monthly precipitation totals (P) and groundwater table level (H)

Tabela 3

Współczynniki korelacji i korelacji krzyżowej miesięcznych sum opadów i głębokości do zwierciadła wód gruntowych (zaciemniono wartości istotne statystycznie dla poziomu $\alpha = 0,05$)

The correlation and cross-correlation coefficients of the monthly precipitation and groundwater table (shaded values are statistically significant at the $\alpha = 0.05$ level)

Stacja	k+0	k+1	k+2	k+3	k+4	k+5	k+6
Łódź	-0,19	-0,19	0,03	0,14	0,11	0,05	0,01
Łódź (bez cyklu)	-0,25	-0,43	-0,24	-0,16	-0,21	-0,19	-0,05
Ciosny	-0,15	-0,24	-0,04	0,02	0,02	-0,01	-0,09
Ciosny (bez cyklu)	-0,21	-0,46	-0,28	-0,24	-0,24	-0,21	-0,17

W Ciosnach duża miąższość utworów sandrowych zmniejsza skuteczność infiltracji opadów w okresie letnim, zatem wzniosy zwierciadła wody nie są tu tak częste i wysokie jak w studni w Łodzi (rys. 7). Częściej można je zaobserwować zimą i wiosną (małe parowanie), gdy woda wsiąkowa ma szansę dotrzeć w głąb profilu. Zimą, niezależnie od natężenia opadu w większości przypadków odnotowano wznios zwierciadła wody.

Reakcja zwierciadła silnie zależy od aktualnej sytuacji hydrologicznej. Znacznie częściej wzniosy zwierciadła następują, gdy znajduje się ono już powyżej przeciętnego stanu. Natomiast wznios niezależny od sytuacji hydrologicznej gwarantowany jest dopiero po przekroczeniu 50–60 mm sumy tygodniowego opadu (rys. 8).

Reakcję zwierciadła wody gruntowej można prześledzić na przykładzie dwóch serii wysokich sum opadów zarejestrowanych latem (rys. 9) i dwóch zimą (rys. 10). Latem 2000 roku opady wywołały wznios zwierciadła wody w studni w Łodzi o 73 cm w ciągu dwóch tygodni, podczas gdy w Ciosnach zaobserwowano wznios o 30 cm w ciągu 3 tygodni. Druga z przedstawianych serii opadów (2006 rok), mimo podobnej na obu postępkach wysokości, przyniosła wznios zwierciadła o 38 cm w studni w Łodzi i zaledwie o 11 cm w Ciosnach. W tym przypadku strefa aeracji była jednak znacznie przesuszona przez znaczny niedobór opadów w czerwcu (zaledwie 16,8 mm) i lipcu (6,5 mm). Warto zauważyć, że wzniosy zwierciadła są powodowane przez opady przekraczające $20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, a kiedy sumy dobowe maleją – zwierciadło wody szybko opada.

Zimą 2007 roku w ciągu dwóch miesięcy odnotowano wznios zwierciadła w studni w Łodzi o 78 cm, zaś w Ciosnach o 33 cm. Kolejnej zimy, w analogicznym okresie, wznios zwierciadła wód gruntowych wynosił odpowiednio 69 i 25 cm. W obu analizowanych okresach sumy opadów osiągnęły około 120 mm, ale opad śniegu stanowił tylko ich część (w 2007 roku – 25%, a w 2008 roku zaledwie 4%). Bardziej szczegółowe dane wskazują, że dobowe sumy opadów wywołujące wznios zwierciadła, zimą na ogół nie przekraczają 10 mm (latem są wyższe), natomiast spadek zwierciadła w chłodnej połowie roku jest możliwy tylko przy wyraźnym ograniczeniu opadów.

Ze względu na krótszą drogę infiltracji w każdym z przypadków wznios zwierciadła wód gruntowych w studni w Łodzi był większy niż w Ciosnach. Wartość wzniosu nie przekraczała z reguły 2 cm na dobę, natomiast w Ciosnach było to średnio mniej niż $1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$. Średnie spadki były prawie o połowę mniejsze i sięgały przeciętnie $1,2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$

w studni w Łodzi oraz $0,5 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ w Ciosnach. Maksymalne tygodniowe wzniosy wyniosły odpowiednio 81 i 37 cm, a spadki 33 i 23 cm, co analogicznie odpowiada 5 i $12 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ oraz 3 i $5 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$.

