

MODEL MATEMATYCZNY FLUIDYZACJI STREFY HYPORHEICZNEJ

A MATHEMATICAL MODEL OF THE HYPORHEIC ZONE FLUIDIZATION

MAREK MARCINIAK¹, MARIUSZ KACZMAREK², ANNA SZCZUCIŃSKA¹

Abstrakt. W strefie hyporeicznej dokonuje się wymiana wód powierzchniowych i podziemnych. W warunkach drenażu wód podziemnych, przy wzroście gradientu hydraulicznego, może dojść do fluidyzacji tej strefy. W artykule przedstawiono model matematyczny fluidyzacji strefy hyporeicznej, który wyprowadzono z bilansu sił związanych z filtracją wody przez strefę hyporeiczną. Model matematyczny umożliwia prognozowanie wystąpienia fluidyzacji w zależności od wzrostu położenia zwierciadła wód podziemnych. Przeprowadzono serię testów laboratoryjnych, które potwierdziły prognozę obliczoną z modelu. Przeanalizowano także konsekwencje hydrologiczne i hydrogeologiczne fluidyzacji strefy hyporeicznej takie jak: zanik dobowych fluktuacji zwierciadła wody w strefach źródłiskowych oraz zmiana tempa opadania wody w rzece po wezbraniu.

Słowa kluczowe: strefa hyporeiczna, fluidyzacja, model matematyczny.

Abstract. In the hyporheic zone, exchange of surface water and groundwater takes place. During the groundwater drainage and the increase in hydraulic gradient, this zone can be fluidized. The paper presents a mathematical model of hyporheic zone fluidization. It has been obtained from a balance of forces related to the water filtration through the hyporheic zone. The mathematical model makes it possible to predict the occurrence of fluidization depending on the increase in water table position. A series of laboratory tests were carried out, which confirmed the predictions according to the model. The hydrological and hydrogeological influences of hyporheic zone fluidization were also analyzed, namely: the decline of diurnal water level fluctuations in headwaters and the variable rate of decline of water level after rainfall flood.

Keywords: hyporheic zone, fluidization, mathematical model.

WSTĘP

Strefa hyporeiczna definiowana jest m.in. wg kryteriów hydrologicznych (White, 1993), hydrochemicznych (Zhou i in., 2014) i hydrobiologicznych (Stubbington i in., 2009; Wondzell, 2011). Uwzględniają one przede wszystkim obszar, w którym dochodzi do kontaktu wód powierzchniowych i podziemnych, a w konsekwencji do wymieszania się tych wód. Woda w strefie hyporeicznej ma cechy zarówno wody podziemnej, jak i powierzchniowej. W strefie tej dochodzi nie tylko do wymiany wody, lecz także do przepływu składników pokarmowych i materii organicznej (Hendricks, White, 1995). Strefa ta jest miejscem aktywnej przemiany

chemicznej i biochemicznej wód w wyniku kontaktu wód podziemnych o niskiej zawartości rozpuszczonego tlenu i wzbogaconych w substancje nieorganiczne z natlenionymi wodami powierzchniowymi (Olsen, Townsend, 2003).

W strefie hyporeicznej woda przepływa głównie w kierunku pionowym. Jeżeli wody powierzchniowe infiltrują do wód podziemnych, wektor prędkości jest zgodny z kierunkiem siły grawitacji (Darcy, 1856). W przypadku, gdy wody podziemne są drenowane przez wody powierzchniowe, wektor prędkości jest skierowany w kierunku przeciwnym i następuje przepływ wody ku górze. Podczas rozkładu sił skierowanych ku górze może dochodzić do unoszenia ziaren skalnych budujących strop strefy hypo-

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

² Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, ul. M.K. Ogińskiego 16, 85-092 Bydgoszcz.

reicznej, będącej jednocześnie dnem niszy źródłiskowej, rzeki lub jeziora. Zjawisko to nazywane jest fluidyzacją (*flowing sands*) (Cardenas, Zlotnik, 2003; Cocco i in., 2014; Marciniak i in., 2017). Wielkość fluidyzacji jest zależna m.in. od wzrostu gradientu hydraulicznego oraz średnicy ziaren skalnych budujących dno cieków lub zbiorników. Jest zjawiskiem znanym zarówno hydrologom, hydrobiologom, jak i hydrochemikom (Vallet i in., 1990; Hinkle i in., 2001; Jekatierynczuk-Rudczyk, 2006, 2007). Jej badaniu szczególną uwagę poświęcają biolodzy ze względu na warunki środowiskowe żyjących w strefie hyporeicznej organizmów (Danielopol, Mormonier, 1992; Brunke, Gonsler, 1997). Opis matematyczny fluidyzacji ośrodka porowatego jest wykorzystywany w geotechnice do analizy stateczności odwadnianych obiektów (Wiłun, 2013). Ponadto zjawisko fluidyzacji jest znane w odniesieniu do materiałów sypkich przemieszczanych w strumieniu gazu.

Zmienność kierunku filtracji wody na kontakcie wody podziemne–wody powierzchniowe może przyczynić się do zmiany wartości współczynnika filtracji w tej strefie (Calver, 2001; Cardenas i in., 2004; Marciniak i in., 2017). Intensywność wymiany wód, a więc też tempo obiegu materii i składników odżywczych, jest ważna nie tylko z punktu hydrogeologicznego zasilania rzek, lecz także stwarza unikatowe siedliska dla różnorodnych organizmów tego ekotonu (Jekatierynczuk-Rudczyk, 2007).

