

BADANIA MODELOWE UWARUNKOWAŃ FLUIDYZACJI STREFY HYPOREICZNEJ

MODELLING STUDIES OF THE CONDITIONS OF FLUIDIZATION IN THE HYPORHEIC ZONE

MAREK MARCINIAK¹, MAGDALENA MATUSIAK¹, ANNA SZCZUCIŃSKA¹, MARIUSZ KACZMAREK²

Abstrakt. Strefa hyporeiczna jest obszarem współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych. Warunki w jakich funkcjonuje ta strefa mają ważne znaczenie dla organizmów roślinnych i zwierzęcych tam bytujących, ale także dla wymiany wód, ich składu chemicznego oraz reakcji zlewni na opady. W warunkach drenażu wód podziemnych przez wody powierzchniowe może dochodzić do fluidyzacji, czyli upłynnienia osadów dennych budujących strefę hyporeiczną. Zjawisko fluidyzacji zachodzi po przekroczeniu przez gradient hydrauliczny wartości jeden. Korzystając z tego warunku przeprowadzono badania symulacyjne funkcjonowania doliny rzecznej w zależności od wielu parametrów morfologicznych, hydrologicznych czy też hydrogeologicznych. Uwzględniono różnicę poziomu wody między warstwą wodonośną a rzeką, szerokość rzeki, współczynnik filtracji i anizotropię warstwy wodonośnej oraz przepuszczalność pionową strefy hyporeicznej. Realnie występujący zakres zmienności poszczególnych parametrów podzielono na podzakresy wartości niskich, średnich i wysokich. Metodą symulacji komputerowych, za pomocą oprogramowania Visual MODFLOW, poszukiwano takich warunków funkcjonowania doliny rzecznej, dla których może wystąpić zjawisko fluidyzacji. Stwierdzono, że fluidyzacja strefy hyporeicznej zależy proporcjonalnie od różnicy między zwierciadłem wód powierzchniowych i podziemnych. Wykazano, że większej skłonności do fluidyzacji można oczekiwać, gdy warstwa wodonośna ma wysoką przepuszczalność hydrauliczną, strefa hyporeiczna cechuje się niską przepuszczalnością pionową, a szerokość cieku jest niewielka.

Słowa kluczowe: strefa hyporeiczna, fluidyzacja, wody powierzchniowe i podziemne, modelowanie.

Abstract. The hyporheic zone is a contact zone of surface and subsurface waters. One of the specific processes occurring in this zone is hyporheic zone sediment fluidization. The aim of the present study is to define the hydrogeological conditions in a river valley for which the fluidization of the hyporheic zone sediments may occur. The following factors were tested: the difference between the groundwater table and the river water surface, width of the river channel, hydraulic conductivity, and anisotropy of the aquifer sediments, as well as the vertical permeability of the hyporheic zone. The modelling experiments were carried out using the Visual MODFLOW program. The simulations were conducted on three river widths: 3, 6 and 9 m. It was found that the occurrence of fluidization of the hyporheic zone is favoured mainly by the difference between surface water and groundwater table elevation, in the order of 30 m, and the strong anisotropy of aquifers. The likelihood of fluidization occurrence depends on the value of vertical hydraulic conductivity and increases when the hydraulic gradient exceeds 1. The smaller the width of the river, the more favourable conditions for fluidization to occur. It was found that the fluidization of the hyporheic zone depends proportionally on the difference between the surface and ground water table. It has been shown that greater tendency to fluidization can be expected when the aquifer has a high hydraulic conductivity, the hyporheic zone is characterized by low vertical permeability, and the width of the river is small.

Key words: hyporheic zone, fluidization, surface and groundwater, modelling.

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, ul. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; e-mail: mmarc@amu.edu.pl, magmat7@amu.edu.pl, szana@amu.edu.pl.

² Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Wydział Mechatroniki, ul. M. Kopernika 1, 85-074 Bydgoszcz; e-mail: mkk@ukw.edu.pl.