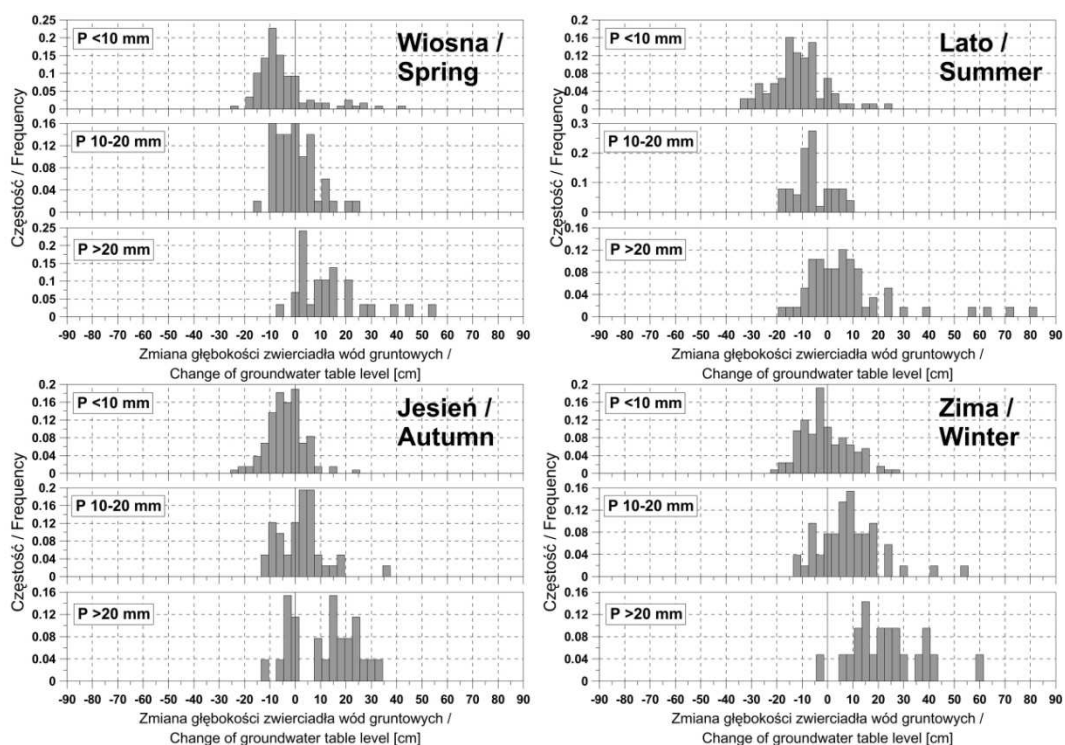
Wielkość zasilania atmosferycznego bezpośrednio wpływa na ilość wody zasilającej zwierciadło wód gruntowych. Jego reakcja jest uzależniona od aktualnego uwilgotnienia strefy aeracji, a jej stan wynika z potencjalnych warunków parowania. O ilości wody biorącej udział w lądowej fazie cyklu hydrologicznego decyduje różnica między opadem a parowaniem (klimatyczny bilans wodny). W chłodnym półroczu występuje zazwyczaj nadwyżka opadu nad parowaniem (ponad 10 mm sum miesięcznych) – największa od listopada do lutego, umożliwiająca alimentację wód podziemnych (rys. 11).

Z punktu widzenia alimentacji wód podziemnych jest to jednak nieduża ilość wody, odpowiadająca zmianie retencji gruntowej o kilka centymetrów. Susze atmosferyczne notowano w badanym okresie w latach: 2000, 2002, 2003, 2005, 2006 i 2011. Bliski zeru lub nawet ujemny klimatyczny bilans wodny (IV, VIII) zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia suszy hydrologicznej. Opady o odpowiedniej wysokości są w stanie przerwać proces sezonowego obniżenia zwierciadła wód gruntowych, lecz na krótko.