Celem eksperymentalnych badań prowadzonych na kolumnach filtracyjnych było potwierdzenie prognozowanych na podstawie modelu matematycznego warunków wystąpienia fluidyzacji strefy hyporeicznej.

METODY BADAŃ

Do kolumny filtracyjnej o średnicy D_c zasypało złożę piaszczyste o wysokości Δl (fig. 1), które odwzorowuje strefę hyporeiczną, czyli strefę kontaktu wód powierzchniowych i podziemnych. Kierunek filtracji wody można zadawać przez odpowiednie ustawienie dwóch przelewów nadmiarowych. W analizowanym przypadku filtracja wody przez strefę hyporeiczną odbywa się w kierunku przeciwnym do siły grawitacji, co można interpretować jako drenaż wód podziemnych przez wody powierzchniowe.

Materiał skalny strefy hyporeicznej jest początkowo złożem stałym (*fixed bed*). Przyjęto, że pomiędzy ziarnami piasku nie działają siły kohezji (przyciągania), a zachowanie się układu może być opisane modelem liniowym (Jianzhong, Renken, 2003). W literaturze rozważa się także nieliniowe modele fluidyzacji (np. Corradini i in., 2016), jednak model liniowy umożliwi rozwiązanie analityczne opisu współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych w strefie hyporeicznej.

Celem rozważań jest liniowy model matematyczny fluidyzacji strefy hyporeicznej. Punktem wyjścia do budowy modelu matematycznego były: bilans sił związanych z filtracją wody przez strefę hyporeiczną oraz bilans sił związanych z oddziaływaniem woda–ośrodek skalny.

BILANS SIŁ ZWIĄZANYCH Z FILTRACJĄ WODY PRZEZ STREFĘ HYPOREICZNĄ

Na dowolną cienką warstwę cieczy zawartej w materiale porowatym o grubości Δz w strefie hyporeicznej, w warunkach filtracji ustalonej, działa układ trzech sił – wypadkowa siła powierzchniowa P wywołująca ruch wody (w kierunku przeciwnym do siły grawitacji), opory filtracji P_D , które można określić na podstawie prawa Darcy'ego oraz ciężar G_w filtrującej wody (fig. 2).

Uwzględniając powyższe można zapisać:

$$P - (P_D + G_w) = 0 \quad [1]$$

Siła P pochodzi od różnicy ciśnień w wodzie Δp z obu stron warstwy Δz strefy hyporeicznej i odpowiada parciu hydrostatycznemu na część powierzchni A strefy hyporeicznej, którą zajmuje woda. Uwzględniając porowatość całkowitą n materiału skalnego, dla wypadkowej sił powierzchniowych można zapisać:

$$P = nA\Delta p \quad [2]$$

Siłę oporu filtracyjnego P_D można określić wykorzystując prawo Darcy'ego w postaci:

$$u = -ki \quad [3]$$

które wiąże gęstość strumienia filtracji u z gradientem hydraulicznym i , przy czym liniową proporcjonalność określa współczynnik filtracji k . Gradient hydrauliczny można wyrazić przez różnicę wysokości hydraulicznych Δh między dolną a górną powierzchnią elementu Δz :

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad [4]$$

Różnicę wysokości hydraulicznych Δh można z kolei powiązać z ciśnieniem Δp_D , które stanowi część ciśnienia Δp traconą na pokonanie oporów filtracji:

$$\Delta p_D = \rho_w g \Delta h \quad [5]$$

gdzie:

ρ_w – gęstość wody;

g – stała grawitacji.

Analogicznie jak w równaniu [2]:

$$P_D = nA\Delta p_D \quad [6]$$

Współczynnik filtracji k można powiązać z przepuszczalnością K oraz lepkością dynamiczną cieczy μ :

$$k = K \frac{\rho_w g}{\mu} \quad [7]$$

Biorąc pod uwagę równania [3], [4], [5], [6] oraz [7] można napisać:

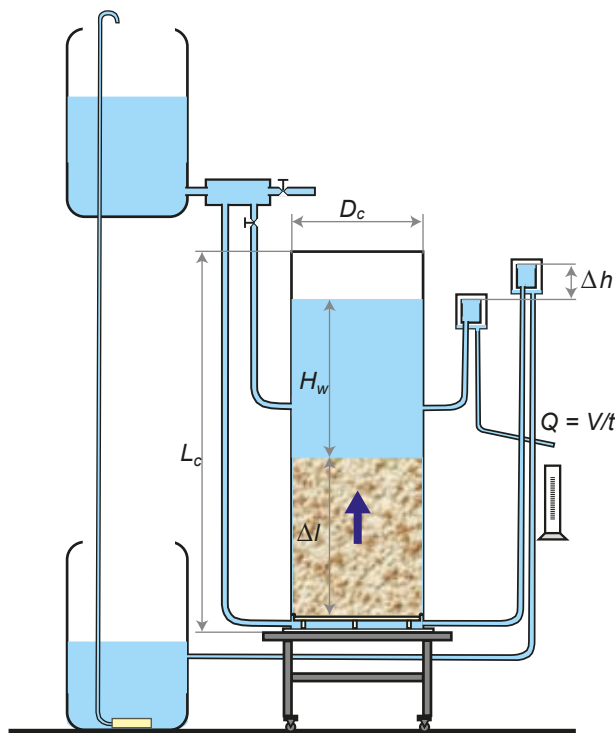
$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{P_D}{nA\Delta z} \quad [8]$$

