

Skuteczność geowłóknin w ograniczaniu kolmatacji w systemach do infiltracji wód opadowych

Dr inż. Ewa Burszta-Adamiak, prof. dr hab. inż. Janusz Łomotowski

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie retencją i infiltracją wód opadowych. Do tego celu stosuje się różne rozwiązania projektowe. Podstawową funkcją tych urządzeń jest przyjęcie spływów z terenu lub z dachów, krótkotrwale ich retencjonowanie oraz infiltracja do gruntu. Przy zastosowaniu tego rodzaju urządzeń problemem nie jest tylko wybór rozwiązania konstrukcyjnego, ale również długotrwałe utrzymanie eksploatacyjnej sprawności technicznej.

Podczas wsiąkania wód naturalnych do gruntu zawsze dochodzi do kolmatacji, skutkiem której jest uszczelnianie się powierzchni chłonnej oraz głębszych warstw gruntu. Zjawisko to jest wynikiem wypełniania się porów gruntu drobnymi cząstkami zawiesziny, wytrącania się związków chemicznych, wydzielania się gazów lub zatrzymywania i rozwoju mikroorganizmów pod wpływem filtrującej wody [1, 15, 16, 18]. W przypadku wód opadowych ilość i rodzaj nanoszonych zawieszin zależy od stanu czystości powietrza atmosferycznego oraz rodzaju i stopnia zanieczyszczenia powierzchni, na której formuluje się spływ powierzchniowy. Na przebieg zjawiska kolmatacji ma wpływ skład mineralogiczny gruntów, stężenie zawieszin w filtrującej wodzie, absorpcyjne współdziałanie cząstek ośrodka porowatego i cząstek kolmatanta oraz koagulacja [5, 6]. Niezależnie od czynników warunkujących przebieg zjawiska, kolmatacja jest procesem niepożądanym we wszystkich rodzajach urządzeń do sztucznej infiltracji [2, 14, 18, 24].

W dotychczas praktykowanym wymiarowaniu urządzeń chłonnych najczęściej marginalizuje się fakt uszczelniania gruntu wokół urządzeń chłonnych. Wraz z upływem czasu pracy urządzeń do infiltracji, w wyniku kolmatacji zmniejsza się porowatość, wzrasta opór hydrauliczny gruntu, zmniejsza się prędkość wsiąkania wody i obniża się wydajność urządzeń. Biorąc pod uwagę trudności w przeprowadzeniu zabiegów konserwacyjnych, w szczególności w systemach infiltracji podziemnej, do zapobiegania kolmatacji wgłębną znalazły zastosowanie geowłókniny. Na ich powierzchni powstaje w czasie infiltracji filtr namywany ograniczający wnikanie zawieszin w głąb gruntu. Geowłókniny spełniają funkcję ochronną, lecz w procesie filtracji, wskutek zatrzymywania cząstek zawieszin, same ulegają kolmatacji.

Młynarek i Vermeersch [19] za główne przyczyny zmian właściwości hydraulicznych geowłóknin uznali odkładanie się stałych cząstek wewnątrz materiału syntetycznego i na jego powierzchni poprzez „pakowanie” kolejnych warstw na siebie, tworzenia się biofilmu na powierzchni geowłóknin, wytrącanie się tlenków żelaza w wyniku zachodzących reakcji utlenienia i redukcji w roztworach wodnych oraz wytrącania się węglanów i siarczanów. Kolmatacja geowłóknin zachodzi intensywniej w przypadku cyklicznego osuszania [25]. Zjawisko to autorzy wiązali z przyklejaniem się drobnych cząstek w porach geowłókniny w okresie wysychania materiału syntetycznego, w konsekwencji czego następuje zmniejszanie się przekroju porów. Zachowując ciągły przepływ cieczy przez geowłókninę zapobiega

się osadzaniu cząstek stałych. Palmeira i Gardoni [23] wykazali, że zjawisko odkładania cząstek na geowłókninie zachodziło intensywniej, gdy materiał syntetyczny był ścisany lub już częściowo zakolmatowany cząstkami, które mogły przedostać się do geosyntetyku w trakcie budowy danego urządzenia.

