

Ewa Burszta-Adamiak, Janusz Łomotowski

Możliwości wykorzystania granulometru laserowego do badań procesu infiltracji wody

W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie odprowadzaniem wód opadowych do gruntu w pobliżu miejsca ich powstawania. W naturalnych warunkach większość wód opadowych wsiąka do gruntu, część ulega odparowaniu przy udziale roślin (ewapotranspiracja), a 8-16%, w zależności od budowy morfologicznej strefy aeracji gruntu, przedostaje się do wód podziemnych. Intensywność infiltracji wód opadowych do gruntu wpływa na odpływ powierzchniowy i stany wód w rzekach. Uszczelnienie powierzchni obszarów zurbanizowanych wpływa na stan czystości wód powierzchniowych i szybkość wzrostu ich stanów, w tym powstawania fal podziemnych, a także na poziom płytko zalegających wód podziemnych. Ograniczenie ilości infiltrujących wód może spowodować zmiany w nośności gruntu i przyczynić się do powstawania szkód budowlanych. Do infiltracji wód opadowych odprowadzanych z powierzchni dachowych wykorzystuje się najczęściej infiltracyjne systemy skrzynkowe lub studnie chłonne. Przegląd rozwiązań stosowanych w kraju można znaleźć w pracy [1].

Infiltracja wody do gruntu jest zjawiskiem bardzo złożonym. Szczegółowy opis tego zjawiska, można znaleźć w pracach [2-4]. Jednym z czynników wpływających na szybkość infiltracji wody do gruntu jest współczynnik filtracji strefy aeracji. W celu ograniczenia wnikania mikrozawiesin zawartych w wodach opadowych do warstwy aeracji gruntu można wykorzystać m.in. geowłókniny.

Zjawiska zachodzące podczas przepływu cieczy przez ośrodek porowaty (złoże filtracyjne, warstwa gruntu), nie są do końca rozpoznane. W technologii oczyszczania wody proces filtracji najczęściej wykorzystuje się do usuwania zawiesin, czemu towarzyszy odkładanie się cząstek zawiesin wewnątrz warstwy filtracyjnej lub na jej powierzchni (kolmatacja), co skutkuje wzrostem strat hydraulicznych (opór hydrauliczny) w miarę upływu czasu trwania procesu.

Zależność pomiędzy stratami hydraulicznymi podczas przepływu cieczy przez ośrodek porowaty (w warunkach ustalonych) najczęściej opisywana jest równaniem Kozeny-Carmana [5]:

$$\frac{H}{L} = \Psi_0 \left(\frac{L_e}{L} \right) \frac{v \Psi_1^2}{g} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{v_f}{d^2} \quad (1)$$

w którym:

H – wysokość strat ciśnienia, m

L – wysokość warstwy filtracyjnej, m

L_e – rzeczywista droga przepływu strug cieczy w złożu, m

d – średnica zastępcza ziaren złoża, m

Ψ_0 – stała kształtu materiału filtracyjnego (współczynnik Carmana),–

Ψ_1 – współczynnik kształtu powierzchni,–

v – współczynnik lepkości kinematycznej, m^2/s

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2

ε – porowatość aktywna złoża,–

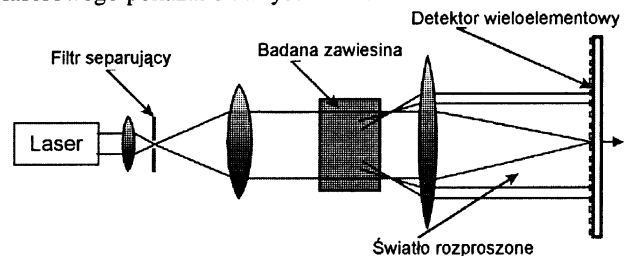
v_f – prędkość filtracji, m/s

Podczas odkładania się zawiesin w porach warstwy filtracyjnej obserwuje się zmianę parametrów L_e , Ψ_0 , Ψ_1 i ε . W pracach [5-7] można znaleźć ważniejsze modele teoretyczne i empiryczne stosowane do opisu zmian strat hydraulicznych w czasie odkładania się zawiesin w porach złoża filtracyjnego. Z równania (1) wynika, że największy wpływ na opory hydrauliczne ma porowatość aktywna złoża. Zmiany tej porowatości dotychczas najczęściej określano pośrednio, poprzez pomiar strat hydraulicznych podczas trwania procesu filtracji. Do badań zasięgu strefy kolmatacji oraz skuteczności usuwania zawiesin z wody można wykorzystać granulometr laserowy.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań wykonanych w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem granulometru laserowego, które miały wykazać skuteczność powstawania filtru namywanego na geowłókninach w celu ograniczenia wgłębnej kolmatacji gruntu.