Fig. 1. Stanowisko laboratoryjne z kolumną filtracyjną

D_c – średnica kolumny filtracyjnej [m], Δh – różnica ciśnień hydrostatycznych powyżej i poniżej złoża [m], H_w – wysokość słupa wody ponad złożem, L_c – wysokość kolumny [m], Q – natężenie strumienia filtracji przez kolumnę [m^3/s], V – objętość wody [m^3] filtrującej w czasie t [s]

Filtration column

D_c – diameter of filtration column [m], Δh – differential hydrostatic pressure above and below the bedrock [m], H_w – height of the water column above the bed, L_c – height of the column [m], Q – infiltration stream [m^3/s], V – water volume [m^3] filtrating in time t [s]



Stąd:

$$P_D = -\frac{\mu}{K} nuA\Delta z \quad [9]$$

Ciężar filtrującej wody w rozpatrywanym fragmencie strefy hyporeicznej wynosi:

$$G_w = \rho_w gnA\Delta z \quad [10]$$

Podstawiając zależności [2], [9] oraz [10] do równania [1] uzyskuje się:

$$nA\Delta p + \frac{\mu}{K} nuA\Delta z - \rho_w gnA\Delta z = 0$$

Po podzieleniu przez $nA\Delta z$ oraz uwzględnieniu, że $\Delta z \rightarrow 0$ uzyskuje się różniczkową postać równania bilansu sił w płynie porowym, które jest znane jako uogólnione prawo Darcy'ego (Zijl, Nawalany, 1993):

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{K} u - \rho_w g = 0 \quad [11]$$

BILANS SIŁ DZIAŁAJĄCYCH NA NASYCONY OŚRODEK SKALNY

Na dowolną cienką warstwę materiału porowatego wypełnionego cieczą o grubości Δz w strefie hyporeicznej działają trzy siły – siła S będąca wypadkową sił powierzchniowych działających od góry i od dołu na element Δz (ciecz i porowatą matrycę), ciężar ziaren skalnych G_s i ciężar wody G_w (fig. 3)

$$S - (G_s + G_w) = 0 \quad [12]$$

Oddziaływania pomiędzy wodą a ośrodkiem skalnym z uwagi na jednakowe wartości i kierunki oraz przeciwne znaki znoszą się.

Siła S jest równa iloczynowi przyrostu naprężeń całkowitych σ na dystansie Δz i powierzchni A :

$$S = -\Delta\sigma A \quad [13]$$

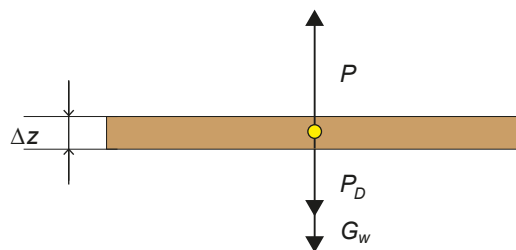


Fig. 2. Bilans sił związanych z filtracją wody przez złożo piaszczyste

Objaśnienia w tekście

The balance of forces associated with filtration of water through a sandy deposit

See text for explanations

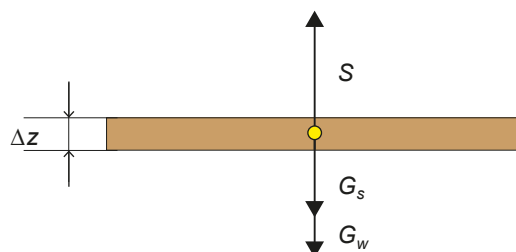


Fig. 3. Bilans sił dla warstwy materiału skalnego nasyconego wodą

Objaśnienia w tekście

The balance of forces for a layer of water-saturated rock material

See text for explanations

gdzie znak ujemny wynika z faktu, że tradycyjnie naprężenia są rozumiane jako dodatnie, kiedy powodują rozciąganie (przeciwnie do ciśnienia), a w bilansie sił [12] siły powierzchniowe są siłami ściskającymi.

Z kolei naprężenia całkowite wyrażają się przez naprężenia efektywne σ_e – w rozumieniu Terzagiego (Vardoulakis, 2004) – powodujące odkształcenie (w tym także fluidyzację) strefy hyporeicznej i ciśnienie p cieczy porowej (naprężenie ma znak przeciwny do ciśnienia):

$$S = -\Delta\sigma A = -\Delta(\sigma_e - p) A \quad [14]$$

Ciężar ziaren skalnych, o gęstości ρ_s , w rozpatrywanym fragmencie strefy hyporeicznej wynosi:

$$G_s = \rho_s g (1 - n) A \Delta z \quad [15]$$

natomiast ciężar wody określa równanie [10]. Podstawiając zależności [14], [15] oraz [10] do równania [12] uzyskuje się:

$$\Delta(\sigma_e - p) A + \rho_s g (1 - n) A \Delta z + \rho_w g n A \Delta z = 0 \quad [16]$$

Po podzieleniu obustronnie przez objętość $A \Delta z$ oraz uwzględnieniu, że $\Delta z \rightarrow 0$ otrzymuje się różniczkową postać równania bilansu sił dla agregatu matryca porowata–woda (Vardoulakis, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial z}(\sigma_e - p) + \rho_s(1 - n)g + \rho_w ng = 0 \quad [17]$$

MINIMALNA PRĘDKOŚĆ FLUIDYZACJI

Model matematyczny fluidyzacji strefy hyporeicznej powinien umożliwić wyznaczenie minimalnej prędkości fluidyzacji u_f , przy której następuje unoszenie piasku przez wodę płynącą w kierunku przeciwnym do siły grawitacji (Cocco i in., 2014).