W literaturze przedmiotu można znaleźć publikacje opisujące zmienność właściwości hydraulicznych geowłóknin w czasie ich eksploatacji. Jednak w większości prac autorzy odnoszą się do wyników badań poświęconych zmianom właściwości geowłóknin pracujących w układzie gleba/geowłóknina. Są to układy, które spotyka się przy powszechnym stosowaniu geowłóknin w geotechnice, inżynierii wodnej oraz lądowej. Nieliczne prace poświęcone są wynikom badań geowłóknin pracujących w układach: zawiesina/geowłóknina/grunt. Takie układy występują w przypadku infiltracji wód opadowych. Dodatkowo, odmienny charakter pracy geowłóknin w systemach do infiltracji wód opadowych wyklucza bezpośrednie wykorzystanie opisanych w literaturze technicznej kryteriów przepuszczalności oraz kolmatacji geowłóknin [12, 13, 19, 21, 26].

W pracy przedstawiono wyniki badań wykonanych w skali laboratoryjnej, mających na celu wykazanie, w jakim stopniu zastosowanie geowłóknin wpływa na ograniczenie kolmatacji urządzeń do infiltracji wód opadowych. Badania połączono z analizą ilości i wielkości zanieczyszczeń występujących w opadach atmosferycznych oraz spływów z dachu, które przedostają się do urządzeń chłonnych.

METODYKA BADAŃ

Badania w kierunku oceny skuteczności geowłóknin pracujących w urządzeniach chłonnych były prowadzone w dwóch etapach. W pierwszym przeprowadzono ocenę objętości i rozmiaru cząstek zanieczyszczeń występujących w opadach deszczu i śniegu oraz w spływach z dachów. Próbkę wód badano na granulometrze laserowym Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments Ltd. Przyrząd pozwalał oznaczać cząstki zawieszin o rozmiarze od 0,02 do 2000 μm . Próby opadów i spływów pobierano w kilku miejscowościach na terenie Polski. W artykule przedstawiono wyniki badań prób pobranych we Wrocławiu. Inne wyniki można znaleźć w pracach [7, 8, 9, 17].

Drugi etap badań przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na stanowisku, w którego skład wchodziły 4 prostopadłościennie polipropylenowe pojemniki o szerokości 0,27 m, długości 0,36 m i wysokości 0,25 m. Na dnie i w ścianach bocznych pojemników wywiercono otwory w celu zapewnienia swobodnego przesączania się wody przez strefę aeracji. Na powierzchni złożeń oraz na bokach pojemników ułożono geowłókniny (rys. 1).

Złoże filtracyjne stanowił przepłukany piasek średnioziarnisty o uziarnieniu $d_{10} = 0,25 \text{ mm}$ i $d_{60} = 0,52 \text{ mm}$. Wysokość warstwy filtracyjnej wynosiła 19,0 cm. Stanowiska zalewano

Tabl. 1. Dane techniczne geowłóknin użytych w badaniach

Właściwości	Metodyka badań	Jednostka	Typ			
			G1	G2	G3	G4
Umowny wymiar porów O_{90}	EN ISO 12956	μm	105	105	100	95
Wodoprzepuszczalność prostopadła do płaszczyzny geowłókniny	EN ISO 11058	mm/s	130	115	90	72
Wodoprzepuszczalność w płaszczyźnie geowłókniny	EN ISO 12958	$10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	6	10	25	35
Grubość	PN-EN 964-1	mm	1,0	1,2	1,7	2,2

raz na dobę przez okres trzydziestu dni objętością $20 \div 21 \text{ dm}^3$ zawiesziny bentonitu lub kaolinu. Zawiesinę bentonitu (kaolinu) o stężeniu 120 g/m^3 sporządzano na bazie wody wodociągowej. W celu uzyskania spęcznienia cząstek minerałów zawiesinę przygotowywano kilka dni wcześniej przed użyciem. Na podstawie badań przeprowadzonych z użyciem granulometru laserowego ustalono, że objętość cząstek w zawieszynie bentonitu wynosiła $0,258 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, a kaolinu $0,088 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$.

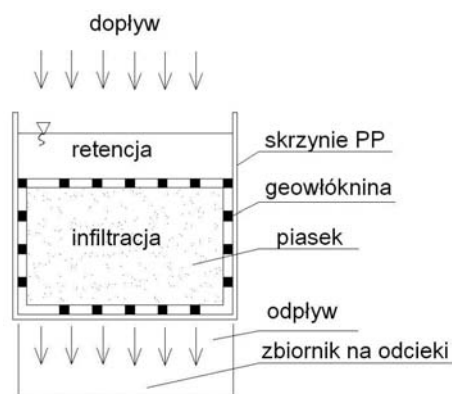
Zawiesinami bentonitu zalewano pojemniki z ułożoną na powierzchni piasku geowłókniną G1 i G3, natomiast zawiesiną kaolinu zalewano pojemniki, w których użyto geowłóknin G2 i G4. Parametry techniczne geowłóknin wykorzystanych w badaniach zestawiono w tabl. 1. Podczas całego okresu badań do każdego pojemnika zalewanego zawiesinami bentonitu i kaolinu wprowadzono 75 g minerałów ilastych. W pierwszych dniach badań określono objętość cząstek i skład granulometryczny zawieszin w odciekach. Po zakończeniu badań określono objętość i skład granulometryczny zawieszin zgromadzonych na geowłókninach, wewnątrz i pod ich powierzchnią, a także wewnątrz