Metodyka badań

Do pomiaru zawartości i rozmiaru cząstek zakolmatowanych w przestrzeniach międzyziarnowych oraz na powierzchni złoża użyto granulometru laserowego (analyzer dyfrakcyjny) firmy Malvern Instruments Ltd. z zakresem pomiarowym 0,02-2000 μm . Schemat działania granulometru laserowego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat działania granulometru laserowego [4]

Zasada działania tego urządzenia opiera się na zjawisku dyfrakcji światła laserowego, nazywanym też małym kątowym rozpraszaniem światła laserowego (*Low Angle Laser Scattering* – LALS). Opis matematyczny tego zjawiska jest zawarty w pracach [8,9]. Światło lasera ulega rozproszeniu przez cząstki pozostające w zawieszynie, przy czym kąt załamania światła jest odwrotnie proporcjonalny do rozmiaru cząstek.

Przy rozpatrywaniu cząstek sferycznych i dla małych kątów załamania, zjawisko to można opisywać analogicznie do dyfrakcji światła przez szczelinę. Natężenie rozszczonego światła ($I(\Theta)$) opisuje następująca zależność [8]:

$$I(\Theta) = \frac{1}{\Theta} \int_0^{\infty} r^2 n(r) J_1^2(kr\Theta) dr \quad (2)$$

w której:

Θ – kąt załamania się światła na cząstkach, rad

r – średnica cząstki, nm

$n(r)$ – funkcja rozkładu wielkości cząstek, –

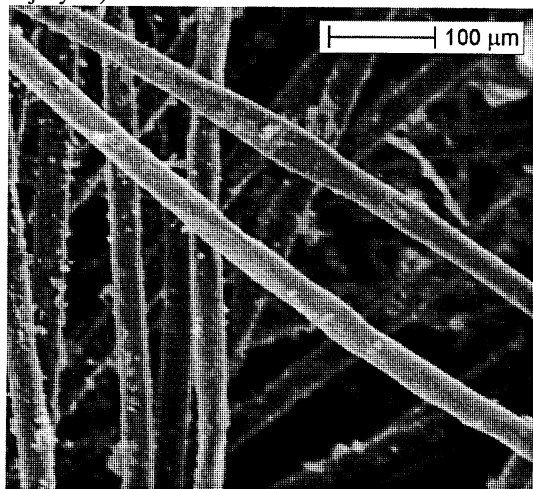
$k=2\pi/\lambda$, –

λ – długość fali światła lasera, nm

J_1 – funkcja Bessela pierwszego rodzaju, –

Pomiar natężenia rozszczonego światła za pomocą detektorów wieloelementowych pozwala na wyznaczenie funkcji rozkładu cząstek $n(r)$ po przekształceniu równania (2). Granulometr laserowy pozwala ustalić rozkład częstości występowania cząstek o różnym uziarnieniu oraz objętość zawiesin zawartych w badanej wodzie.

Stanowisko badawcze składało się z dwóch prostopadłościennych pojemników wykonanych z polipropylenu (szer. 0,27 m, dł. 0,36 m, wys. 0,25 m). Złoże filtracyjne stanowił przepłukany piasek średnioziarnisty o parametrach $d_{10}=0,25$ mm i $d_{60}=0,52$ mm. Wysokość warstwy filtracyjnej wynosiła 19,5 cm. Na dnie i w ściankach bocznych pojemników wywiercono otwory w celu zapewnienia swobodnego przesączania się wody przez strefę aeracji. W pierwszym pojemniku na powierzchni złoża oraz na bokach pojemnika ułożono geowłókninę o grubości 1 mm, a w drugim o grubości 1,2 mm. Zastosowane geowłókniny, według danych producenta, miały współczynniki filtracji większe od 700 m/d. Opór hydrauliczny czystych geowłóknin nie ma istotnego wpływu na infiltrację wody do gruntu. Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie skaningowe powierzchni geowłókniny, które wykonano w celu określenia rozmiaru porów w badanych geowłókninach. Rozmiar porów mieścił się w przedziale 5÷120 μm , a wartość O_{90} wynosiła 105 μm (90% porów wraz z mniejszymi).