Dodając stronami równania [17] oraz [11] uzyskuje się:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\sigma_e - p) + \rho_s(1 - n)g + \rho_w ng + \frac{\partial p}{\partial z} + u \frac{\mu}{K} - \rho_w g = 0$$

Po uporządkowaniu:

$$\frac{\partial}{\partial z}\sigma_e + \rho_s(1 - n)g + u \frac{\mu}{K} - \rho_w(1 - n)g = 0 \quad [18]$$

Spójność strefy hyporeicznej jest zapewniona dzięki ujemnym (ściskającym) naprężeniom efektywnym σ_e . Utrata spójności strefy hyporeicznej i unoszenie ziaren skalnych w wodzie następuje, gdy naprężenia efektywne σ_e znikają lub stają się dodatnie (rozciągające). Zatem warunkiem krytycznym, który umożliwia wyznaczenie minimalnej prędkości fluidyzacji u_f jest przypadek, gdy $\sigma_e \equiv 0$. Warto zauważyć, że warunek $\partial\sigma_e/\partial z = 0$ zapewnia równowagę kolumny piasku

(równanie [18]), ale nie gwarantuje fluidyzacji (Vardoulakis, 2004). Dla przypadku $\sigma_e \equiv 0$ prędkość u_f można wyznaczyć z równania [18]:

$$u_f = u_{\sigma_e=0} = -\frac{K}{\mu}(1 - n)(\rho_s - \rho_w)g \quad [19]$$

Podstawiając za K równanie $k(\mu/\rho_w g)$ uzyskuje się ostatecznie:

$$u_f = -k(1 - n)\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \quad [20]$$

KRYTYCZNY GRADIENT HYDRAULICZNY

Krytyczny gradient hydrauliczny, przy którym dochodzi do fluidyzacji strefy hyporeicznej, można wyznaczyć przekształcając najpierw równanie [11] do postaci:

$$\rho_w g \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{p}{\rho_w g} - z\right) + \frac{\mu}{K} u = 0 \quad [21]$$

a następnie uwzględniając, że zmiana potencjału hydraulicznego $[(p/\rho_w g) - z]$ wzdłuż drogi filtracji z oznacza gradient hydrauliczny i :

$$i = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{p}{\rho_w g} - z\right) \quad [22]$$

Podstawiając do równania [21] zamiast u minimalną prędkość fluidyzacji u_f określoną równaniem [20] oraz uwzględniając definicję gradientu hydraulicznego [22] uzyskuje się:

$$\rho_w g i_f - \frac{\mu}{K} k(1 - n)\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) = 0$$

Stąd po uwzględnieniu zależności [7] i uporządkowaniu uzyskuje się:

$$i_f = (1 - n)\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \quad [23]$$

EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA MODELU FLUIDYZACJI

W celu weryfikacji modelu fluidyzacji wyznaczono minimalne wartości prędkości fluidyzacji u_f dla piasków oznakowanych rzymskimi cyframi: II, III, IV oraz V, dla których współczynnik filtracji określono testem przepływu ustalonego w kierunku przeciwnym do siły grawitacji (*drainage*). Krzywe uziarnienia poszczególnych piasków zestawiono na [figurze 4](#).

Przyjęto, że ziarna skalne mają średnią gęstość równą gęstości kwarcu, $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, ciecz stanowi woda o gęstości $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ i lepkości $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, zaś porowatość wynosi ok. $n = 0,3$. Wartości minimalnej prędkości fluidyzacji u_f wyznaczono na podstawie wzoru [20] i zestawiono w ostatniej kolumnie [tabeli 1](#) oraz na [figurze 5](#).