STREFA HYPOREICZNA I ZJAWISKO FLUIDYZACJI

Strefa hyporeiczna występuje w dnach jezior, rzek i strumieni, a także w niszach źródłiskowych. Prowadzone są liczne badania interdyscyplinarne strefy hyporeicznej. W tym artykule rozważane będą interakcje między wodami powierzchniowymi i podziemnymi (Holmes, 2000). Hydrologi i hydrogeolodzy badają strefę hyporeiczną pod kątem tempa i kierunku wymiany wód powierzchniowych z podziemnymi (Lewandowski i in., 2009; Wondzell i in., 2010; Boano i in., 2014; Schmadel i in., 2017). Packman i Selehin (2003) eksperymentalnie dowiedli, że interakcja między wodami powierzchniowymi i podziemnymi jest proporcjonalna do przepuszczalności osadów dennych rzeki i kwadratu prędkości wody płynącej, a odwrotnie proporcjonalna do głębokości strefy i porowatości osadów. Innym badanym parametrem, charakteryzującym ruch wód w strefie hyporeicznej, jest współczynnik filtracji (Hancock, 2002; Marciniak i in., 2017). Ponadto zmiany składników bilansu wodnego mogą wpływać na okresowe zmiany zasięgu strefy hyporeicznej (Winter, 1999). Wzmoczony dopływ wód podziemnych do powierzchniowych przez strefę hyporeiczną przejawia się dynamiką stanów wody i przepływów rzecznych. Wzrost tempa drenażu może, przy sprzyjających warunkach, objawiać się zjawiskiem fluidyzacji, czyli upłynnienia podłoża (ang. *flowing sands*). W dnach jezior, rzek i nisz źródłiskowych zjawisko fluidyzacji, związane ze wzmocnionym dopływem wód podziemnych, przejawia się w postaci unoszonego przez wodę osadu, najczęściej o charakterze punktowym.

CEL I METODY BADAŃ

Celem badań symulacyjnych było rozpoznanie warunków hydrologicznych i hydrogeologicznych, dla których może zachodzić zjawisko fluidyzacji strefy hyporeicznej. Przyjęto, że analizie zostaną poddane następujące czynniki: różnica poziomu wody między warstwą wodonośną a rzeką, szerokość rzeki, współczynnik filtracji i anizotropia warstwy wodonośnej oraz przepuszczalność pionowa strefy hyporeicznej. Badania modelowe przeprowadzono za pomocą programu Visual MODFLOW.

Fluidyzacja strefy hyporeicznej może wystąpić tylko w przypadku ruchu wody w kierunku przeciwnym do siły grawitacji, a zatem w warunkach drenażu wód podziemnych przez rzekę. Z wcześniej przeprowadzonych badań laboratoryjnych (Marciniak i in., 2017) i rozważań teoretycznych (Marciniak i in., 2018) wynika, że fluidyzacja zachodzi, gdy gradient hydrauliczny występujący w strefie hyporeicznej przekracza wartość jeden.

Zgodnie z uogólnionym prawem Darcy:

$$\vec{v} = -k \cdot \text{grad } h \quad [1]$$

gdzie:

\vec{v} – wektor prędkości filtracji [m/s],

k – współczynnik filtracji [m/s],

h – potencjał hydrauliczny [m].

Wartość składowej pionowej v_z wektora prędkości \vec{v} , od której zależy fluidyzacja strefy hyporeicznej można zapisać jako:

$$v_z = k_h \cdot i \quad [2]$$

gdzie:

k_h – współczynnik filtracji strefy hyporeicznej [m/s],

i – składowa pionowa wektora **grad** h , czyli gradient w strefie hyporeicznej [-].

Warunek wystąpienia fluidyzacji można sformułować następująco (Marciniak i in., 2018):

$$i = \frac{v_z}{k_h} > 1 \quad [3]$$

MODEL WSPÓLDZIAŁANIA WÓD POWIERZCHNIOWYCH I PODZIEMNYCH

Badania modelowe wykonano na modelu o wymiarach $x = 3000$ m oraz $y = 375$ m, podzielonym siatką prostokątną na bloki o długości $\Delta x = 24$ m i szerokości $\Delta y = 3$ m. Podstawową siatkę dyskretyzacyjną zagęszczono w kierunku doliny rzecznej do bloków 12×3 , 6×3 oraz 3×3 m. Zmienność zagęszczenia siatki Δx wzdłuż osi x prostopadłej do doliny przedstawiono na [figurze 1](#).