Dyskusja

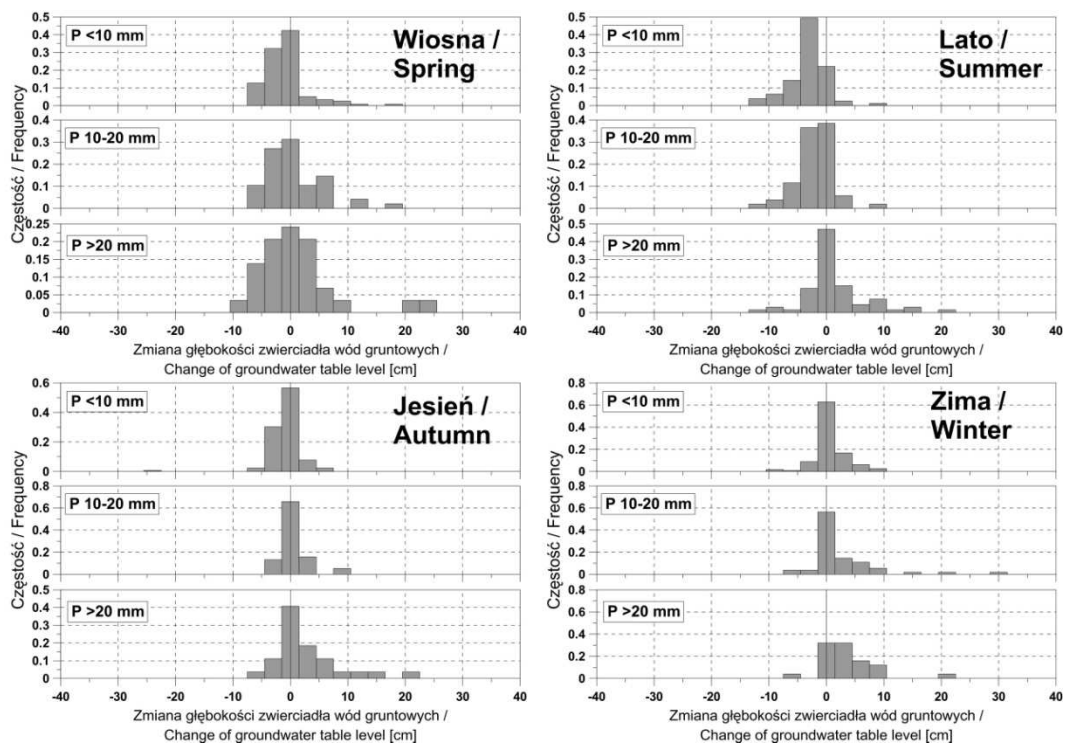
Obie studnie reprezentują typ kontynentalny wahań zwierciadła, typowy dla większości obszaru środkowej i wschodniej Polski (Bartnik, Tomalski 2012). W typie kontynentalnym najwyższe stany wód gruntowych notowane są w miesiącach wiosennych, obfitujących w roztopy, a stany najniższe, będące wynikiem intensywnego parowania, przypadają na przełom lata i jesieni. Natomiast typ oceaniczny, charakteryzujący się najwyższym stanem wody zimą (I–II) i najniższym latem (VII–VIII), występuje najczęściej na Pomorzu (Chlost 2005).

Względne podobieństwo warunków klimatycznych na obszarze Polski nizinnej sprawia, że analogiczne okresy suche (lata 2003–2006 oraz 2011–2012) i wilgotne (lata 2000–2002 oraz 2010 rok) wyróżniono także w badaniach minimalnych miesięcznych stanów wód podziemnych w studniach zlewni Wkry i Skrzy Prawej. Tam także stwierdzono kontynentalny typ sezonowych wahań stanów wód gruntowych, lecz ich maksima przypadają nieco później niż w studniach Łodzi – w kwietniu. W studniach głębszych notowano przy tym nieco mniejszą zmienność stanów wody (Kowalczyk i in. 2015).



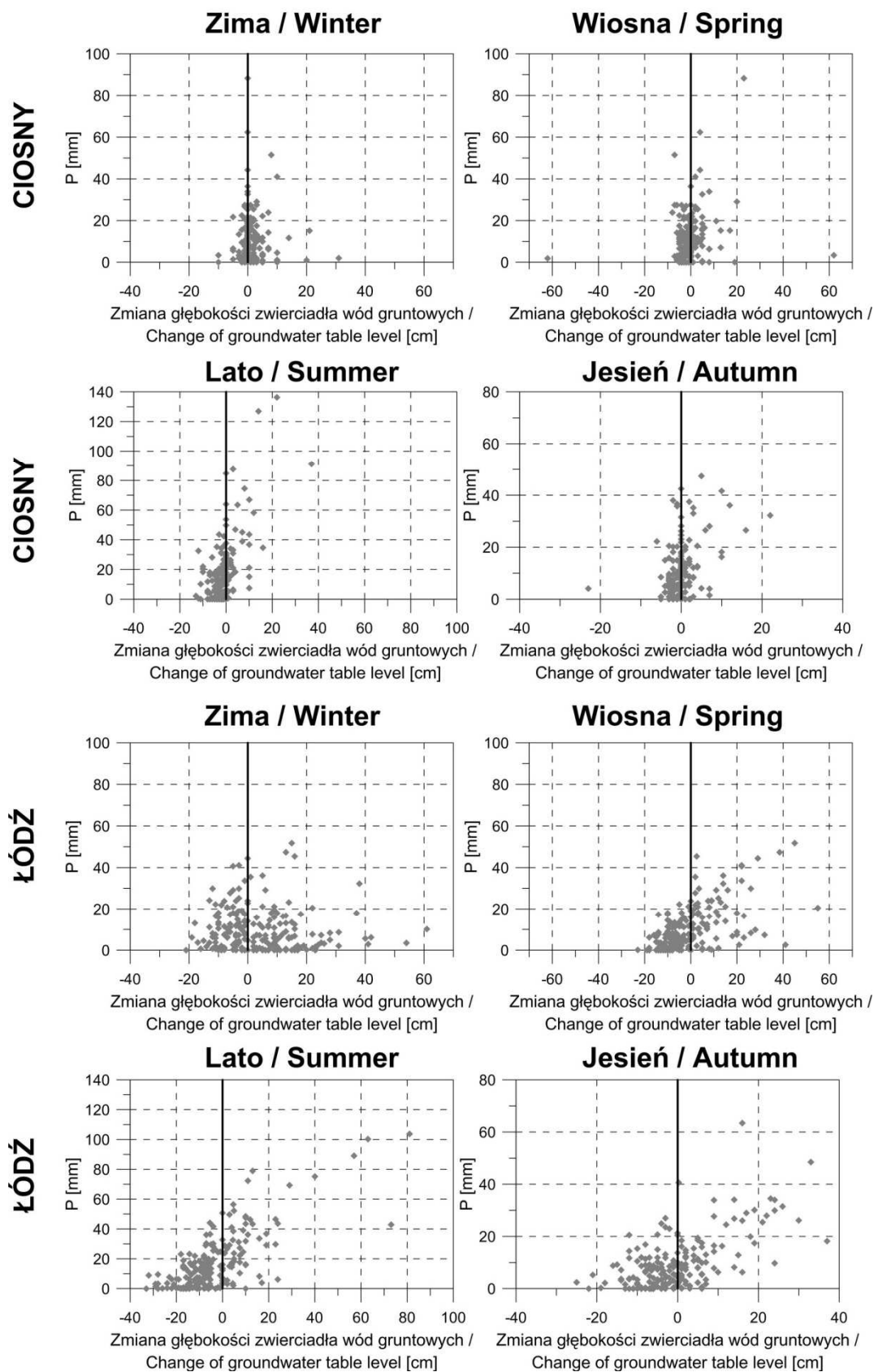
Rys. 6. Zróżnicowanie sezonowe stanu wód gruntowych w studni w Łodzi w zależności od wielkości opadów (1999–2013)