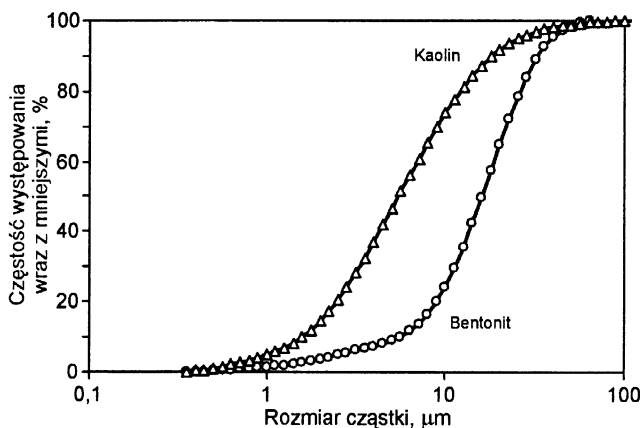
Rys. 2. Przykładowe zdjęcie skaningowe geowłókniny zastosowanej do badań

Pierwszy pojemnik z geowłókniną o grubości 1 mm zalewany był raz na dobę przez trzydzieści dni zawiesiną bentonitu pochodzącego z Zakładów Górniczo-Metalowych w Zębcu, drugi zawiesiną kaolinu z Kopalni Surowców Mineralnych Surmin w Nowogrodzcu. Objętość wody z zawiesinami

podawanej w ciągu doby wynosiła 2,0÷2,1 dm^3 . Zawiesiny bentonitu (kaolinu) o stężeniu 120 g/m^3 wykonano na bazie wody wodociągowej. Podczas badań do każdego pojemnika wprowadzono 75 g minerałów ilastych.

Wyniki badań

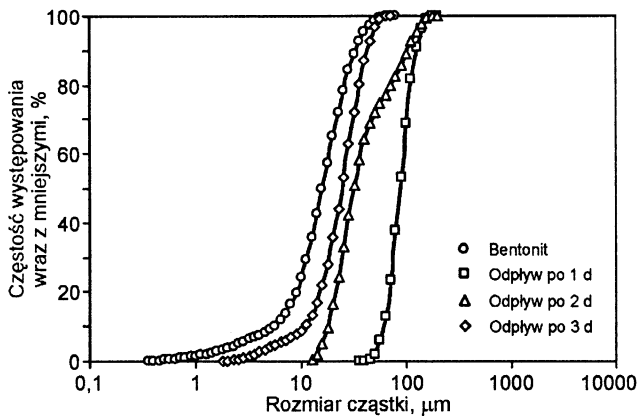
Na rysunku 3 przedstawiono dystrybuanty częstości występowania cząstek bentonitu i kaolinu, ustalone w oparciu o pomiary wykonane z wykorzystaniem granulometru laserowego. Zawiesina kaolinu charakteryzowała się większym udziałem cząstek o średnicach poniżej 15 μm niż zawiesina bentonitu. Udział cząstek poniżej 15 μm w zawieszynie kaolinu wynosił 86%, podczas gdy w zawieszynie bentonitu udział ten stanowił 44%, a cząstek o wymiarach 15÷50 μm około 50%.



Rys. 3. Dystrybuanty prawdopodobieństwa występowania cząstek o różnych wymiarach w zawiesinach użytych do badań

Kaolin i bentonit są mieszaninami różnych minerałów. Stanowiące podstawowy składnik kaolinu cząstki minerału ilastego kaolinitu nie zalicza się do cząstek wykazujących duże zdolności do pęcznienia w roztworach wodnych, w przeciwieństwie do montmorillonitu będącego głównym składnikiem bentonitów. Minerale te mają dużą zdolność adsorpcji cząstek wody, wskutek czego ich objętość może wzrastać w porównaniu do stanu powietrzno-suchego kilkukrotnie. Do badań zastosowano zawiesinę po kilkudniowym okresie namoczenia. W oparciu o wyniki badań na granulometrze laserowym ustalono, że objętość cząstek koloidalnych w zawieszynie kaolinu stanowiła 0,122 cm^3/dm^3 , a bentonitu 0,255 cm^3/dm^3 . Ciężar właściwy kaolinu (według danych producenta) wynosił 2,63 g/cm^3 , a bentonitu 2,30 g/cm^3 . Przy stężeniu zawiesin w wodzie 120 g/m^3 rzeczywista objętość zajmowana przez kaolin wynosiła 0,046 cm^3/dm^3 , a bentonitu 0,052 cm^3/dm^3 . Z obliczeń wynika, że cząstki kaolinu wskutek pęcznienia zwiększyły swoją objętość 2,6-krotnie, a bentonitu 4,9-krotnie.