złoża na głębokościach 1,5; 4,5; 7,5 i 19 cm. Ponadto metodą wagową określono masę osadów odłożonych na geowłókninach oraz masę zawieszin wypłukanych z geowłóknin.

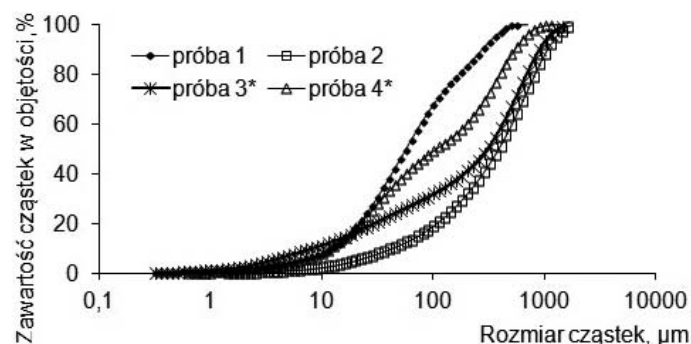
Wykorzystywana w badaniach zawiesina kaolinu charakteryzowała się cząsteczkami o wymiarach mieszczących się w przedziale od $0,25 \div 100 \mu\text{m}$. W zawieszynie bentonitu identyfikowano cząstki z podobnego przedziału średnic zastępczych, ale udział cząstek o małych średnicach w porównaniu z kaolinem był znacznie mniejszy (rys. 2). Taki zakres cząstek odpowiadał $60 \div 70\%$ wielkości wszystkich zanieczyszczeń znajdujących się w przeważającej liczbie badanych prób opadów deszczu, śniegu i spływów z dachów [10].

SKŁAD GRANULOMETRYCZNY WÓD OPADOWYCH

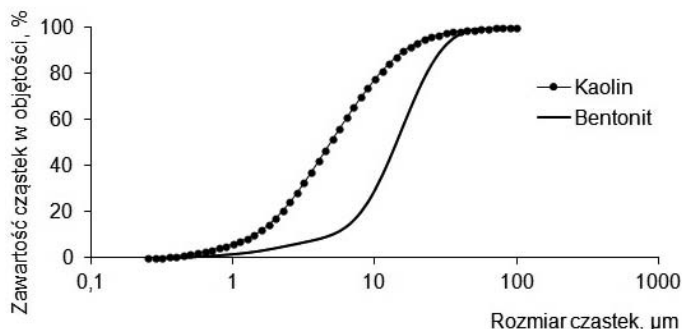
Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe rozkłady wielkości cząstek zawieszin zawartych w opadach i spływach w wybranych próbach pobranych we Wrocławiu.



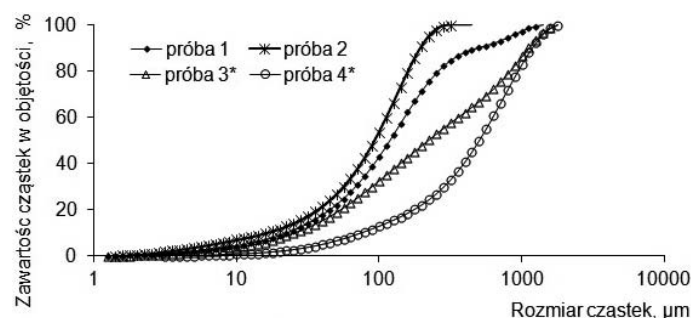
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego w skali laboratoryjnej



Rys. 3. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w próbach opadu deszczu i śniegu pobranych we Wrocławiu (oznaczenie gwiazdką dotyczy opadu śniegu)



Rys. 2. Skład granulometryczny zawieszin kaolinu i bentonitu użytych do badań



Rys. 4. Porównanie składu granulometrycznego zawieszin w próbach spływu z dachu pobranych we Wrocławiu (oznaczenie gwiazdką dotyczy spływów pierwszej fazy)