Seasonal variability of groundwater table level in Łódź in relation to precipitation abundance (1999–2013)

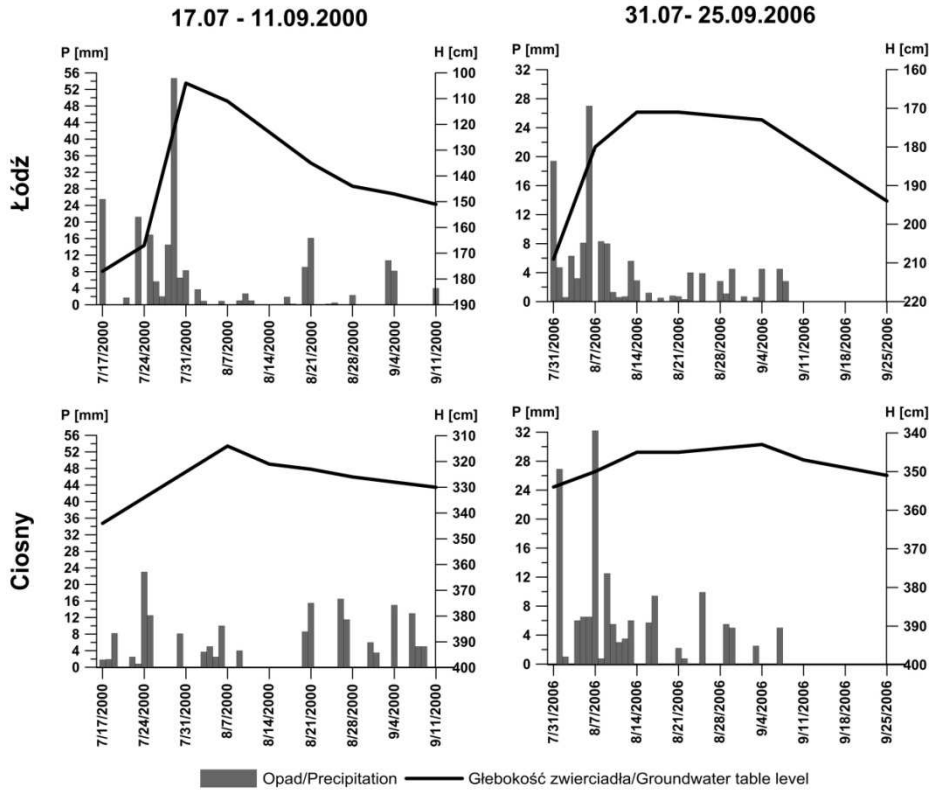


Rys. 7. Zróżnicowanie sezonowe stanu wód gruntowych w studni w Ciosnach w zależności od wielkości opadów (1999–2013)