W kierunku pionowym model zawierał 15 warstw. Miąższość każdej z nich była zmienna od 3 m na granicach zewnętrznych modelu do 1 m pod dnem rzeki. Ukształtowanie powierzchni terenu odwzorowywało głęboko wcięta dolinę rzeczna. Warunki brzegowe I rodzaju przyjęto wzdłuż wschodniej i zachodniej granicy modelu, w strefach zasilania wód podziemnych oddalonych o 1500 m od badanej doliny rzecznej. Współdziałanie wód powierzchniowych i podziemnych odwzorowano za pomocą warunku brzegowego III rodzaju, o wysokościach hydraulicznych w zakresie od 99,625 m n.p.m. na północy do 100 m n.p.m. na południu. Szerokość rzeki, wynosząca 3–9 m, rosła zgodnie z jej spadkiem hydraulicznym wynoszącym 1‰. Najniższe szerokości rzeki przyjęto w części południowej (1 blok), średnie w części środkowej (2 bloki), a najwyższe w odcinku północnym (3 bloki). Wielkość infiltracji efektywnej była jednakowa na całym obszarze i wyniosła 120 mm/r, czyli ok. 20% opadu.

Gradient hydrauliczny i można wyznaczyć ze wzoru [3], ale także z formuły:

$$i = \frac{H_I - H_R}{m} \quad [4]$$

gdzie:

H_I – zwierciadło wody w warstwie wodonośnej (war. brzegowy I rodzaju) [m n.p.m.],

H_R – zwierciadło wody w rzece (war. brzegowy III rodzaju) [m n.p.m.],

m – miąższość strefy hyporeicznej [m].

Gradient hydrauliczny i wyznaczono zgodnie z formułą [3], która nie wymaga aproksymacji pochodnych, tak jak w przypadku równania [4], co zapewnia mniejsze błędy obliczeń numerycznych.

Na tak przygotowanym modelu matematycznym filtracji wody w dolinie rzecznej, testowano wpływ następujących czynników na prędkości przepływu wód w strefie hyporeicznej:

- różnica poziomu wody $\Delta H = H_I - H_R$ między: zwierciadłem wody w warstwie wodonośnej na granicy modelu, zadawanym jako warunek brzegowy I rodzaju H_I , a zwierciadłem wody w rzece H_R ,
- szerokość rzeki b ,
- współczynnik filtracji warstwy wodonośnej k_x, k_y, k_z ,
- stopień anizotropii warstwy wodonośnej k_z/k_x ,
- przepuszczalność pionowa strefy hyporeicznej T_h obliczona ze wzoru:

$$T_h = \frac{k_h}{m} F_{bloku} \quad [5]$$

gdzie:

T_h – przepuszczalność pionowa strefy hyporeicznej [m^2/s],

F_{bloku} – powierzchnia bloku obliczeniowego $3 \times 3 \text{ m} = 9 \text{ m}^2$.

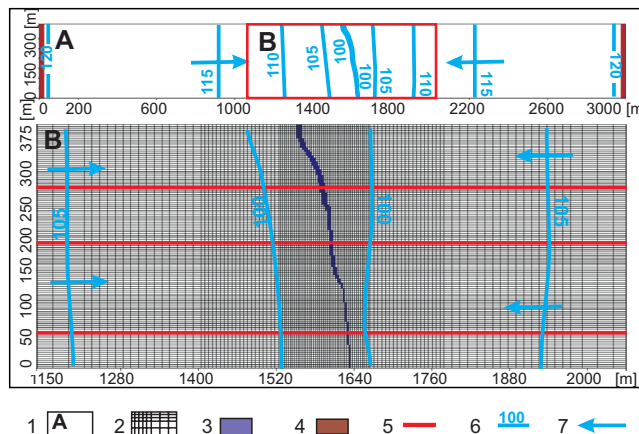


Fig. 1. Widok fragmentu doliny rzecznej, dla której przeprowadzono badania symulacyjne

1 – zasięg modelowanego obszaru: A – cały model, B – środkowy fragment doliny, 2 – siatka dyskretyzacyjna, 3 – warunki brzegowe III rodzaju, 4 – warunki brzegowe I rodzaju, 5 – profile, w których analizowano gradienty hydrauliczne, 6 – układ zwierciadła wody w dolinie rzecznej dla warunku brzegowego $H_{I2} = 120 \text{ m n.p.m.}$, 7 – kierunki filtracji wody