Tabl. 2. Charakterystyka statystyczna wyników badań objętości zawiesin w opadach deszczu, śniegu i spływach z dachów pobranych we Wrocławiu

Rodzaj próby	Objętość zawiesin w cm^3/dm^3				
	Mediana	Minimum	Maksimum	Percentyl 10%	Percentyl 90%
Opady deszczu	0,218	0,013	0,639	0,062	0,529
Opady śniegu	0,310	0,110	0,330	0,170	0,324
Spływy z dachów	0,190	0,048	4,410	0,0824	1,551

Badania wykazały, że w próbach opadu śniegu największy udział procentowy w objętości zawiesin miały cząstki o rozmiarze do 400 μm . W opadach deszczu zaobserwowano, że w okresie zimowym największy udział w objętości zawiesin stanowiły cząstki do 400 μm , natomiast w okresie wiosennym zwiększył się udział cząstek dużych o średnicy zastępczej dochodzącej do 1000 μm . Najprawdopodobniej jest to związane ze zjawiskiem łączenia się pyłków roślinnych uwalnianych w dużych ilościach w czasie kwitnienia drzew. Punkt pomiarowy znajdował się w bliskim sąsiedztwie z parkiem. Badania spływów wód opadowych z dachów wykazały, że skład tych wód jest zależny od jakości wód deszczowych oraz zanieczyszczeń zdeponowanych na połaci dachowej w okresie bezopadowym. Spłukiwanie tych zanieczyszczeń, szczególnie w okresie jesiennym i wiosennym, powoduje, że wody odpływające z rynien mogą być silnie zanieczyszczone zbutwiałymi liśćmi, resztkami roślinności, guanem itp.

Największą objętością zawiesin charakteryzują się wody pierwszej fazy spływu. W tym okresie licznie występują cząstki o wymiarach przekraczających 500 μm . W miarę trwania deszczu wzrasta w objętości zawiesin udział cząstek małych do 100 μm . Wzrost udziału cząstek o małych średnicach zastępczych może być wynikiem rozpadu dużych cząstek zawartych w deszczu wskutek oddziaływania sił hydrodynamicznych w czasie kształtowania się spływu oraz przepływu wody w rynnach. W tabl. 2 przedstawiono medianę, wartości minimalne i maksymalne oraz percentyl 10% i 90% zbiorów wyników badań objętości zawiesin w opadach deszczu, śniegu i spływach z dachów.

WYNIKI BADAŃ NA MODELACH

Wyniki badań odcieków z pojemnika z geowłókniną G1, zalewanego bentonitem, wykazały wzrost średnic zastępczych cząstek zawiesiny w porównaniu z roztworem bentonitu użytym do badań. W odpływie z pierwszej doby badań identyfikowano cząstki z przedziału 31 ÷ 178 μm , z drugiej od 10 ÷ 158 μm , a z trzeciej doby cząstki były najmniejsze i mieściły się w zakresie od 1,4 ÷ 56 μm . Dla porównania, zakres cząstek znajdujących się w zawieszynie bentonitu mieścił się w przedziale 0,3 ÷ 63 μm (patrz rys. 1). Objętość zawiesin w odpływie po pierwszej dobie wynosiła 0,021 cm^3/dm^3 i była ponad dwunastokrotnie mniejsza od objętości zawiesin zawartych w zawieszynie podawanej na złoża (0,258 cm^3/dm^3). W drugiej dobie objętość zawiesin w filtracji spadła do 0,003 cm^3/dm^3 , a w trzeciej do 0,001 cm^3/dm^3 . W kolejnych dniach badań objętość cząstek zawiesin w odpływającej wodzie była poza granicą oznaczalności granulometru laserowego.

Wzrost średnic zastępczych w odciekach, w porównaniu do składu granulometrycznego zawiesin bentonitu podawanych na filtr, zaobserwowano także w pojemniku z geowłókniną G3. W tym przypadku w odcieku po pierwszym dniu badań objętość zawiesin wyniosła aż 0,132 cm^3/dm^3 . Po drugim zalaniu pojemnika zawieszyną bentonitu objętość ta wyniosła 0,003 cm^3/dm^3 , a od trzeciego dnia w odciekach nie stwierdzono cząstek zawieszonych oznaczanych granulometrem laserowym. Przyrost wielkości średnic zastępczych cząstek w odpływie można wytłumaczyć powstawaniem koloidalnych cząstek o bardzo rozbudowanej strukturze przestrzennej, które granulometr identyfikuje jako cząstki kuliste.