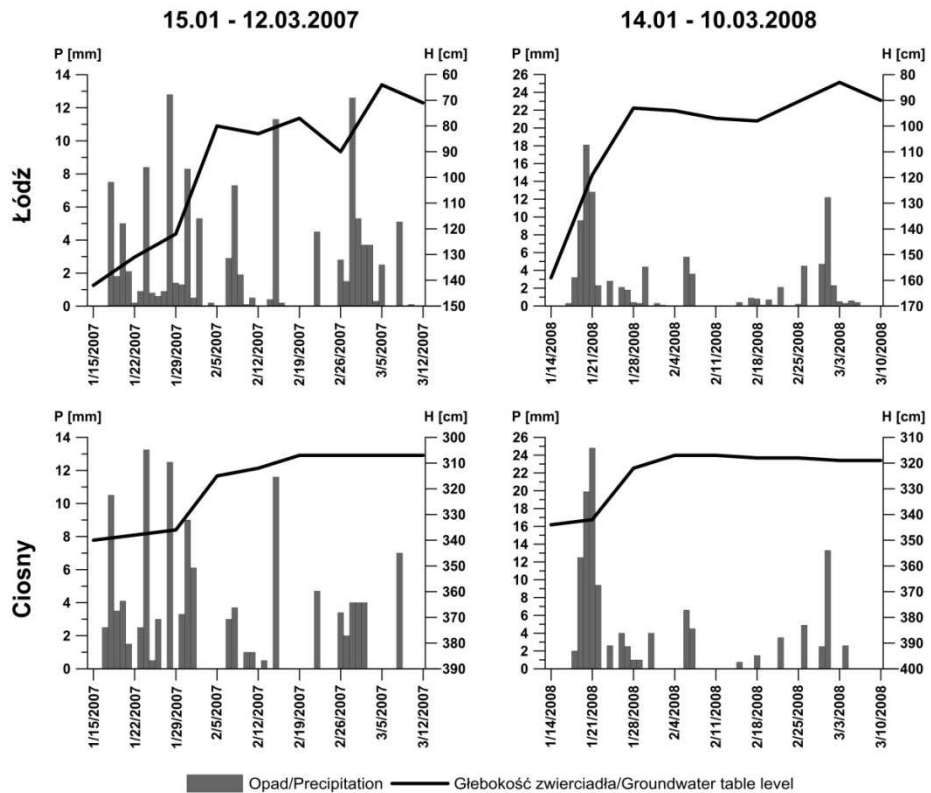
Seasonal variability of groundwater table level in Ciosny in relations to precipitation abundance (1999–2013)



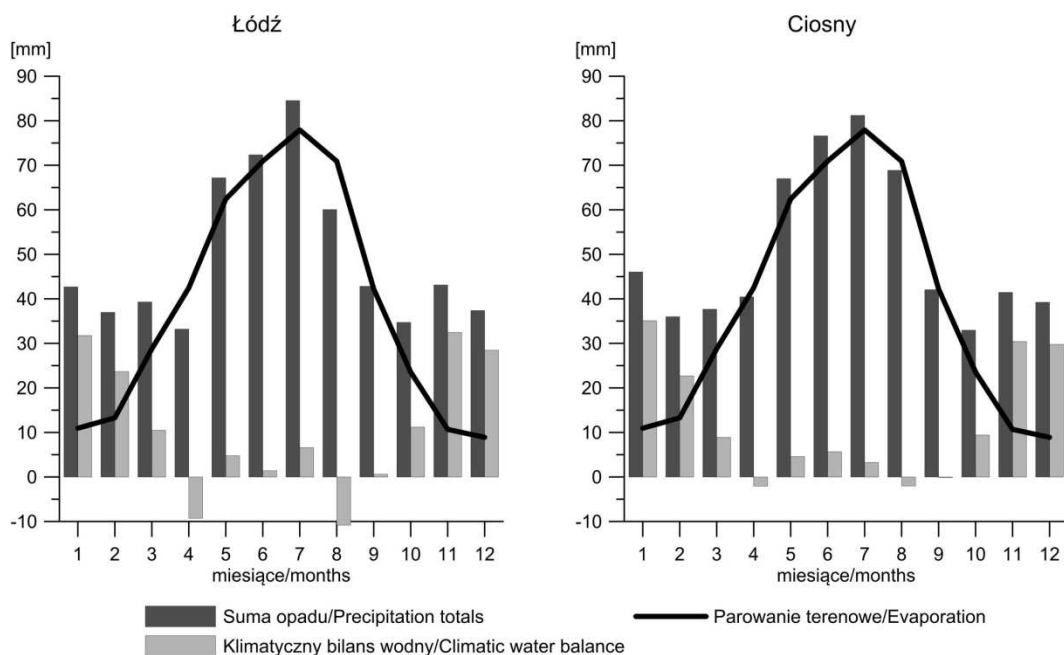
Rys. 8. Zmiana zwierciadła wód gruntowych na tle tygodniowych sum opadów
The groundwater table level changes in relation to weekly precipitation totals