A view of part of the river valley for which simulation tests were carried out

1 – range of the modelled area: A – entire model, B – middle part of the valley, 2 – discretization grid, 3 – boundary conditions of type III, 4 – boundary conditions of type I, 5 – profiles along which hydraulic gradients were analyzed, 6 – groundwater table in the river valley for the boundary condition $H_{I2} = 120 \text{ m a.s.l.}$, 7 – directions of water filtration

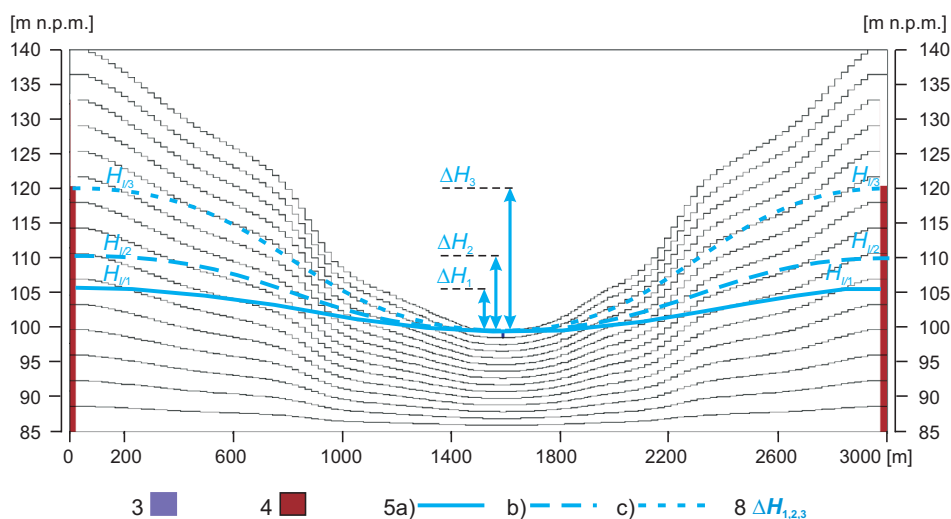


Fig. 2. Przekrój pionowy modelowanej doliny rzecznej

3 – warunki brzegowe III rodzaju, 4 – warunki brzegowe I rodzaju, 5 – zwierciadło wód podziemnych dla: a) $H_{I1} = 105 \text{ m n.p.m.}$, b) $H_{I2} = 110 \text{ m n.p.m.}$, c) $H_{I3} = 120 \text{ m n.p.m.}$, 8 – różnica poziomu między zwierciadłem wody w rzece H_R a zwierciadłem wody w warstwie wodonośnej w strefie zasilenia rzeki H_I

Vertical section of the modelled river valley

3 – boundary conditions of type III, 4 – boundary conditions of type I, 5 – groundwater table for: a) $H_{I1} = 105 \text{ m a.s.l.}$, b) $H_{I2} = 110 \text{ m a.s.l.}$, c) $H_{I3} = 120 \text{ m a.s.l.}$, 8 – difference between the surface water table in river H_R and the groundwater table in the recharge zone of river H_I

Tabela 1

Zakresy zmienności poszczególnych czynników testowane w badaniach modelowych

The ranges of variability of individual factors tested in model studies

Czynnik	Symbol	Jednostka	Wartości parametrów		
			niskie (L)	średnie (M)	wysokie (H)
Różnica poziomu wody	$\Delta H = H_I - H_R$	m	5	10	20
Szerokość rzeki	b	m	3	6	9
Współczynnik filtracji	k_x, k_y, k_z	m/s	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
		m/d	1,73	17,30	173,0
Stopień anizotropii	k_z/k_x	–	1,0	0,5	0,1
Powierzchnia bloku obliczeniowego	F_{bloku}	m^2	9,0		
Współczynnik filtracji strefy hyporeicznej	k_h	m/s	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Mięszczość strefy hyporeicznej	m'	m	0,3	0,6	1,0
Przepuszczalność pionowa strefy hyporeicznej	$T_h = \frac{k_h}{m'} F_{bloku}$	m ² /s	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
			$7,5 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
			$15,0 \cdot 10^{-5}$	$15,0 \cdot 10^{-4}$	$15,0 \cdot 10^{-3}$
		m ² /d	3,9	38,9	388,8
			6,5	64,8	648,0
			13,0	129,6	1296,0

Tabela 2

Wyniki modelowania warunków fluidyzacji strefy hyporeicznej

Results of modelling of hyporeic zone fluidization conditions

Dla każdego z powyższych czynników przyjęto określony zakres zmienności, który podzielono na trzy podzakresy wartości: niskich (L), średnich (M) i wysokich (H). Zakres zmienności poszczególnych czynników dobierano w taki sposób, aby był on zgodny z rzeczywistym zakresem ich zmienności występującym w środowisku przyrodniczym. W tabeli 1 zestawiono zakresy zmienności poszczególnych czynników testowane w badaniach modelowych.