W wodzie odpływającej z pojemnika zalewanego zawieszyną kaolinu z ułożoną na powierzchni piasku geowłókniną G2 nie zaobserwowano wzrostu udziału cząstek o większych średnicach zastępczych w porównaniu ze składem granulometrycznym zawiesin kaolinu. W tym przypadku obecność cząstek zawiesin w odpływie z pojemnika stwierdzono tylko w trzecim dniu badań. Objętość zawiesin dla tej próby wyniosła 0,002 cm^3/dm^3 . W stanowisku z geowłókniną G4 cząstki zawiesin w wodzie odpływającej z pojemnika doświadczalnego zaobserwowano tylko w drugim dniu badań na poziomie 0,0085 cm^3/dm^3 .

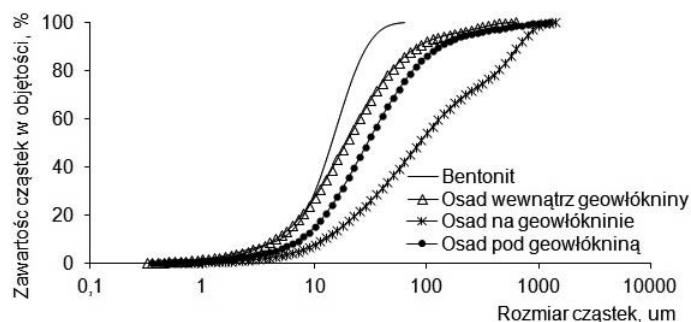
Badania składu granulometrycznego odcieków wykazały, że do czasu uszczelnienia się powierzchni złoża dochodzi do wnikanania cząstek wewnątrz złoża. Proces ten zależy od wielkości cząstek, stopnia ich spęcznienia, składu granulometrycznego zawiesiny oraz zastosowanej geowłókniny. Do podobnych wniosków doszli Borzdyńska-Marahori i Ossowski [3], którzy wykazali, że zjawisko kolmatacji geowłóknin zachodzi w dwóch charakterystycznych etapach. W pierwszym następuje wypełnienie przestrzeni porowej materiału syntetycznego cząstkami, których wymiary zbliżone są do średnicy porów geowłókniny. Etap ten został nazwany przez autorów okresem wypełniania przestrzeni porowych. W drugim etapie w wyniku klinowania się cząstek drobniejszych powstają struktury, które powodują w konsekwencji gwałtowny spadek wodoprzepuszczalności geowłókniny. Na czas trwania poszczególnych etapów miał wpływ rodzaj zastosowanej geowłókniny i skład granulometryczny zawiesin.

Na powierzchni geowłóknin G1 i G3 zatrzymało się w ciągu całego okresu badań odpowiednio 42,9 g i 41 g bentonitu, co stanowiło w pierwszym przypadku 57,2%, a w drugim 54,6% całej ilości minerału wprowadzonego z zawieszyną. Wewnątrz geowłóknin ilość zatrzymanego bentonitu wynosiła w przypadku geowłókniny G1 23,3 g (31,1%), a dla geowłókniny G3 25,9 g (34,5%). Pozostała ilość bentonitu, stanowiąca około 11% całej masy tego minerału wprowadzonego w formie zawiesiny, została zatrzymana wewnątrz złoża. Zawiesiny w odpływie oznaczano tylko w pierwszych 3 dniach eksperymentu. Całkowita objętość zawiesin, która odpłynęła w pierwszych trzech dniach eksperymentu z pojemnika z geowłókniną G1 wyniosła 0,525 cm^3 , co stanowiło 0,32% całej objętości zawiesin wprowadzonych do pojemnika (165,54 cm^3). Masę zawiesin odpływających ze złoża można pominąć w bilansie. Podobne zjawisko miało miejsce przy filtracji zawiesiny bentonitu przez złoża piaskowe przykryte geowłókniną G3.