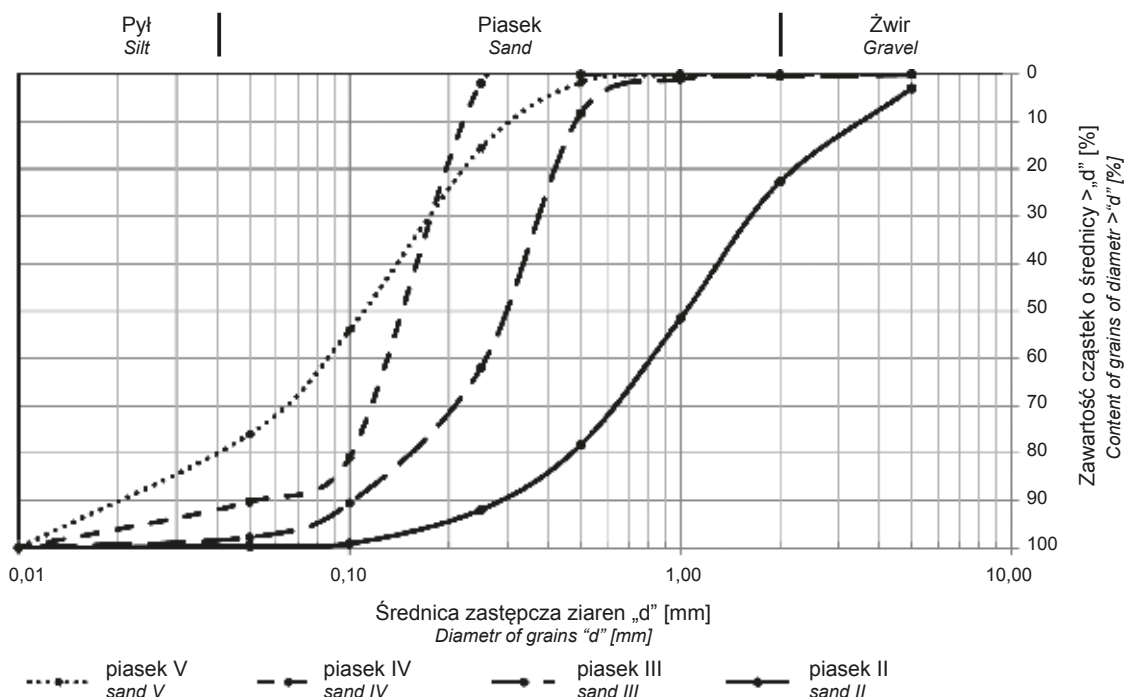


Fig. 4. Krzywe uziarnienia poszczególnych piasków

Grain-size distribution of the tested sand

Przy tych samych założeniach obliczono krytyczny gradient hydrauliczny i_f , korzystając ze wzoru [23]. Krytyczny gradient hydrauliczny wynosi $i_f = 1,16$.

KONSEKWENCJE HYDROGEOLOGICZNE FLUIDYZACJI STREFY HYPOREICZNEJ

Na skutek intensywnych opadów, w strefie drenażu wód podziemnych przez rzekę (fig. 6), może dojść do znacznego podniesienia zwierciadła wód podziemnych. Warunki drenażu ulegną wówczas zmianie i jeżeli gradient hydrauliczny filtracji wody w strefie hyporeicznej będzie większy od jedności, to wystąpi zjawisko fluidyzacji tej strefy. Podczas fluidyzacji złoża liniowe prawo filtracji przestaje obowiązywać i opory ruchu wody w osrodku porowatym maleją wielokrotnie.

W konsekwencji można zaobserwować zmianę warunków drenażu wód podziemnych, co można zilustrować przykładami dwóch zjawisk – zanikiem dobowych fluktuacji zwierciadła wody w strefach źródłiskowych oraz zmianą tempa opadania wody w rzecze po wezbraniu.

Tabela 1

Zestawienie minimalnych prędkości fluidyzacji wyznaczonych eksperymentalnie $u_{f\ exp}$ oraz obliczonych za pomocą modelu matematycznego $u_{f\ cal}$

A comparison of the minimum fluidization velocities determined experimentally $u_{f\ exp}$ and calculated using a mathematical model $u_{f\ cal}$

Piasek	k	K	$u_{f\ exp}$	$u_{f\ cal}$
	[m/s]	[m/h]	[m/h]	[m/h]
II	7,85E-04	2,83	3,31	3,32
III	2,41E-04	0,87	0,71	1,04
IV	4,10E-05	0,15	0,11	0,13
V	6,76E-06	0,02	0,02	0,04

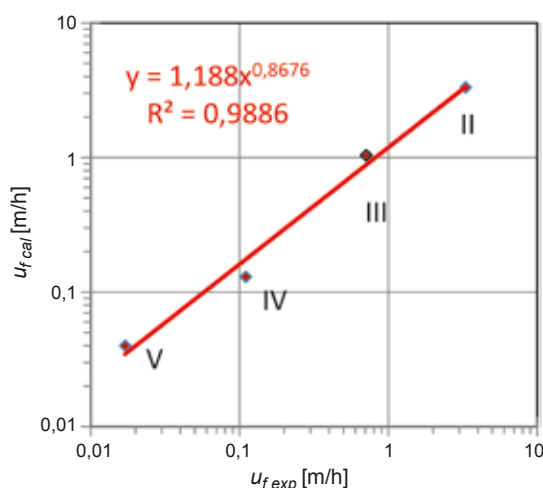


Fig. 5. Wyznaczone eksperymentalnie i obliczone wartości minimalnych prędkości fluidyzacji dla czterech rodzajów piasków

Experimental and calculated minimum velocity values of fluidization for four types of sands

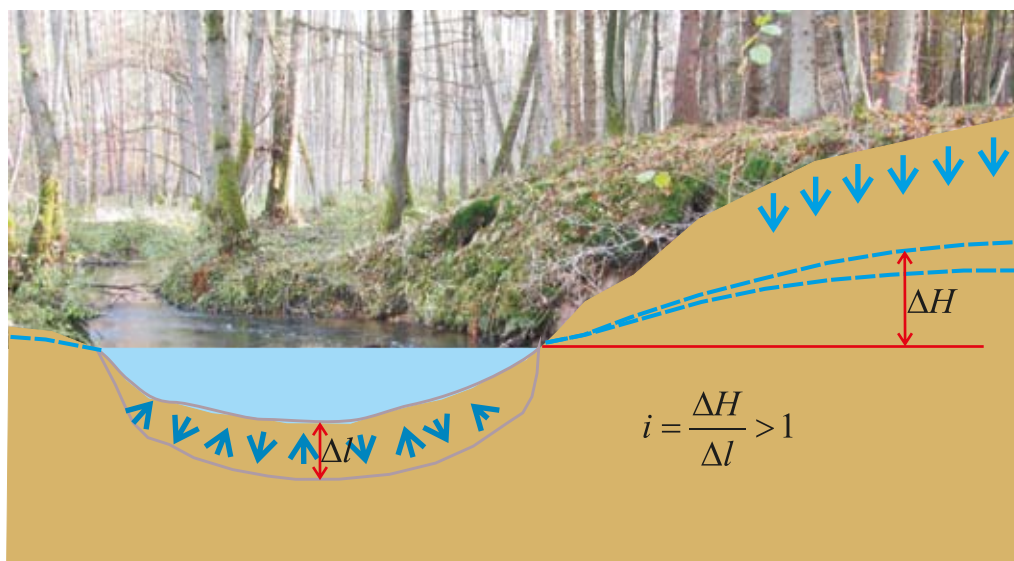


Fig. 6. Fluidyzacja strefy hyporeicznej jako reakcja na intensywny opad

Hyporheic zone fluidization as a reaction to intense precipitation

ZANIK DOBOWYCH FLUKTUACJI ZWIERCIADŁA WODY W STREFACH ŹRÓDLISKOWYCH

Charakterystyka i uwarunkowania dobowych fluktuacji zwierciadła wody w źródłiskach, strumieniach, rzekach a także w płytkich wodach podziemnych zostały szeroko opisane w literaturze. Jako najważniejsze czynniki warun-