Łącznie wykonano 243 (tab. 2) symulacje, z których odczytano pionową prędkość v_z przepływu wody w bloku pod dnem rzeki interpretowanym jako przepływ w strefie hyporeicznej. Uzyskaną wartość v_z dzielono przez wartość współczynnika filtracji strefy hyporeicznej k_h , co pozwoliło wyliczyć gradient hydrauliczny $i = v_z/k_h$. Warunki wystąpienia zjawiska fluidyzacji rozpoznawano przez poszukiwanie takich zestawów parametrów modelu, dla których gradient przekraczał wartość jeden.

WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH

Wyniki modelowania zestawiono w arkuszu kalkulacyjnym, gdzie wykonano obliczenia i sporządzono wykresy w układzie współrzędnych $i = f(Th)$. Zmienną Th obliczono zgodnie z równaniem [5], przyjmując dane z tabeli 1. Interpretację osi Th przedstawiono na figurze 3, natomiast 9 spośród 27 wykresów (co zaznaczono w tabeli 2) zaprezentowano na figurze 4.

Przepuszczalność T_h rośnie wprost proporcjonalnie do współczynnika filtracji pionowej k_h strefy hyporeicznej oraz odwrotnie proporcjonalnie do miąższości m' tej strefy, co objaśniają równanie [5] oraz figura 3. Trzeba dodać, że miąższość m' strefy hyporeicznej warunkuje także gradient hydrauliczny, zgodnie ze wzorem [4], co na wykresach $i = f(Th)$ dało efekt krzywych „schodkowych” (fig. 4). Oś pionową tych wykresów przedstawiono w skali logarytmicznej, aby

$\Delta H = H_I - H_R$	Anizotropia	k	$b = 3 \text{ m}$			$b = 6 \text{ m}$			$b = 9 \text{ m}$				
			$T_h = k_h/m'$										
			L	M	H	L	M	H	L	M	H		
$\Delta H = 5 \text{ m}$	$k_x = k_y = k_z$	H											
		M											
		L											
	$k_z = 0,5 k_x$	H											
		M											
		L											
	$k_z = 0,1 k_x$	H											
		M											
		L											
$\Delta H = 10 \text{ m}$	$k_x = k_y = k_z$	H											
		M											
		L											
	$k_z = 0,5 k_x$	H											
		M											
		L											
	$k_z = 0,1 k_x$	H											
		M											
		L											
$\Delta H = 20 \text{ m}$	$k_x = k_y = k_z$	H											
		M											
		L											
	$k_z = 0,5 k_x$	H											
		M											
		L											
	$k_z = 0,1 k_x$	H											
		M											
		L											

-  kombinacje czynników, dla których $1 < i < 3$ / combination of factors for which $1 < i < 3$
-  kombinacje czynników, dla których $i > 3$ / combination of factors for which $i > 3$
-  przypadki pokazane na figurze 4 / examples shown in Figure 4

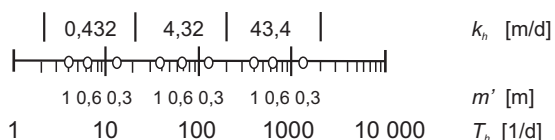


Fig. 3. Zależność przepuszczalności pionowej T_h od współczynnika filtracji k_h oraz miąższości m' strefy hyporeicznej

The dependence of vertical permeability T_h on the hydraulic conductivity k_h and the thickness m' of the hyporeic zone

łatwiej można było zauważyć sytuacje, w których spełniony jest warunek $i > 1$, który oznacza możliwość wystąpienia zjawiska fluidyzacji strefy hyporeicznej.