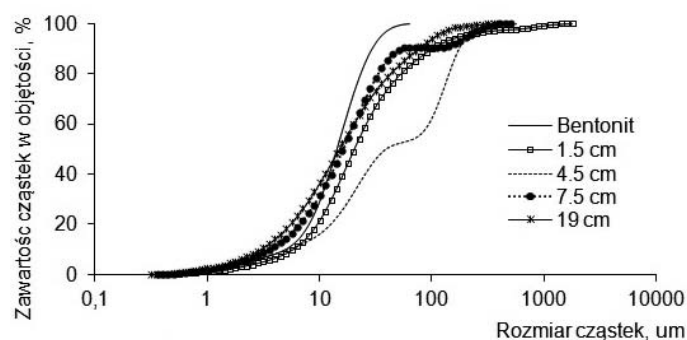
W przypadku pojemników zalewanych zawieszyną kaolinu na powierzchni geowłóknin nie wytworzyła się w czasie trwania eksperymentu zwarta warstwa osadów. Kaolin zgromadził się

wewnątrz geowłókniny. Masy kaolinu zatrzymanego w geowłókninach G2 i G4 były do siebie zbliżone i stanowiły około 43% całkowitej ilości minerału wprowadzonego na złożę. Pozostała ilość kaolinu wniknęła w głąb warstwy piasku. Podobnie do eksperymentu z bentonitem można również pominąć masę kaolinu wyniesioną z odpływającą wodą.

Skład granulometryczny osadów zgromadzonych na powierzchni, wewnątrz i pod geosyntetykiem oraz wypłukanych z poszczególnych warstw złoża na stanowisku z geowłókniną G1 przedstawiono na rys. 5 i 6. We wszystkich stanowiskach zaobserwowano wzrost średnicy zastępczej cząstek w porównaniu ze składem granulometrycznym zawiesin minerałów użytych



Rys. 5. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na geowłókninie G1, wewnątrz niej i pod jej powierzchnią



Rys. 6. Porównanie składu granulometrycznego zawiesin bentonitu użytego do badań ze składem granulometrycznym zawiesin odłożonych na różnych głębokościach złoża chronionego geowłókniną G1

w eksperymencie. Zjawisko to można wytłumaczyć aglomeracją cząstek minerałów, do której dochodziło w geowłókninach oraz w złożu.

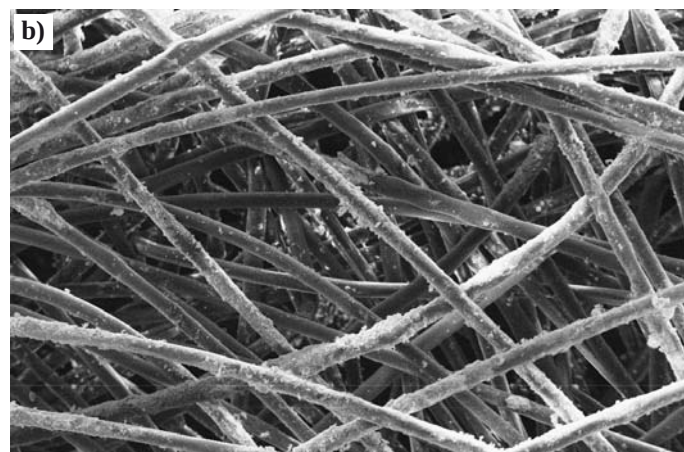
Procentowy ubytek porowatości złoża na poszczególnych ich głębokościach określono przy uwzględnieniu początkowej porowatości złoża piaskowego wynoszącej 35%. Wyniki analiz zestawiono w tabl. 3.

Procentowy ubytek porowatości na poszczególnych głębokościach złoża był największy w przypadku złoża zalewanego zawiesiną kaolinu. Zawiesina kaolinu charakteryzowała się składem granulometrycznym cząstek o najmniejszych średnicach zastępczych i słabych zdolnościach do pęcznienia. Wyniki badań wskazują, że przy bardzo małych cząstkach ochronę przed kolmatacją można uzyskać stosując geowłókninę o większej grubości. Przy geowłókninie G2 spadek porowatości w warstwie 0–1,5 cm pod geowłókniną wyniósł 4,3%, a w warstwie 1,5–4,5 cm 8,8%, podczas gdy przy zastosowaniu geowłókniny G4 wartości te wyniosły odpowiednio 1,49% i 1,98%.

W przypadku zalewania zawiesiną bentonitu nie zaobserwowano tak istotnych ubytków porowatości złoża piaskowego, jak to miało miejsce przy zawiesinie z kaolinu. W tym przypadku zauważa się korzystny wpływ grubości geowłóknin na zasięg kolmatacji. Bentonit jako substancja mocno pęczniąca szybko tworzył warstwę filtra namywanego. Nowak [22], Borzdyńska-Marahori i Rogala [4] oraz Palmeira i Gardoni [23] zdolność do zatrzymywania cząstek zawiesiny także wiązali z grubością

Tabl. 3. Porównanie ubytku porowatości złoża zalewanego zawiesiną kaolinu i bentonitu