kujące fluktuacje wymienia się ewapotranspirację, przepuszczalność hydrauliczną strefy hyporeicznej, a także infiltrację opadów i wód roztopowych. W zlewni rzeki Grażynki (Wysoczyzna Lubuska) zarejestrowano reakcję na opady w trzech strefach źródłiskowych: Augustynka, Wąwóz i Kemowy próg (fig. 7). W dniach od 4 do 11 lipca 2016 r. opady nie występowały. Obserwowano wówczas dobowe fluktu-

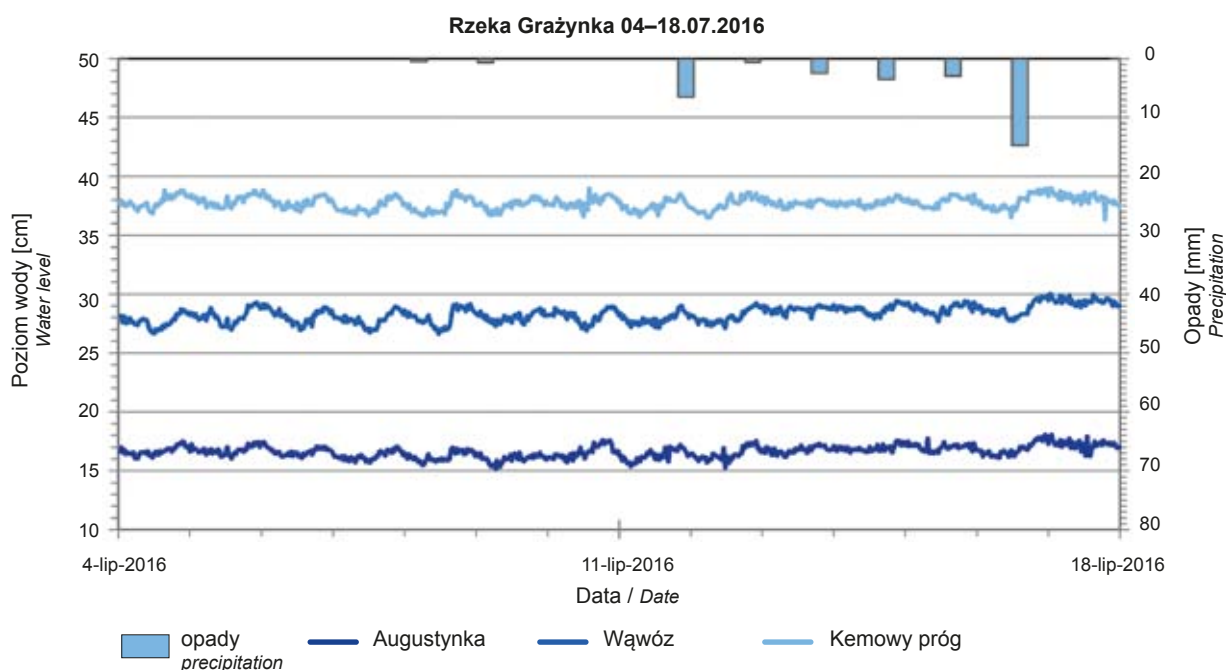


Fig. 7. Zanik dobowych fluktuacji zwierciadła wody w strefach źródłiskowych po opadach

The decline of diurnal water-level fluctuations in headwaters after rainfall

acje poziomu wody o amplitudzie od 3 do 5 cm we wszystkich źródłiskach. Po 11 lipca wystąpiły opady, co spowodowało zanik dobowych fluktuacji poziomu wody. Fluidyzację strefy źródłiskowej można obserwować jako turbulентne unoszenie ziaren piasku w różnych punktach źródłiska.

ZMIANA TEMPA OPADANIA WODY W RZECIE PO WEZBRANIU

Naturalną reakcją rzeki na opad jest wezbranie, które po ustaniu deszczu opada. W Różanym Strumieniu, który płynie w północnej części Poznania i jest lewobrzeżnym dopływem

Warty zarejestrowano dwa różne tempo opadania wody po wezbraniach (fig. 8).

Po krótkotrwałym opadzie w dniu 22 sierpnia 2016 r. tempo opadania wody miało charakter wykładniczy (fig. 9B), natomiast po długotrwałych opadach w dniach od 2 do 14 lipca 2016 r. nie można było jedną krzywą wykładniczą aproksymować tempa opadania wody. Krzywa opadania wody była bi-eksponencjalna, początkowo tempo opadania wody było szybsze, a po kilku godzinach wyraźnie zmalało (fig. 9A). Można to interpretować jako skutek fluidyzacji strefy hyporeicznej Różanego Strumienia w początkowym odcinku opadania wody po wezbraniu.