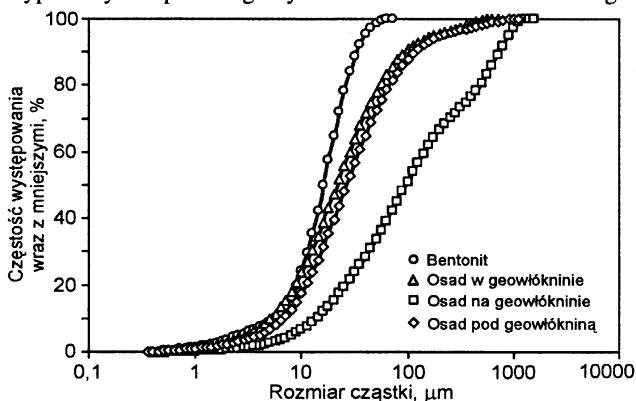
Przez pierwsze trzy doby badań stwierdzono w odpływie obecność zawiesin. W wypadku filtracji wody z zawiesiną bentonitu po pierwszej dobie objętość zawiesin w odpływie wynosiła 0,021 cm^3/dm^3 i była ponad 11-krotnie mniejsza od ilości zawiesin zawartych w wodzie podawanej na filtr. W drugiej dobie objętość zawiesin w filtracie spadła do 0,003 cm^3/dm^3 , a w trzeciej do 0,001 cm^3/dm^3 . Na rysunku 4 przedstawiono dystrybuanty prawdopodobieństwa występowania cząstek w roztworze bentonitu i w filtratach w pierwszych trzech dobach badań.



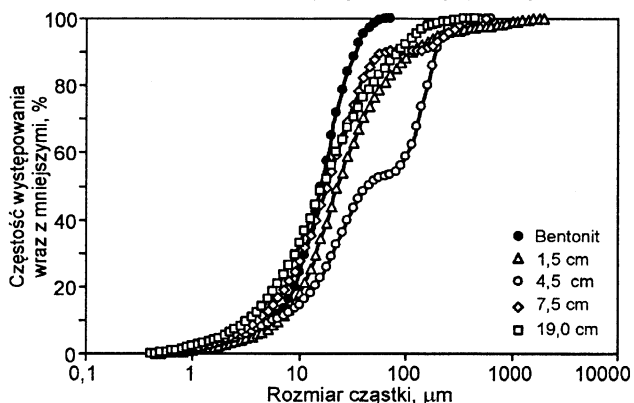
Rys. 4. Dystrybuanty prawdopodobieństwa występowania cząstek o różnych wymiarach w zawieszynie bentonitu oraz po 1, 2 i 3 dobach badań

Badania wykazały, że w filtratach wzrastał udział cząstek o większych wymiarach, w porównaniu do pierwotnego roztworu bentonitu. Zjawisko to mogło być wywołane usuwaniem drobnych cząstek w procesie filtracji, wywołując zmianę funkcji gęstości prawdopodobieństwa występowania cząstek w wodzie lub koagulacją cząstek w złożu.

Stwierdzono, że na powierzchni geowłókniny zatrzymało się 34,1 g bentonitu, co stanowiło 45,4% całej ilości bentonitu wprowadzonego w postaci zawiesziny, a wewnątrz geowłókniny 24,7 g (32,9%). Pozostała ilość bentonitu była zatrzymana wewnątrz złoża filtracyjnego. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono dystrybuanty prawdopodobieństwa występowania cząstek wypłukanych z poszczególnych warstw filtru doświadczalnego.