Warstwa złoża [cm]	Procentowy ubytek porowatości złoża filtracyjnego zalewanego zawiesiną [%]			
	bentonitu		kaolinu	
	G1	G3	G2	G4
0 – 1,5	7,01	3,44	4,30	1,49
1,5 – 4,5	1,47	1,06	8,86	1,98
4,5 – 7,5	1,31	0,92	2,03	0,95
7,5 – 19	0,85	0,77	1,89	0,53



Rys. 7. Zdjęcia skaningowe osadu bentonitu odłożonego w geowłókninie G1 (po lewej) oraz kaolinu odłożonego w geowłókninie G2 (po prawej) wykonane przy powiększeniu 250 razy (po lewej)

geowłókniny. Im grubszy materiał, tym większe jest prawdopodobieństwo zatrzymania cząstek. Faure i in. [11], wykazali, że przy małych stężeniach zawieszin w filtrującej wodzie grubość geowłóknin jest parametrem nieistotnym przy ocenie kolmatacji geosyntetyków.

Zdjęcia wykonane mikroskopem elektronowym (rys. 7) pozwoliły wyjaśnić przyczyny większej kolmatacji złoża piaskowego kaolinem w porównaniu z kolmatacją przy infiltracji wody z zawiesziną bentonitu. Cząstki kaolinu są znacznie mniejsze od przestrzeni międzywłóknowej materiału syntetycznego opisywanej przez producentów geowłóknin parametrem O_{90} (jest to wymiar wielkości porów, które wraz z mniejszymi stanowią 90% porów w geowłókninie). W przypadku zawiesziny bentonitu obecne były cząstki o średnicach zastępczych większych od O_{90} . W tym przypadku dochodziło do szybkiego uszczelniania porów geowłóknin i tworzenia się filtru namywanego. Można z tego wyciągnąć wniosek, że ochronną funkcję geowłóknin można uzyskać wtedy, gdy parametr O_{90} będzie dostosowany do składu granulometrycznego infiltrowanej zawiesziny. Podobnie Narejo [21] w swoich badaniach potwierdził, że jednym z głównych czynników decydujących o zatrzymywaniu zawieszin jest rozmiar porów geowłókniny. Z kolei Moo-Young i Tucker [20] wykazali, że odkładanie się cząstek zachodzi głównie w mniejszych porach o wymiarach $10 \div 50 \mu\text{m}$, a migracja drobnych cząstek przenikających przez geowłókninę zależy od wielkości najmniejszego rozmiaru porów geowłókniny podawanego przez producenta.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków końcowych:

1. Wody opadowe charakteryzują się dużą zmiennością składu granulometrycznego domieszek, uwarunkowaną stopniem zanieczyszczenia opadów, powierzchni spływu oraz warunkami lokalnymi charakterystycznymi dla miejsca poboru prób.
2. Geowłókniny spełniają funkcję ochronną, lecz do czasu wytworzenia się warstwy osadu na powierzchni geowłóknin dochodzi do wnikania cząstek wewnątrz złoża. Intensywność tego procesu zależy od wielkości cząstek znajdujących się w wodach oraz od wielkości porów geowłókniny i od jej grubości.
3. Grubość geowłóknin ma wpływ na przemieszczanie się cząstek w głąb gruntu w przypadku zawieszin o małych średnicach zastępczych (do $100 \mu\text{m}$). W przypadku zawieszin z cząstkami o średnicach zastępczych powyżej umownego wymiaru porów geowłóknin O_{90} następuje powierzchniowe uszczelnienie geowłókniny i odciedzaanie małych cząstek zawiesziny na powstającym na powierzchni geowłókniny placku osadu.
4. Warunkiem niezbędnym do poprawnego funkcjonowania geowłóknin jako warstw separujących złoża filtracyjne w urządzeniach chłonnych jest rozpoznanie właściwości geowłóknin, jakimi dysponują producenci, głównie wielkości porów oraz rozmieszczenia włókien, a także właściwości wód opadowych, w tym składu granulometrycznego zawieszin.

Istnieje potrzeba kontynuowania badań w układach zawieszina/geowłóknina/grunt dla różnych rodzajów zawieszin, warunków gruntowych i geowłóknin o różnych parametrach. Wyniki powinny być uwzględniane na etapie projektowania i eksploatacji urządzeń do infiltracji wód opadowych do gruntu.