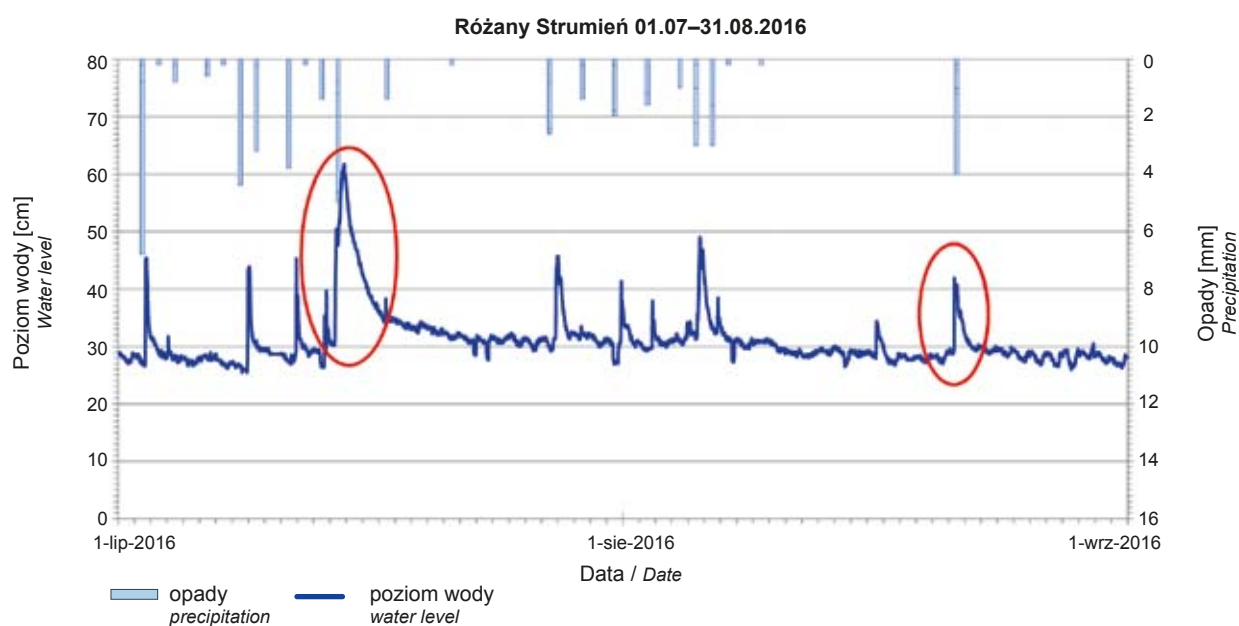


Fig. 8. Różne tempo opadania wody po wezbraniach opadowych

Different rates of water drop after rainfall flood

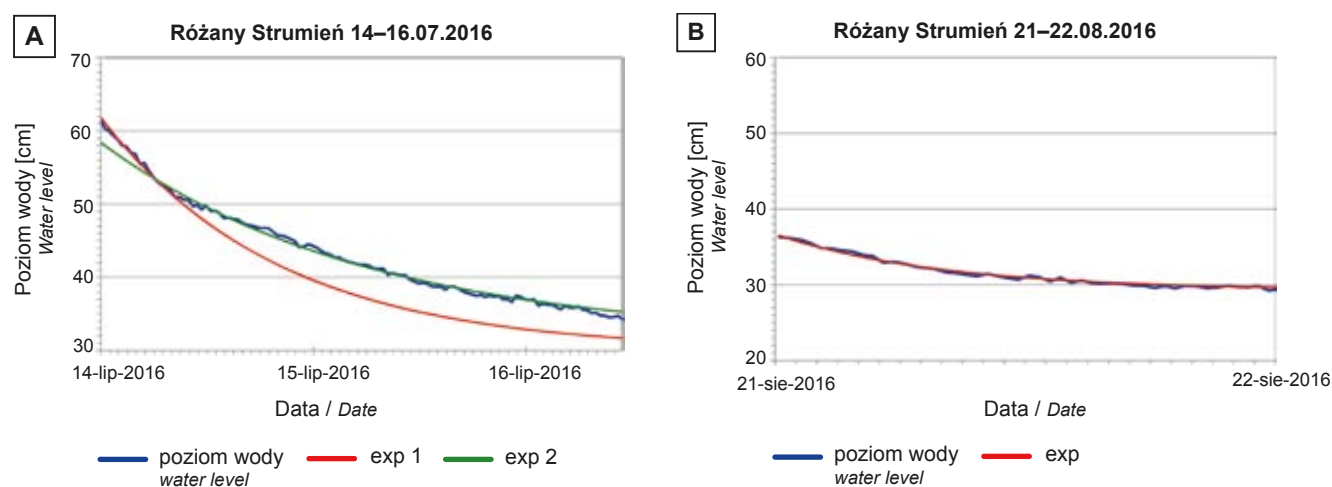


Fig. 9. Zmienne tempo opadania zwierciadła wody w Różanym Strumieniu po opadach długotrwałych (A) i krótkotrwałych (B)

Variable rate of water-level drop in the Różany Stream after long-term (A) and short-term (B) precipitation

PODSUMOWANIE

Model matematyczny fluidyzacji złoża piaszczystego skonstruowano na podstawie bilansu sił działających w strefie hyporeicznej.

Dla przeprowadzonych rozważań teoretycznych uzyskano potwierdzenie w badaniach laboratoryjnych na kolumnach filtracyjnych.

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych mogą mieć istotne znaczenie dla interpretacji warunków współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych w strefie hyporeicznej.