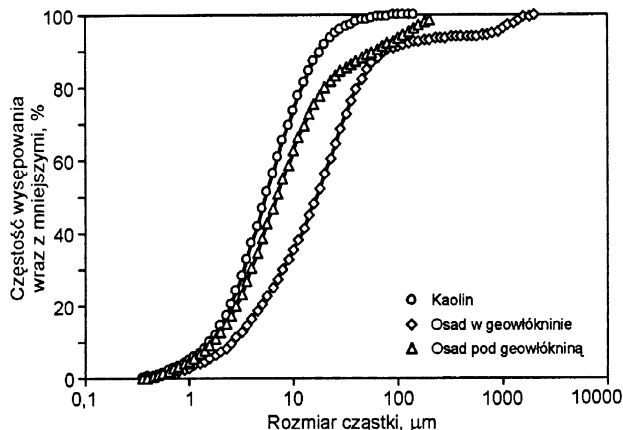


Rys. 5. Porównanie dystrybuant prawdopodobieństwa występowania cząstek o różnych wymiarach w zawieszynie bentonitu i odłożonych na powierzchni, wewnątrz geowłókniny i pod nią

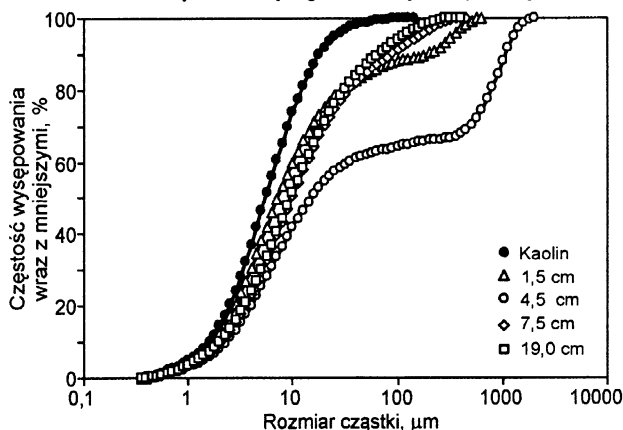


Rys. 6. Porównanie dystrybuant prawdopodobieństwa występowania cząstek o różnych wymiarach w zawieszynie bentonitu oraz na różnych głębokościach złoża

Badania wykazały, że w próbkach pobranych po zakończeniu badań wzrósł udział cząstek o rozmiarach powyżej 10 μm. Największą ilość osadów stwierdzono w wierzchnich warstwach. W wypadku stanowiska z kaolinem w próbkach pobranych po zakończeniu badań wyraźnie stwierdzono wzrost udziału cząstek o rozmiarach powyżej 1 μm, w porównaniu z zawieszyną kaolinu stosowaną do zalewania pojemników (rys. 7 i 8). Największa ilość osadu osadziła się na głębokości złoża 4,5 cm.

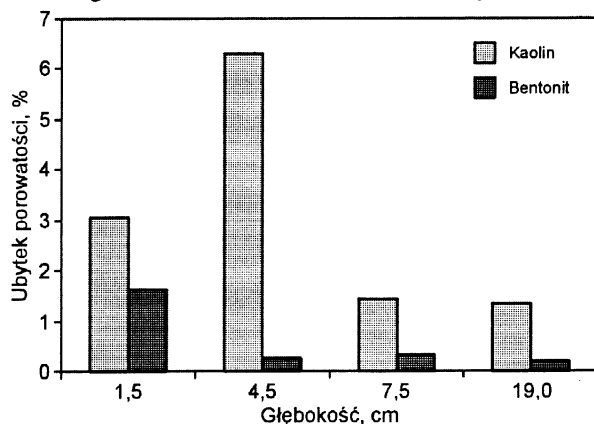


Rys. 7. Porównanie dystrybuant prawdopodobieństwa występowania cząstek o różnych wymiarach w zawieszynie kaolinu i odłożonych wewnątrz geowłókniny oraz pod nią



Rys. 8. Porównanie dystrybuant prawdopodobieństwa występowania cząstek o różnych wymiarach w zawieszynie kaolinu oraz na różnych głębokościach złoża

Ubytek porowatości złoża (%) na poszczególnych głębokościach był większy w wypadku stanowiska pomiarowego zalewanego zawieszyną kaolinu niż bentonitu (rys. 9).