LITERATURA

1. Balades J-D., Legret M., Madiec H.: Permeable pavements: Pollution management tools. *Water Science and Technology*. Vol. 32, No.1, 1995, 49-56.
2. Bergman M., Hedegaard M. R., Petersen M. F., Binning P., Mark O., Mikkelsen P. S.: Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation. *Water Science and Technology*. Vol. 63 (10), 2011, 2279-2286.
3. Borzdyńska - Marahori L., Ossowski J.: Właściwości filtracyjne geowłóknin polskich. II konferencja pt.: Problemy hydrogeologiczne (S-W) Polski, Szklarska Poręba 1989.
4. Borzdyńska-Marahori L., Rogala R.: The influence of silting - up with sand grains on water permeability of geotextile. IV International Conference on Slope Stability and Protection. Problems of Hydroengineering, Technical University of Wrocław 1991.
5. Bouwer H.: Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, 2002, 121-142.
6. Bouwer H., Ludke J., Rice R. C. Sealing pond bottoms with muddy water. *J. Ecol. Eng* 18 (2), 2001, 233-238.
7. Burszta-Adamiak E., Kęszycka M., Łomotowski J.: Skład granulometryczny zawieszin występujących w wodach opadowych. XX Jubileuszowa Krajowa, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, 15-18 czerwiec 2008, Poznań-Gniezno, tom I, 137-147.
8. Burszta-Adamiak E., Kęszycka M., Szwed J.: Ocena przydatności granulometru laserowego do analizy zanieczyszczeń wód opadowych odprowadzanych z terenów zurbanizowanych. *Woda – Środowisko- Obszary Wiejskie*. Wyd. IMUZ, t.7, z.2b(21), 2007, 33-42.
9. Burszta-Adamiak E., Stodolak R.: Ocena składu granulometrycznego zawieszin w mokrym opadzie atmosferycznym na tle jego składu fizykochemicznego. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* Wyd. IMUZ, t. 7, z.2a(20), 2007, 83-94.
10. Burszta-Adamiak E.: Badania nad zastosowaniem geowłóknin do przeciwdziałania kolmatacji w procesie infiltracji. Rozprawa doktorska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
11. Faure Y. H., Baudoin A., Pierson P., Plé O.: A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspended solids. *Geotextiles and Geomembranes* No. 24, 2006, 11-20.
12. Faure Y. H., Farkouh B., Delmas Ph., Nancey A.: Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 17, 1999, 353-370.
13. Fourie A.B., Blight G. E.: Tests to determine the suitability of a geotextile for use in containment of hydraulically placed backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, No.14, 1996, 465-480.
14. Hua G. F., Zhu W., Zhang Y. H.: A conceptual approach based on suspended solids to estimate clogging time in constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 45, 2010, 1519-1525.
15. Li H., Davis A. P., ASCE F.: Urban Particle Capture in Bioretention Media. I: Laboratory and Field Studies. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 134, No. 6, June 1, 2008, 409-418.

16. Li H. Z., Wang S., Ye J. F., Xu Z. X., Jin W.: A practical method for the restoration of clogged rural vertical subsurface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment using earthworm. *Water Science and Technology* Vol 63.2, 2011, 283-290.
17. Łomotowski J., Burszta-Adamiak E., Kęszycka M., Jary Z.: *Metody i techniki optyczne w badaniach zawieszin*. Monografia. Wyd. Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych, Warszawa 2008.
18. Mays D. C.: Contrasting Clogging in Granular Media Filters, Soils, and Dead-End Membranes. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 136, No. 5, 2010, 475-480.
19. Młynarek J., Vermeersch O.: Filter criteria for geotextile materials in soil filtration and leachate collection systems. *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1999*.
20. Moo-Young H. K., Tucker W. R.: Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes. *Geotextiles and Geomembranes*, No.20, 2002, 191-212.
21. Narejo D. B.: Opening size recommendations for separation geotextiles used in pavements. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 21, 2003, 257-264.
22. Nowak B.: *Geotekstyli a woda w gruncie*. *Geotechnika* nr 6, 1987.
23. Palmeira E. M., Gardoni M. G.: Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes* No. 20, 2002, 97-115.
24. Suresha S.N., Varghesel G., Shankar A. U. R.: Laboratory and theoretical evaluation of clogging behaviour of porous friction course mixes. *International Journal of Pavement Engineering* Vol. 11, No. 1, 2010, 61-70.
25. Togrol E., Guler E., Ersoy T.: Filtration properties of soil geotextile systems. *Filters*. General Raport IX International European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering Groundwater Effects in Geotechnical Engineering, Dublin, vol 2, 1987.
26. Wesołowski A., Krzywosz Z., Brandyk T.: *Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich*. Wyd. SGGW, Warszawa 2000.