DYSKUSJA WYNIKÓW I PODSUMOWANIE

W literaturze można znaleźć wiele przykładów badań modelowych skoncentrowanych na relacjach wód powierzchniowych i podziemnych. W badaniach modelowych procesów zachodzących w strefie hyporeicznej są wykorzystywane wyniki badań georadarowych (Cardenas, Zlotnik, 2003). Inni autorzy badań modelowych uzależniają tempo

wymiany wody między rzeką a warstwą wodonośną oraz głębokość penetracji wód rzecznych od rozmieszczenia i stopnia anizotropii struktur sedimentacyjnych wypełniających koryto rzeczne (Conant, 2004) oraz osadów budujących strefę hyporeiczną (Tonina, Buffington, 2007; Busato i in., 2019).

Analizując uzyskane wyniki należy zauważyć, że wystąpieniu fluidyzacji strefy hyporeicznej sprzyjają przede wszystkim duża różnica położenia zwierciadeł wód powierzchniowych i podziemnych oraz dobra przepuszczalność hydrauliczna warstwy wodonośnej. Na możliwość wystąpienia fluidyzacji znaczący wpływ ma wartość przepuszczalności hydraulicznej strefy hyporeicznej T_h , głównie ze względu na współczynnik filtracji k_h . Miąższość m' strefy hyporeicznej zmienia się w zakresie kilkunastu centymetrów i wpływa nie tylko na wartości przepuszczalności T_h (wzór 5), ale także na wartości gradientu i (wzór 4). Z tego względu miąższość m' nie ma istotnego wpływu na możliwość wystąpienia fluidyzacji. Wysokie wartości T_h , oznaczające ułatwione przesiąkanie przez strefę hyporeiczną, będą odpowiadać małym gradientom hydraulicznym. Zatem wystąpieniu fluidyzacji sprzyjają niskie wartości przepuszczalności strefy hyporeicznej.

W analizowanym zakresie zmienności parametrów, przy różnicy poziomu zwierciadeł podziemnego i powierzchniowego