Rys. 9. Położenie zwierciadła wody w studniach latem (H) na tle dobowych sum opadów (P)
The groundwater table level (H) and daily precipitation (P) in summer



Rys. 10. Położenie zwierciadła wody w studniach zimą (H) na tle dobowych sum opadów (P)
The groundwater table level (H) and daily precipitation (P) in winter



Rys. 11. Średnie miesięczne charakterystyki klimatycznego bilansu wodnego w latach 1999–2013
The monthly characteristics of the water balance components for the 1999–2013 period

Obliczone dla studni w Łodzi i w Ciosnach wskaźniki tempa zmian stanów wód gruntowych odpowiadają maksymalnym wzniosom rejestrowanym w studniach pomorskich, wynoszącym $8 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$. Natomiast maksymalne spadki zwierciadła były tam wyższe i sięgały nawet $16 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ (Chlost 2005). Średnie wahania stanów wody odpowiadają z kolei typowym wartościom rejestrowanym w pozostałych studniach środkowej Polski. Według Tomalskiego (2011) wzniosy najczęściej mieszczą się tu w przedziale 6–12 cm tygodniowo, natomiast spadki sięgają 4,5–9,5 cm tygodniowo. Niższe wartości są charakterystyczne dla przeważającej liczby studni, zasilanych przeważnie z piasków rzecznych. Większą dynamiką odznaczają się otwory reprezentujące wodonośce szczelinowe.

Wskutek dobrych parametrów filtracyjnych strefy aeracji większość odkrytych poziomów wodonośnych podlega dynamicznemu uzupełnianiu zasobów i równie szybkiemu ich zacierpywaniu. Spadki stanów wody w płytszym poziomie wodonośnym okazały się tym niemal 2,5 razy większe, a wzrosty blisko 4 razy większe niż w zbiorniku sandrowym (Jokiel, Tomalski 2009). Nie znalazła przy tym potwierdzenia teza, że przeciętne spadki stanów wody w studni w Ciosnach są szybsze od wzniosów. Przeciwnie – średni spadek zwierciadła w tej studni ($0,5 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$) był blisko dwukrotnie mniejszy od przeciętnego wzrostu (blisko $1 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$). Na wzrost przeciętnej dynami-

ki zwierciadła miał wpływ rok 2010, w którym tempo zarówno wzniosów, jak i spadków było znacznie wyższe.

O warunkach zasilania strefy saturacji decyduje wielkość klimatycznego bilansu wodnego. Ten prosty, lecz ważny wskaźnik informuje o możliwości wystąpienia suszy glebowej, szczególnie wskutek niedoboru opadów wiosną i wczesnym latem – w okresie największego zapotrzebowania na wodę przez rośliny (Doroszewski i in. 2012). Klimatyczny bilans wodny w okresie wegetacyjnym (IV–IX) dwukrotnie częściej jest ujemny (66% przypadków) niż dodatni (34%). Jego ujemne wartości notowano najczęściej w kwietniu (72%) i w maju (81%), przy czym w ostatnich latach występowały niedobory wiosną i wczesnym latem wyraźnie nasila się. Wskaźnik KBW w Polsce wykazuje wyraźną tendencję spadkową (Radzka 2014). Potwierdzeniem tego są dotkliwe susze hydrologiczne, występujące m.in. 2006 i 2015 roku (Lorenc 2006; Nowicki 2015).

Podsumowanie i wnioski

Wielkość i rozkład czasowy opadów ma duże znaczenie dla wahań zwierciadła płytkich wód gruntowych. Od wzajemnej relacji pomiędzy opadem a parowaniem, będącej wynikiem uwarunkowań klimatycznych, zależy ilość wody

mogąca uzupełniać zasoby ich zbiorników. Na sezonowy rytm zmienności nakładają się krótkookresowe wzniosy oraz spadki zwierciadła powodowane dynamiką zasilania atmosferycznego. Ich analiza prowadzi do kilku wniosków:

1. Skuteczność opadów zależy od możliwości retencyjnych strefy aeracji – niewielkie impulsy wody wsiąkowej nie docierają do zwierciadła lub też nie są w stanie zrównoważyć drenażu podziemnego. W chłodnej połowie roku, niezależnie od sytuacji hydrologicznej wznios zwierciadła zauważono przy opadach przekraczających 10–20 mm tygodniowo, a w półroczu ciepłym – 50–60 mm. Zimą, na skutek niższego parowania i mniejszych sum opadów, wznios może być równie duży jak latem.