Fluidyzacja strefy hyporeicznej może być przyczyną zaniku dobowych fluktuacji zwierciadła wody w źródłiskach, strumieniach i rzekach.

Bi-eksponencjalny charakter opadania zwierciadła wody w rzece po wezbraniu może świadczyć o fluidyzacji strefy hyporeicznej.

Badania sfinansowano z projektu NCN 2015/17/8/ST10/01833 pt.: „Uwarunkowania dobowych fluktuacji poziomu wody w strefach źródłiskowych i rzekach z uwzględnieniem oddziaływania strefy hyporeicznej”.

LITERATURA

- BRUNKE M., GONSER T., 1997 – The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biol.*, **37**: 1–33.
- CALVER A., 2001 – Riverbed permeabilities. Information from pooled data. *Ground Water*, **39**, 4: 546–553.
- CARDENAS M.B., ZLOTNIK V.A., 2003 – Threedimensional model of modern channel bend deposits. *Water Resour. Res.*, **39**: 1141. DOI:10.1029/2002WR001383.
- CARDENAS M.B., WILSON J.L., ZLOTNIK V.A., 2004 – Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange. *Water Resour. Res.*, **40**: 1141–1153.
- COCCO R., KARRI R., KNOWLTON T., 2014 – Introduction to fluidization. *Chem. Eng. Prog.*, **110**: 21–29.
- CORRADINI M.L., CHAO Z., LIANG-SHIH F., RONG-HER J., 2016 – Multiphase Flow. *W: Handbook of fluid dynamics* (red. R.W. Johnson). CRC Press.
- DANIELOPOL D.L., MARMONIER P., 1992 – Aspects of research on groundwater along the Rhone, Rhine and Danube. *Regul. Rivers*, **7**: 5–16.

- DARCY H., 1856 – Les fontaines publique de la ville de Dijon. Paris.
- HENDRICKS S.P., WHITE D.S., 1995 – Seasonal biogeochemical patterns in surface water, subsurface hyporheic, and riparian ground water in a temperate stream ecosystem. *Arch. Hydrobiol.*, **134**: 459–490.
- HINKLE S.R., DUFF J.H., TRISKA F.J., LAENEN A., GATES E.B., BENCALA K.E., WENTZ D.A., SILVA S.R., 2001 – Linking hyporheic flow and nitrogen cycling near the Willamette River – a large river in Oregon, USA. *J. Hydrol.*, **244**: 157–180.
- JEKATIERYNCZUK-RUDCZYK E., 2006 – Water quality in the hyporheic zone of small lowland rivers. *Polish J. Environ. Stud.*, **15**: 53–456.
- JEKATIERYNCZUK-RUDCZYK E., 2007 – Strefa hyporeiczna, jej funkcjonowanie i znaczenie. *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych*, **56**: 181–196.
- JIANZHONG Y., RENKEN A., 2003 – A generalized correlation for equilibrium of forces in liquid-solid fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, **92**: 7–14.
- MARCINIAK M., SZCZUCIŃSKA A., KACZMAREK M., 2017 – Zmienność współczynnika filtracji w strefie hyporeicznej w świetle badań laboratoryjnych. *Prz. Geol.*, **65**, 11/1: 1115–1120.
- OLSEN D.A., TOWNSEND C.R., 2003 – Hyporheic community composition in a gravel-bed stream: influence of vertical hydrological exchange, sediment structure and physicochemistry. *Freshwater Biol.*, **48**: 1363–1378.
- STUBBINGTON R., GREENWOOD A.M., WOOD P.J., 2009 – The response of perennial and temporary headwater stream invertebrate communities to hydrological extremes. *Hydrobiol.*, **230**: 299–312.
- VALLET H.M., FISHER S.G., STANLEY E.H., 1990 – Physical and chemical characteristics of the hyporheic zone of a Sonoran desert stream. *J. North Am. Benthol. Soc.*, **9**: 201–215.
- VARDOULAKIS I., 2004 – Fluidisation in artesian flow conditions: Hydromechanically stable granular media. *Geotechnique*, **54**: 117–130.
- WHITE D.S., 1993 – Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *J. North Am. Benthol. Soc.*, **12**: 61–69.
- WILUN Z., 2013 – Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa.
- WONDZELL S.M., 2011 – The role of the hyporheic zone across stream network. *Hydrol. Process.*, **25**: 3525–3532.
- ZHOU N., ZHAO S., SHEN X., 2014 – Nitrogen cycle in the hyporheic zone of natural wetlands. *Chinese Sci. Bull.*, **59**: 2945.
- ZIJL W., NAWALANY M., 1993 – Natural Groundwater Flow. Lewis Publishers, Boca Raton.

SUMMARY

In the hyporheic zone, exchange of surface water and ground water takes place. During the groundwater drainage and the increase in hydraulic gradient, this zone can be fluidized. Based on the balance of forces interacting in the hyporheic zone, a mathematical model of the fluidization of sandy deposits has been constructed.

A series of laboratory tests were carried out, which confirmed the predictions according to the model.

The hydrogeological and hydrological results of hyporheic zone fluidizing were analyzed.

It has been shown that the fluidization of the hyporheic zone can cause the decline of diurnal water table fluctuations in the headwaters, streams and rivers. In addition, it was hypothesized that the bi-exponential nature of the water level decrease in the river after flooding may indicate the hyporheic zone fluidization

The results of the theoretical considerations and laboratory tests may have a significant meaning for the interpretation of the interaction between surface water and groundwater in the hyporheic zone.