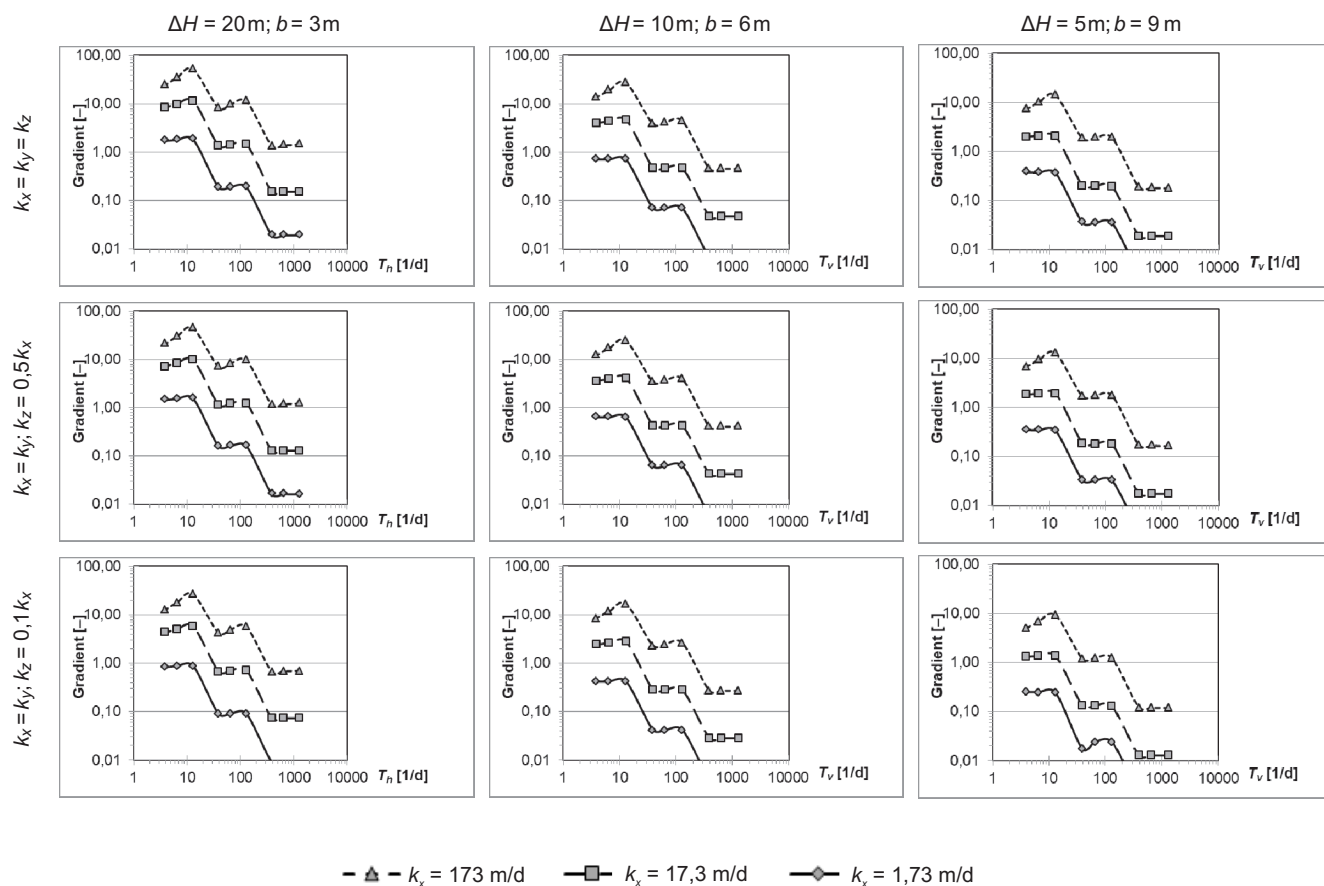


Fig. 4. Graficzne porównanie wyników modelowania

Graphical comparison of modelling results

wego rzędu 5 m, możliwość fluidyzacji osadów dennych jest niewielka i może się ona pojawić przy wysokiej przepuszczalności warstwy wodonośnej i niskiej przepuszczalności strefy hyporeicznej.

Przy różnicy zwierciadeł rzędu 10 m warunki fluidyzacji strefy hyporeicznej są korzystniejsze. Tutaj fluidyzacja może wystąpić przy średniej przepuszczalności warstwy wodonośnej i strefy hyporeicznej.

Natomiast przy różnicy położenia zwierciadeł wody rzędu 20 m fluidyzacja może pojawić się w strefie hyporeicznej o wysokiej przepuszczalności.

Na fluidyzację strefy hyporeicznej ma także wpływ anizotropia warstwy wodonośnej. Niskie wartości przepuszczalności pionowej ograniczają możliwość wystąpienia zjawiska fluidyzacji.

Im mniejsza szerokość rzeki tym warunki fluidyzacji są korzystniejsze. W ciekach szerokich fluidyzacja łatwiej występuje w głównym nurcie niż w strefach brzegowych.

Zjawisko fluidyzacji powoduje zakłócenie drenażu, co skutkuje zmianami właściwości wód w strefie hyporeicznej. Może mieć to znaczenie dla organizmów zarówno zwierzęcych, jak i roślinnych żyjących w tej strefie. Istotne znaczenie ma również dla procesów hydrologicznych, powodując szybkie zmiany poziomu wody w strumieniach, zanik dobowego charakteru fluktuacji wód strefy hyporeicznej, a także może zwiększyć dostawę zanieczyszczeń i związków biogennych do wód powierzchniowych. Fluidyzacja wpływa także na korytowe procesy geomorfologiczne. Przy dużych gradientach hydraulicznych w strefie hyporeicznej osady słabo przepuszczalne zostaną wyniesione z nurtem rzeki, dlatego w strefach intensywnego drenażu w osadach dennych występują utwory o wysokiej przepuszczalności.

Obserwacja zjawiska fluidyzacji w terenie jest trudna ze względu na losowy charakter miejsc jego występowania. Strefa hyporeiczna jest opisywana jako ośrodek porowaty, a pojawienie się miejsc o zwiększonym drenażu, a nawet źródeł podwodnych, jest związane z występowaniem lokalnej anizotropii.

Badania zostały sfinansowane przez projekt NCN 2015/17/8/ST10/01833 zatytułowany: „Uwarunkowania dobowych fluktuacji poziomu wody w strefach źródłiskowych i rzekach z uwzględnieniem oddziaływania strefy hyporeicznej”.