2. Strefa aeracji płytszej ze studni, o około 148 cm miąższości (Łódź), gromadzi zaledwie 45% objętości wody magazynowanej przez osady w Ciosnach (o miąższości 329 cm). W rezultacie płytsza studnia odznacza się większą dynamiką wahań zwierciadła. Mniejszy jest też jego spadek, a więc woda wolniej odpływa do rzeki, co powoduje, że zasilenie warstwy wodonośnej jest bardziej efektywne.

3. O położeniu zwierciadła wody gruntowej w największym stopniu decyduje suma opadów atmosferycznych półrocza chłodnego. Ich niedobór, w połączeniu z ujemnym KBW u progu okresu wegetacyjnego, bezpośrednio przyczynia się do wystąpienia suszy hydrologicznej w dalszej części roku. Tylko wyjątkowo deszczowe lato może zahamować lub odwrócić ten proces.

Ograniczenie swobodnej infiltracji w miastach wywołuje częstsze powstawanie suszy i bardziej dotkliwe jej skutki. Wzrost zagrożenia suszą odnotowano w ostatnich dekadach w większości regionów geograficznych Polski (Somrowska 2009). By ograniczać efekty przekształcania się suszy atmosferycznej w hydrologiczną na terenie miast i obszarów podmiejskich należy zwiększać infiltrację wody do gruntu w sposób sztuczny, np. poprzez zatrzymywanie wody w nieckach i basenach infiltracyjnych, rozszerzenie powierzchni utwardzonych czy tworzenie większej liczby „obszarów zielonych”.

Literatura

Bartnik Adam, Piotr Moniewski. 2015. Zmiany jakości łódzkiego Jasiona w wyniku głębokiego odwodnienia terenu w związku z budową dworca kolejowego Łódź-Fabryczna. W: Damian Absalon, Magdalena Matysik, Marek Ruman (red.) *Nowoczesne metody i rozwiązania w hydrolo-*

gii i gospodarce wodnej, 59-73. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG, t. 3. Sosnowiec: Komisja Hydrologiczna PTG, Polskie Towarzystwo Geograficzne, Oddział Katowicki.

Bartnik Adam, Piotr Moniewski, Przemysław Tomalski. 2000. Rola naturalnych i antropogenicznych elementów obiegu wody w zlewni miejskiej (Sokołówka) i podmiejskiej (Dzierżazna). W: Sylwia Bródka (red.) *Problemy środowiska przyrodniczego miast*, 39-48. Problemy ekologii krajobrazu, t. 22. Poznań-Warszawa: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.

Bartnik Adam, Przemysław Tomalski. 2012. Zróżnicowanie równowagi hydrodynamicznej wód podziemnych i powierzchniowych w dolinie małej rzeki miejskiej (na przykładzie Sokołówki - Łódź). W: Włodzimierz Marszelewski (red.) *Gospodarowanie wodą w warunkach zmieniającego się środowiska*, 7-19. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG, t. 1. Toruń: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.

Chełmicki Wojciech. 1991. Reżim płytkich wód podziemnych w Polsce. Rozprawy habilitacyjne UJ nr 218. Kraków: Uniwersytet Jagielloński.

Chlost Izabela. 2005. „Uwagi o reżimie wahań zwierciadła wody pierwszego poziomu wód podziemnych na nizinie gardnieńsko-łębskiej w roku hydrologicznym 2003”. *Ślupskie Prace Geograficzne* 2: 161-170.

Dobek Mateusz. 2007. „Reakcja zwierciadła wód podziemnych na opad atmosferyczny w latach 1961–1981 w wybranych punktach Wyżyny Lubelskiej”. *Annales Universitatis Mariae Curie Skłodowska, Sectio E – Agricultura* LXII (1): 49-55.

Doroszewski Andrzej, Jan Jadczyzyn, Jerzy Kozyra, Rafał Pudelko, Tomasz Stuczyński, Katarzyna Mizak, Artur Łopatka, Piotr Koza, Tadeusz Górski, Elżbieta Wróblewska. 2012. „Podstawy systemu monitoringu suszy rolniczej”. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 12 (2): 77-91.

Dubaniewicz Henryk. 1974. „Klimat województwa łódzkiego”. *Acta Geographica Lodziensia* 34: 1-120.

Dynowska Irena, Zofia Pietrygowa. 1978. „Wieloletnie fluktuacje zwierciadła wód gruntowych w dorzeczu górnej Wisły”. *Czasopismo Geograficzne* 49 (2): 169-175.

Graf Renata. 2010. Tendencje zmian stanów płytkich wód podziemnych na Nizinie Wielkopolskiej w latach 1961-2000. W: Renata Graf, Marek Marciniak (red.) *Zasoby, zagrożenia i ochrona wód podziemnych*, 79-95. Seria Studia i Prace z Geografii i Geologii 11. Poznań: Bogucki Wyd. Naukowe.