Rys. 9. Porównanie ubytku porowatości materiału filtracyjnego po 30 dobach zalewania stanowiska zawieszyną kaolinu i bentonitu

Sytuacja ta mogła wynikać z faktu, że w wypadku zalewania materiału filtracyjnego zawiesiną bentonitu znaczna część cząstek tego minerału osadziła się już na powierzchni geowłókniny i wewnątrz niej (łącznie 78,3%), a tylko pozostała część została zatrzymana w złożu. W wypadku drugiego stanowiska (z kaolinem) sytuacja była odwrotna. Tylko 6% całej ilości tego minerału zostało zatrzymane w geowłókninie, a pozostała jej część (94%) odłożyła się wewnątrz materiału filtracyjnego lub została częściowo usunięta wraz z filtratem.

Wnioski

♦ Badania z wykorzystaniem granulometru laserowego pozwalają na ustalenie rzeczywistych objętości cząstek oraz rozkładu prawdopodobieństwa ich rozmiarów. Pozwala to określić stopień pęcznienia minerałów oraz rzeczywisty ubytek porowatości podczas procesu filtracji na poszczególnych warstwach złoża.

♦ Geowłókniny mogą pełnić rolę ochronnego filtra namywanego przed wglębną kolmatacją jedynie w wypadku, gdy dostosuje się ich umowny rozmiar (O_{90}) do rozmiaru cząstek pozostających w zawieszeniu w filtrującej wodzie.

LITERATURA

1. Z. SULIGOWSKI, K. GUDELIS-TARASZKIEWICZ: Infiltracja do gruntu – alternatywa dla tradycyjnej kanalizacji wód opadowych. *Przegląd Komunalny*, 2003, nr 5, ss. 76–77.
2. M. TH. VAN GENUCHTEN: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44, pp. 892–898.
3. V. RAVI, J. R. WILLIAMS: Estimation of infiltration rate in vadose zone: Appl. of selected mathematical models. EPA/600/R-97/128b, Vol. I, 1998.
4. J. R. WILLIAMS *et al.*: Estimation of infiltration rate in vadose zone: Appl. of selected mathematical models. EPA/600/R-97/128b, Vol. II, 1998.
5. A. L. KOWAL, M. M. SOZAŃSKI: Podstawy doświadczalne systemów oczyszczania wód: sedimentacja, koagulacja i filtracja. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1977.
6. J. MAĆKIEWICZ, M. M. SOZAŃSKI: Analiza zjawisk hydraulicznych w procesie filtracji pośpiesznej. *GWiT*S, 1973, nr 4, ss. 123–129.
7. J. MAĆKIEWICZ: Flokulacja w procesach koagulacji i filtracji wód. PWN, Warszawa 1987.
8. I. N. McCAVE, J. P. M. SYVITSKI: Principles and methods of geological particle size analysis. Principles, methods and application of particle size analysis. Cambridge University Press 1991.
9. G. BUTTERS, A. L. WHEATLEY: Experience with the Malvern ST 1800 Laser Diffraction Particle Sizer. Conf. proc. "Particle Size Analysis", Loughborough University of Technology, South Glamorgan (UK) 1981, pp. 425–436.

Burszta-Adamiak, E., Łomotowski, J. Application of the Laser Diffraction Particle Size Analyzer to the Study of the Water Infiltration Process. *Ochrona Środowiska* 2003, Vol. 25, No. 3, pp. 45–48.

Abstract: During liquid flow through the filter bed, suspended solids accumulate on the surface and in the interior of the filtering medium and thus contribute to the occurrence of the silting-up phenomenon, which enhances flow resistance and consequently reduces porosity and filtration rate. So far, the extent of filter bed contamination has been determined by head loss measurements in different periods of the filtration cycle, according to the geometry of the bed, the rate of filtration, and the physicochemical properties of the water. Despite the

availability of many different models, the silting-up phenomenon is still far from being well understood, owing to the various simplifications assumed in each of them. The laser diffraction particle size analyzer enables more accurate research on the silting-up process by characterizing the type of the suspended solids accumulating on the bed surface and inside the matrix. With this device it is possible to determine the probability density function for the occurrence of particles ranging in size from 0.02 μm to 2000 μm . The proneness of selected porous media to silting-up, as well as the size of the particles accumulated in the silted zone, was analyzed.

Keywords: Filtration, silting-up, laser diffraction particle size analyzer.