LITERATURA

- BOANO F., HARVEY J.W., MARION A., PACKMAN A.I., REVELLI R., RIDOLFI L., WÖRMAN A., 2014 – Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Rev. Geophys.*, **52**: 603–679.
- BUSATO L., BOAGA J., PERRI M.T., MAJONE B., BELLINI A., CASSIANI G., 2019 – Hydrogeophysical characterization and monitoring of the hyporheic and riparian zones: The Vermigliana Creek case study. *Sci. Total Environ.*, **648**: 1105–1120.
- CARDENAS M.B., ZLOTNIK V.A., 2003 – Three-dimensional model of modern channel bend deposits. *Water Resour. Res.*, **39**: 1141, doi:10.1029/2002WR001383.
- CONANT B. Jr., 2004 – Delineating and quantifying ground water discharge zones using streambed temperatures. *Ground Water*, **42**: 243–257.
- HANCOCK P.J., 2002 – Human impacts on the Stream groundwater exchange zone. *Environ. Manag.*, **29**: 763–781.
- HOLMES R.M., 2000 – The importance of ground water to stream ecosystem function. *W: Streams and ground waters* (red. J.B. Jones, P.J. Mulholland): 137–148. Academic Press, London.
- LEWANDOWSKI J., LISCHIED G., NÜTZMANN G., 2009 – Drivers of water level fluctuations and hydrological exchange between groundwater and surface water at the lowland River Spree (Germany): Field study and statistical analyses. *Hydrol. Proc.*, **23**: 1–12.
- MARCINIAK M., SZCZUCIŃSKA A., KACZMAREK M., 2017 – Zmienność współczynnika filtracji w strefie hyporeicznej w świetle badań laboratoryjnych. *Prz. Geol.*, **65**, 11/1: 1115–1120.
- MARCINIAK M., KACZMAREK M., SZCZUCIŃSKA A., 2018 – Model matematyczny fluidyzacji strefy hyporeicznej. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **471**: 89–96.
- PACKMAN A., SELEHIN M., 2003 – Relative roles of stream flow and sedimentary conditions in controlling hyporheic exchange. *Hydrobiologia*, **494**: 291–297.
- SCHMADEL N.M., WARD A.S., WONDZELL S.M., 2017 – Hydrologic controls on hyporheic exchange in a headwater mountain stream. *Water Resour. Res.*, **53**: 6260–6278.
- TONINA D., BUFFINGTON J.M., 2007 – Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. *Water Resour. Res.*, **43**: W01421, doi:10.1029/2005WR004328.
- WINTER T.C., 1999 – Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *J. Hydrol.*, **7**: 28–45.
- WONDZELL S.M., GOOSEFF M.N., MCGLYNN B.L., 2010 – An analysis of alternative conceptual models relating hyporheic exchange flow to diel fluctuations in discharge during baseflow recession. *Hydrol. Proc.*, **24**: 686–694.

SUMMARY

The hyporheic zone is a contact zone of surface and sub-surface waters. Conditions in which this zone functioning are important for plant and animal organisms living there, but also for water exchange, their chemical composition and catchment response to precipitation. One of the specific processes occurring in this zone is hyporheic zone sediment fluidization. Fluidization is so-called flowing sands. In the bottoms of lakes, rivers and springs, the phenomenon of fluidization, associated with increased inflow of groundwater, visible in the form of a flowing sand. Based on previous work of the authors, it was shown that the phenomenon of fluidization occurs after the hydraulic gradient in the hyporheic zone exceeds one. Using this condition, simulation studies of the functioning of the river valley were carried out depending on many morphological, hydrological or hydrogeological factors. The following factors were tested: the difference between the groundwater table and the river water surface, the width of the river channel, the hydraulic conductivity and the anisotropy of the aquifer sediments, as well as the vertical permeability of the hyporheic zone. The vertical permeability of the hyporheic zone depends on the hydraulic conductivity and thickness of this zone. The range of vari-

ability of individual factors was divided into sub-ranges of low, medium and high values. The tested ranges of variability of individual factors corresponded to the real changes of these factors observed in the natural environment. The modeling experiments were carried out using the Visual MODFLOW program. The aim of the present study is to define such the hydrogeological conditions in a river valley for which the fluidization, may occur. A total of 243 simulations were performed, the results of which are summarized in the table, distinguishing such combinations of factors at which the phenomenon of fluidization may occur. **Selected calculation results** are also illustrated in charts showing the hydraulic gradient as a function of the vertical permeability of the hyporheic zone. Due to the wide range of variability, both chart axes have logarithmic scales. It was found that a large difference between the groundwater level and surface water level favors the occurrence of fluidization of the hyporheic zone. It has been shown that greater tendency to fluidization can be expected when the aquifer has a high hydraulic conductivity, the hyporheic zone is characterized by low vertical permeability, and the width of the river is small.