Grajewski Sylwester, Antoni T. Miler, Bernard Okoński. 2014. „Seasonal variability of ground water levels in the Puszcza Zielonka

- Forest". *Journal of Water and Land Development* 21 (1): 55-62.
- Jokiel Paweł. 2007. „Zmiany, zmienność i ekstremalne sumy parowania terenowego i ewapotranspiracji potencjalnej w Łodzi w drugiej połowie XX wieku”. *Acta Universitatis Lodzianis, Folia Geographica Physica* 8: 63-88.
- Jokiel Paweł, Przemysław Tomalski. 2009. Krzywe maksymalnego spadku i wzrostu stanów wód podziemnych i wydajności źródeł. W: Robert Bogdanowicz, Joanna Fac-Beneda (red.) *Zasoby i ochrona wód. Obieg wody i materii w zlewniach rzecznych*, 361-372. Gdańsk: Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego.
- Kłysik Kazimierz. 2001. Warunki klimatyczne. W: Stanisław Liszewski (red.) *Zarys monografii województwa łódzkiego*, 68-81. Łódź: Łódzkie Towarzystwo Naukowe.
- Kowalczyk Agnieszka, Stepińska-Drygała Izabela, Wesołowski Piotr. 2015. „Zmienność wieloletnia i sezonowa występowania minimalnych stanów wód podziemnych na wybranym obszarze nizinnym”. *Przegląd Geologiczny* 63 (10/1): 860-866.
- Lorenc Halina. 2006. Warunki meteorologiczne tworzenia się i rozwoju suszy na obszarze Polski w okresie od 1 czerwca do 25 sierpnia 2006. W: *Susza w Polsce – 2006 rok (przyczyny, natężenie, zasięg, wnioski na przyszłość)*. Raport Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 2-18. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.
- Nowicki Zbigniew (red.). 2015. Prognoza sytuacji hydrogeologicznej w strefach zasilania i poboru wód podziemnych. Warszawa: Państwowa Służba Hydrologiczna.
- Radzka Elżbieta. 2014. „Klimatyczny bilans wodny okresu wegetacyjnego (według wzoru Iwanowa) w środkowowschodniej Polsce”. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 14 (1): 67-76.
- Somorowska Urszula. 2009. „Wzrost zagrożenia suszą hydrologiczną w różnych regionach geograficznych Polski w XX wieku”. *Prace i Studia Geograficzne* 43: 97-114.
- Tomalski Przemysław. 2011. „Dynamika zasobów płytkich wód podziemnych w województwie łódzkim i na obszarach sąsiednich”. *Acta Geographica Lodzianis* 97: 1-102.

Summary

The groundwater table level depends not only on morphological and hydrogeological factors, but mainly on the type of precipitation, its abundance and intensity. The relation between

precipitation and groundwater table level was examined for two wells for the 1999–2013 period (Fig. 1, Tab. 1). The first well is located in Ciosny, in the suburban area of Łódź, and represents fluvio-glacial deposits of the Łódź Hills. The second one is located in the southern part of Łódź (Fig. 2), within the Wysoczyzna Łaska, and the aquifer is composed of fine-grained sands. The precipitation datasets were obtained from the Ciosny and Łódź-Lublinek stations (Tab. 2).

In the years 1999–2013 the two dry periods (2003–2006, 2011–2012) and two wet periods (2000–2002 and 2010) were noticed (Fig. 3). The average depth of the water table level in Ciosny sandur was found to be 329 cm, which is much higher than in Łódź in the Olechówka Valley (148 cm). As depth increases, the groundwater table level is more stable (the amplitude reached 223 cm in Łódź and 96 cm in Ciosny) and the frequency of the high water level decreases (Fig. 4). Despite the differences in the depth of the two wells, the fluctuations in the water table levels have a very similar annual course with the maximum in March and minimum in October (Fig. 5).

A slight but statistically significant correlation exists between the groundwater table level and monthly precipitation totals – higher for a monthly dataset shift (Tab. 3). The increase of groundwater table level is higher in Łódź than in Ciosny. It was also found that the weekly precipitation below 10 mm does not balance the loss of water (drainage, evaporation). Only the precipitation totals greater than 20 mm provide an increase in the water level – in the summer up to 70–80 cm (Figs 6, 7). In Łódź, the increase rate usually doesn't exceed 2 cm, and in Ciosny 1 cm per day. The average decline of groundwater table was about 1.2 cm per day in Łódź, and 0.5 cm in Ciosny. The weekly maximum increase reached 81 and 37 cm respectively and maximum decrease 33 and 23 cm. Regardless of hydrological conditions, a guaranteed increase in groundwater table level occurred after weekly precipitation totals higher than 50–60 mm (Fig. 8), however in summer (Fig. 9) it was higher than in winter (Fig. 10). Due to this, the cold half of the year with positive climatic water balance (Fig. 11) is crucial for the ground water recharge and determines the groundwater table level for the rest of the year.